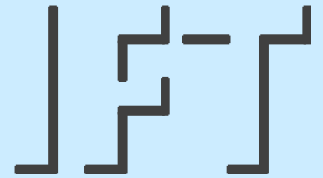


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking

UNIVERSITÄT STUTTGART



Gregor Novak

Zur Abschätzung der Lebensdauer von laufenden hochmodularen Faserseilen

November 2017

Zur Abschätzung der Lebensdauer von laufenden hochmodularen Faserseilen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Gregor Novak
aus Sulzbach-Rosenberg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Tag der mündlichen Prüfung: 14.11.2017

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
der Universität Stuttgart

2017

I. Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Seiltechnologie am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart. Die Grundlage und auch der Anstoß für die Arbeit waren ein Forschungsprojekt und meine tägliche Erfahrungen aus Projekten und Normungsarbeit.

Folgende Personen möchte ich besonders erwähnen:

- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit
- Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart, für die Übernahme des Mitberichts
- Dipl.-Ing. Sven Winter möchte ich besonders für die sehr hilfreichen und zahlreichen Diskussionen und für das Gegenlesen der Arbeit danken
- Dipl.-Ing. Martin Wehr danke ich für das Gegenlesen der Arbeit und für die geführten Diskussionen
- Meinen Kollegen der Abteilung Seiltechnik und den Mitarbeitern der Werkstatt des IFT möchte ich für ihre Unterstützung danken
- Allen Studenten, deren studentischen Arbeiten ich im Zusammenhang mit meiner Promotion betreuen durfte, danke ich für ihre Arbeit
- Meinen Freunden danke ich für die schönen Auszeiten bei Sport und Bier
- Meiner Familie möchte ich abschließend für die Unterstützung während dem Studium und der Promotion danken

II. Inhaltsverzeichnis

I. Vorwort	I
II. Inhaltsverzeichnis	II
III. Zusammenfassung	VII
IV. Abstract.....	XI
1. Einleitung	1
1.1 Begriffserklärung „Faserseil“	1
1.1.1 Hochmodulare Faserwerkstoffe	2
1.1.2 Seilkonstruktionen.....	7
1.1.3 Faserbeschichtung.....	13
1.2 Anwendungen mit laufenden hochmodularen Faserseilen.....	13
1.3 Problemstellung und Zielsetzung	19
1.4 Vorgehensweise	20
2. Stand der Forschung	21
2.1 Allgemeine Untersuchungen zu Faserseilen	21
2.1.1 Stehende Seile.....	21
2.1.2 Faserwerkstoffe und -brüche	22
2.1.3 Seilendverbindungen für Faserseile	27
2.1.4 Drehmoment von Faserseilen.....	29
2.2 Untersuchungen zur Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile.....	34
2.2.1 Lebensdauergleichung von Feyrer	37
2.2.2 Lebensdauergleichung von Vogel.....	38
2.2.3 Lebensdauergleichung von DSM.....	40
2.2.4 Lebensdauergleichung von Heinze.....	40
2.2.5 Vergleich der vorgestellten Lebensdauergleichungen	41
2.2.6 Life Factor	42
2.2.7 Sonstige Lebensdaueruntersuchungen	43
2.3 Untersuchungen zur Erkennung der Abergereife laufender hochmodularer Faserseile	44

2.4	Untersuchungen zur Optimierung von Seiltrieben für hochmodulare Faserseile	46
2.5	Untersuchungen und Bauarten von Spulvorrichtungen und Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile	46
2.5.1	Untersuchungen an Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile	46
2.5.2	Auf dem Markt erhältliche Spulvorrichtungen und Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile	47
2.6	Bewertung des Standes der Forschung	52
3.	Theoretische Grundlagen	53
3.1	Lebensdauerbeeinflussende Faktoren für laufende hochmodulare Faserseile	53
3.1.1	Maschinenbasierte Faktoren	55
3.1.2	Seilbasierte Faktoren	65
3.1.3	Umweltbasierte Faktoren	66
3.1.4	Fazit zu den Lebensdauerbeeinflussenden Faktoren	67
3.2	Durchführung von Biegeversuchen	67
3.3	Das Bestimmtheitsmaß R^2	68
4.	Experimentelle Untersuchungen	69
4.1	Prüfstände	69
4.1.1	Biegemaschinen	69
4.1.2	Regalbediengerät	70
4.2	Einfachbiegeversuche	71
4.3	Praxisnahe Dauerversuche auf Regalbediengerät	73
5.	Formulierung der Ansätze zur Lebensdauerabschätzung und Auswertung	75
5.1	Vorgehensweise zur Entwicklung der neuartigen Methode (3-Punkt-Methode)	76
5.2	Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes	77
5.3	Formulierung der Ansätze zur Lebensdauerabschätzung	81
5.4	Verwendete Versuchsergebnisse Dritter	84
5.4.1	Lebensdaueruntersuchungen Feyrer 1991	84
5.4.2	Lebensdaueruntersuchungen Heinze 2013	84
5.4.3	Lebensdaueruntersuchungen Gerz 2016	86
5.5	Programmierung einer Auswertesoftware in NI Labview	86

5.6	Auswertung der formulierten Ansätze	88
5.6.1	Auswertung der 3-Punkt-Methode	88
5.6.2	Herkömmliche Auswertung mit großer Datenbasis.....	93
5.7	Diskussion der neuartigen Methode und der Grenzen und Limitierungen.....	95
5.8	Einflussfaktoren für Lebensdauerabschätzungen	98
5.8.1	Seilkraftfaktoren	99
5.8.2	Lebensdauerfaktoren	101
5.9	Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes	103
6.	Gestaltungsempfehlungen für Seiltriebe mit laufenden hochmodularen Faserseilen.....	107
6.1	Seilscheiben	107
6.2	Seiltrommel.....	108
6.3	Positionierung der Seilscheiben zueinander bzw. der Seiltrommel zur ersten Seilscheibe (Schrägzug).....	109
6.4	Entwicklung einer Spulvorrichtung zum Ausgleich der Verdrehung von hochmodularen Faserseilen	111
6.5	Anpassung Geschwindigkeit und Beschleunigung an Last	112
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	113
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Ausblick	117
V.	Literaturverzeichnis.....	i
VI.	Abbildungsverzeichnis	xiii
VII.	Tabellenverzeichnis.....	xvi
VIII.	Formelverzeichnis	xvii
IX.	Abkürzungsverzeichnis	xviii
X.	Anhang A1	xix
XI.	Anhang A2 – Beispiel Datensatz Gerz, Darstellung der Ergebnisse für die Bestimmtheitsmaße (81 Ergebnisse, kleinster ausgewerteter Datensatz)	xxix
XII.	Lebenslauf.....	xxxiii

III. Zusammenfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile. Hierzu gehört das Aufstellen einer Abschätzungsmethode um eine statistisch relevante Aussage über die Lebensdauer eines hochmodularen Faserseiles beim Lauf über Seilscheiben zu treffen und die Untersuchung der Faktoren, die die Lebensdauer dieser laufenden hochmodularen Faserseile beeinflussen. Weiter wird eine neuartige Spulvorrichtung für laufende hochmodulare Faserseile vorgestellt, die einer durch Schrägzug oder Höhenspannung hervorgerufenen Verdrehung entgegenwirkt und eine Erhöhung der Seillebensdauer ermöglicht.

Laufende Seile sind hierbei Seile, die während des Einsatzes und Betriebes über eine Seilscheibe oder auf Trommeln laufen und dabei gebogen werden, wie zum Beispiel in einem Kran oder einem Aufzug. Abgrenzend dazu sind die *Stehenden Seile* zu nennen, die während des Betriebes nicht über eine Seilscheibe laufen, sondern zwischen zwei Strukturen gespannt sind, wie zum Beispiel Abspannseile bei Schrägseilbrücken.

Hochmodulare Faserseile gewinnen in technischen Anwendungen an Bedeutung. Bereits kurz nach der Einführung der ersten hochmodularen Faserseile in den 1960er Jahren wurden diese im Offshore-Bereich als Mooring-Lines für Ölplattformen verwendet [McK04]. Seit den 1990er Jahren geraten zunehmend Anwendungen für laufende Seile in den Blickpunkt für den Einsatz hochmodularer Faserseile [Tor10], [Sam16], [Teu16]. Forschung und Industrie, sowohl Faserseilhersteller als auch die Hersteller von Hebezeuge, wie zum Beispiel Mobilkrane, sehen in der Verwendung von hochmodularen Faserseilen Potentiale vor allem hinsichtlich Bauraum, Gewicht und Antriebsleistung. Um hochmodulare Faserseile sicher und wirtschaftlich in laufenden Anwendungen einsetzen zu können, ist es notwendig die Lebensdauer beim Lauf über Scheiben zu kennen. Dazu ist es zurzeit noch notwendig eine Vielzahl an Biegeversuchen durchzuführen um alle im Betrieb auftretenden Parameter abzudecken.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode aufzustellen, mit der es möglich ist, die Lebensdauer eines hochmodularen Faserseiles für einen bestimmten Seiltrieb abzuschätzen. In der Vergangenheit wurden von anderen Autoren bereits Berechnungsansätze vorgestellt, die jedoch nur für einen einzelnen Seiltyp angewendet werden können oder sehr komplex in der Anwendung sind und keine allgemeine Aussage zur Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile ermöglichen. Die in dieser Arbeit vorgestellte Abschätzungsmethode stellt somit einen ersten Versuch dar, die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile in einer einfachen Art abzuschätzen. Die Abschätzungsmethode soll vorrangig dazu dienen eine zu

erwartende Lebensdauer eines bestimmten hochmodularen Faserseiles zu bestimmen. Diese zu erwartende Lebensdauer kann später zum Beispiel genutzt werden um Inspektionsintervalle festzulegen. Da Seile im Betrieb regelmäßig inspiziert werden müssen und bei der Feststellung der Ablegereife ausgetauscht werden, besteht kein Bedarf die Seillebensdauer mit einer sehr hohen Genauigkeit und damit einhergehender Komplexität zu berechnen.

Die für die Aufstellung der neuartigen Abschätzungsmethode verwendeten Ergebnisse sind frei zugängliche Literaturwerte Dritter, die zum Teil aus Versuchen am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart stammen. Den Anstoß für die neuartige Methodik gaben zwei Forschungsprojekte am IFT, von denen der Autor das zweite selbst betreut hat. Das erste Forschungsprojekt „Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik“ wurde von der AiF¹-Forschungsgemeinschaft gefördert und hatte den Nachweis zum Ziel, dass hochmodulare Faserseile als laufende Faserseile in Seiltrieben eingesetzt werden können. Bei dem vom Autor betreuten Forschungsprojekt „Entwicklung eines hochfesten Faserseiles für Regalbediengeräte“ handelte es sich um ein ZIM²-Kooperationsprojekt mit einem Faserseilhersteller, dessen Ziel es war, ein hochmodulares Faserseil zu entwickeln, das speziell auf die Anforderungen in laufenden Anwendungen angepasst ist.

Neben der Vorstellung der Berechnungsmethode für die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile sollen Gestaltungsempfehlungen für Seiltriebe für hochmodulare Faserseile gegeben werden, um die obengenannten Potentiale nutzbar zu machen. Dazu gehört die Gestaltung der Seilscheiben, der Seiltrommeln, der Seilführung usw. und eine neuartige Spulvorrichtung, die es ermöglicht einer Verdrehung des Faserseiles im Seiltrieb entgegenzuwirken. Eine Verdrehung des Faserseiles im Betrieb kann durch Schrägzug und Höhenspannung hervorgerufen werden. Sind zwei aufeinander folgende Seilscheiben nicht in einer Flucht, läuft das Seil, ein Drahtseil oder ein Faserseil, nicht im Rillengrund auf die Seilscheibe, sondern läuft auf die Rillenflanke auf und bewegt sich erst anschließend über die Rillenflanke in den Rillengrund. Diese Bewegung ist eine Kombination aus Rollen und Gleiten, wobei das Rollen dazu führt, dass eine Verdrehung in das Seil eingebracht wird. Man spricht hierbei von Schrägzug. Die zweite Ursache für Verdrehung kann die sogenannte Höhenspannung sein. Wird ein Faserseil senkrecht aufgehängt und am unteren Ende mit einer Last beaufschlagt, wird sich das Seil aufgrund des Eigendrehmomentes um die Seilachse verdrehen. Die durch diese Ursachen bewirkte Verdrehung ist schädlich für das Seil, da es aufgrund einer Lastumverteilung zwischen den Litzen im Seilinneren zu einer

¹ AiF: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“

² ZIM: Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand

Lebensdauerreduktion kommt. Die Vorrichtung soll es erlauben, für den ersten oben vorgestellten Fall, verdrehte laufende Faserseile derart auf die Rillenflanke einer Seilscheibe oder einer Seiltrommel oder bei mehrlagiger Wicklung auf einen benachbarten Seilstrang derart zu lenken, dass die Verdrehung aus dem Faserseil herausgedreht wird und es sich wieder in einem unverdrehten Zustand befindet.

IV. Abstract

On the assessment of the lifetime of running high-modulus fibre ropes

Introduction

Polymer fibres can be divided into two main groups, low strength fibres like Polyamide Polyethylene, etc. and high modulus fibres like High Modulus Polyethylene (HMPE), Liquid Crystal Polymer (LCP), etc. High modulus fibres were developed on the basis of the low strength fibres which have an unaligned molecular structure. On the other side, high modulus fibres have a much aligned molecule structure which derives from the manufacturing process which leads to a high strength.

High-modulus fibre ropes possess a variety of advantages compared to wire ropes like the above mentioned high strength, a low density that leads to a low self-weight and excellent lifetime when bended over sheaves. Today high-modulus fibre ropes have a growing market share in several applications like mobile cranes [Teu16], [Sam16] and elevators [Hei14].

To safely operate these new strength members it is of great importance to have a possibility available to determine the lifetime of a specific fibre rope and to have a reliable method of detecting the point of discard of a specific fibre rope. The first point is the content of this thesis which is also important for the second mentioned point. The knowledge of the rope lifetime can be used to plan the intervals for inspecting the rope, especially for the first times when a fibre rope is put into service on a new application.

The lifetime of a rope can be determined with two methods. The first one is testing a fibre rope with a specific set of parameters that reflect the later application in which the rope is used. This approach has two disadvantages. The first disadvantage of testing is the high lifetime, the advantage of high-modulus fibre ropes, which leads to long running tests especially in combination with low rope forces and high D/d-ratios. The second disadvantage is the limitation to a certain application with defined loads and D/d-ratios. The second method for determining the rope lifetime is of course by calculation or, to be more precise, estimation.

The existing calculation methods, which will be introduced in the next section, need the performance of a fairly high amount of bending tests. To avoid this, it would be a benefit to have the possibility available to use a new assessment method which needs only a limited number of bending tests and may also be used to give lifetimes for parameter combinations

that were not tested. This new method for estimating the lifetime of a running high modulus fibre rope will be introduced in this thesis.

Existing lifetime calculations method

Several formulas were set up in the past with different approaches by Feyrer **[Fey91]**, Vogel **[Vog98]**, the company DSM **[Sme10]** and Heinze **[Hei13]**.

Feyrer used his formula for wire ropes **[Fey15]** as a basis (Formula (a)) and compiled coefficients for a wire rope construction rope made of Dyneema SK 60 with a braided cover of Polyester **[Fey91]**.

$$\lg N = a_0 + a_1 * \lg\left(\frac{S}{d^2}\right) + a_2 * \lg\left(\frac{D}{d}\right) + a_3 * \lg\left(\frac{S}{d^2}\right) * \lg\left(\frac{D}{d}\right) \quad (a)$$

With: N: Bending cycles
 a_i : Coefficients of regression
 S/d^2 : Diameter related rope force [N/mm²]
 D/d : Relation between sheave diameter D and rope diameter d

The correlation coefficient R^2 for this approach and the tested rope samples was 0,991. More tests on other rope samples were not performed by Feyrer, therefore a statement on the general validity cannot be done.

A more simple approach was used by Vogel **[Vog98]**. Vogel performed research on braided and laid 8 mm HMPE samples both made of Dyneema SK 60 and SK 75. Vogel established two formulas which featured a diameter related (Formula (b)) and a mass related approach (Formula (c)).

$$\lg N = a_0 + a_1 * \lg\left(\frac{S}{d^2}\right) \quad (b)$$

$$\lg N = b_0 + b_1 * \lg\left(\frac{S}{m^*}\right) \quad (c)$$

With: N: Bending cycles
 a_i, b_i : Coefficients of regression
 S/d^2 : Diameter related rope force [N/mm²]
 S/m^* : mass related rope force [N/tex]

The correlation coefficients R^2 were 0,935 and 0,992 for the diameter related approach and 0,936 and 0,992 for the mass related approach. With this research Vogel was able to show that even with a simple approach for lifetime calculations good results can be found.

The manufacturer of Dyneema DSM developed formula (Formula (d)) is based on the formula of Feyrer for wire ropes [Nut10], [Sme10]. Coefficients of regression and values for the correlation coefficient R^2 were not released.

$$\log N = a_0 + a_1 * \log\left(\frac{F}{d^2}\right) + a_2 * \log^2\left(\frac{F}{d^2}\right) + a_3 * \log^3\left(\frac{F}{d^2}\right) + a_4 * \log\left(\frac{D}{d}\right) + a_5 * \log\left(\frac{S}{d^2} * \frac{D}{d}\right) + a_6 * \log(d) + a_7 * \log\left(\frac{D}{d}\right) \quad (d)$$

With: N: Bending cycles
 a_i : Coefficients of regressions
 F/d^2 : Diameter related rope force [N/mm²]
 D/d : Relation between sheave diameter D and rope diameter d
d: Nominal rope diameter

Heinze established a comprehensive approach (Formula (e)) that consists of logarithmic and tangents functions. Also a compensation diameter is introduced that reflects the reduction in diameter because of the applied tension. With this compensation diameter Heinze also introduces a D/d like operand called bending diameter relation BV.

$$\lg \bar{N} = p_{00} + p_{01} * \arctan(p_{02} * BV) + p_{10} * \lg(\sigma) + p_{11} * \lg(\sigma) * \arctan(BV) - \lg(10^{\sigma - a_{D0} + a_{D1} * BV^{-2}} + 1) \quad (e)$$

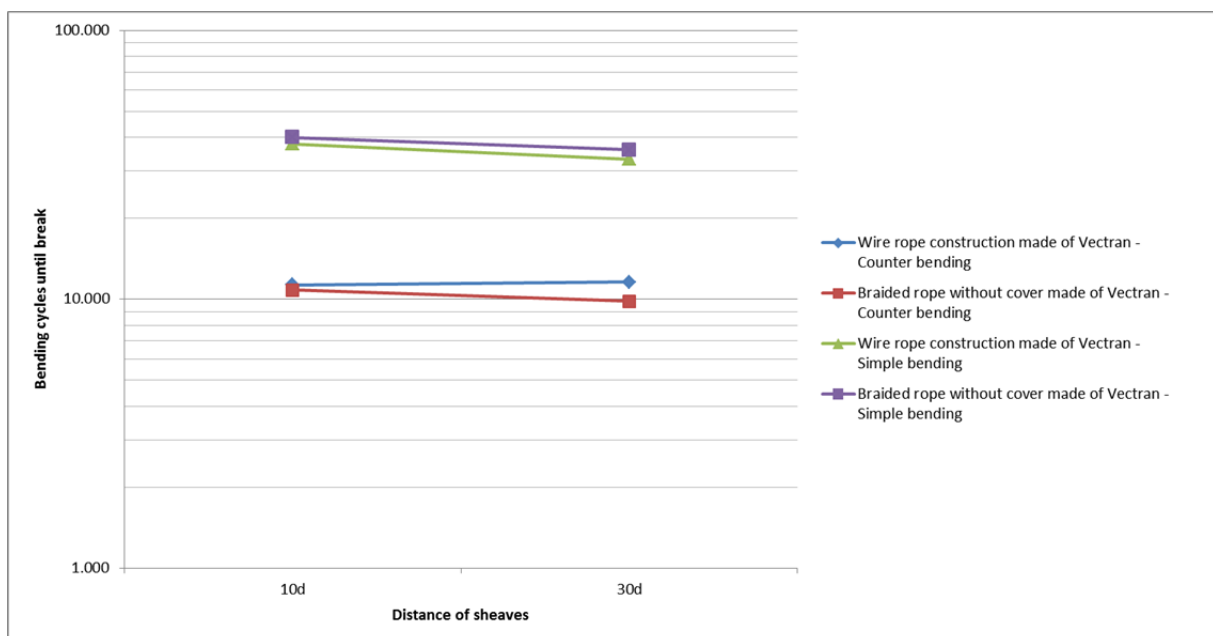
With: $\bar{N}$: Mean bending cycles
 p_i, a_{Di} : Coefficient of regressions
BV: Bending diameter relation $BV = \frac{D_1^*}{d_{ET}}$
With: D_1^* : Tread diameter (Diameter of the bottom of the groove)
 d_{ET} : Bearing compensation rope diameter
 σ : Rope tension [N/mm²]

Heinze is giving coefficient of regressions for three rope samples made of Dyneema SK 75, Technora T200 and Vectran HT T97 with a braided construction and a cover. Values for the correlation coefficient R^2 are not given.

Influences on the lifetime of a running high-modulus fibre rope

The influences on the lifetime can be divided into three categories: machine based factors, rope based factors and environmental factors. The machine based factors can also be divided into three sub categories which are factors originated from the drive system, factors originated from the rope sheave and general factors. The drive factors are the hoisting speed, the acceleration and the jerk. The factors from the rope sheave include the geometry of the groove, the D/d-ratio, the r/d-ratio, the material of the sheave and the mass inertia. General factors are for example the influence of the rope drum, the direction of bending, deflection, bending length, wrap angle, the number of rope sheaves and the rope force. The rope based factors include the coefficient of friction, the fibre material, the rope diameter, the rope construction and the coating. The environmental based factors are the existence of water, temperature and the presence of chemicals. In the following, research and results on a selection of these factors will be discussed.

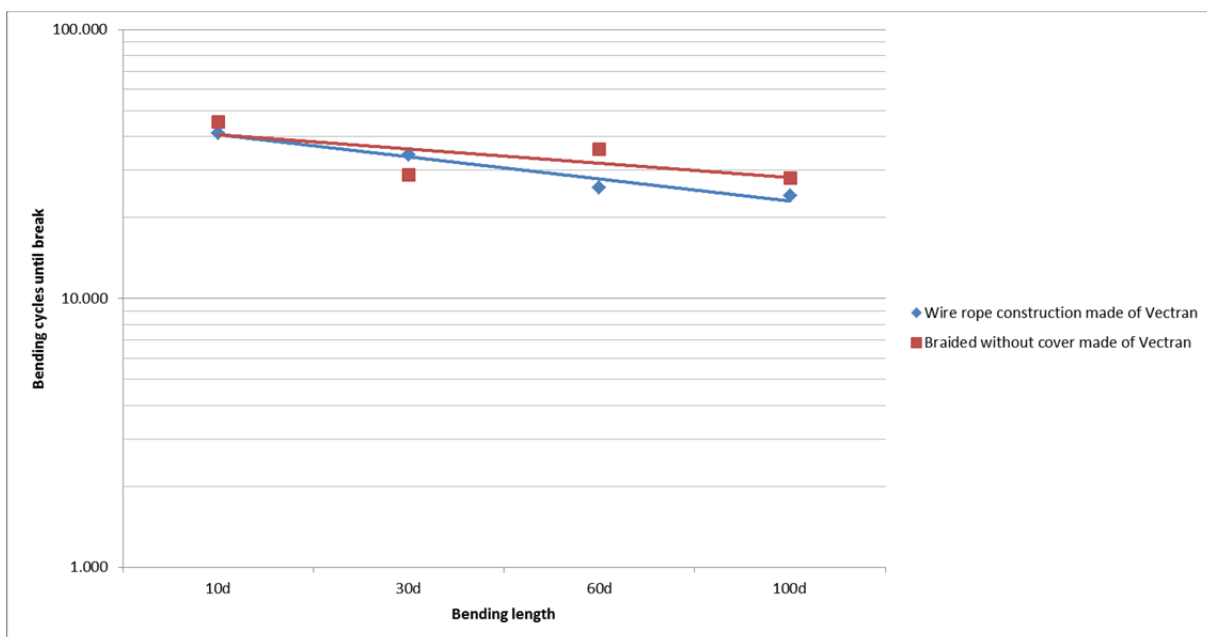
Like with wire ropes, the **direction of bending** has an influence on the rope lifetime. In a student thesis done at IFT, Franck performed counter bending tests in which he varied the distance between the sheaves [Fra16]. The tests were done with braided ropes without cover and with ropes made in wire rope construction both with Vectran as material. Independent of the distance, the residual lifetime in counter bending was about 1/3 compared to simple bending (Picture 1).



Picture 1: Results of the counter bending tests of Franck (acc. to [Fra16])

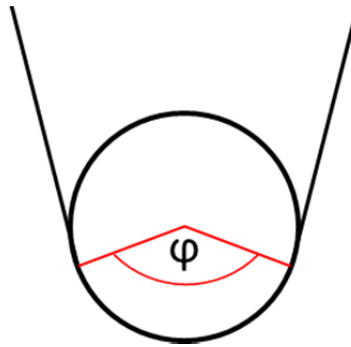
Heinze also did research on this subject [Hei11]. He did not vary the distance of the sheaves but the rope force. Three braided rope samples with cover made of Dyneema, Technora and Vectran were used. For Technora and Vectran Heinze made a similar observation to the results of Franck, Dyneema on the other hand suffered nearly no reduction.

The **bending length** is a statistical factor, the longer the rope length that is subjected to bending the more strand crowns will run over a sheave. Because of this, the probability that a failure occurs is getting higher if the bending length is getting higher. Franck performed in his student thesis at IFT bending tests with different bending lengths [Fra16]. These tests validated this assumption and showed this influence (Picture 2).



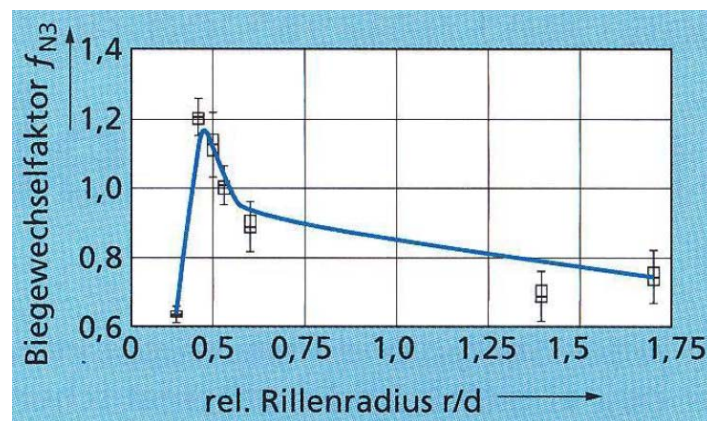
Picture 2: Results of the bending tests with different bending lengths (acc. to [Fra16])

The influence of the **wrap angle** (Picture 3) has a similar origin like the bending length. But in contrast to the bending length it is of advantage to have more strand crowns on the sheave because the pressure distribution resulting from the tension is better distributed. Vogel performed bending tests with rope samples that differed in pitch length [Vog02-1]. The lifetime was the highest for the test sample with the lowest pitch length, because more strand crowns laid on the rope sheave.



Picture 3: Wrap angle around the rope sheave (acc. to [Fey15])

The **r/d-ratio** (the ratio between the groove radius and the rope diameter) is important in terms of the stabilization of the rope in the groove. In contradiction to wire ropes, high modulus fibre ropes have a lower radial stiffness and will ovalize in a groove and has to be stabilized therefore. In regards of a groove that is too wide the rope will most likely flatten, in regards of a too small groove the rope will suffer pressure to the side which leads to a clamping effect. All these factors lead to a reduction in lifetime (Picture 4). The r/d-ratio has therefore to be chosen correctly so that these effects do not occur. In contrast to the research done by Heinze [Hei11] presented in Picture 4 the r/d-ratio should be 0.51 related to the nominal diameter not to be in danger to clamp the rope.



Picture 4: Influence of the r/d-ratio on the lifetime [Hei11]

The **geometry of the groove** also comprises the above mentioned r/d-ratio but also the shape of the groove opening angle of the groove. Since a round groove shape has been proven for wire ropes this should also be used for fibre ropes. For the opening angle a value of 60° should be at least used. The opening angle is especially important if deflection is occurring in the rope drive. If a rope is running on a sheave under deflection the rope will not hit the sheave in the groove base but on the flank of the groove. The rope then will roll and slide into the groove

base and because of the rolling the rope gets twisted. This twisting is leading to an uneven load distribution and higher pressure in the rope which leads to a reduced lifetime.

Introduction of a new method for assessing the lifetime of a running high-modulus fibre rope

The new method for assessing the lifetime of a running high-modulus fibre rope comprises a more simple approach than for example the formula of Feyrer. For the assessment a minimum number of three points of lifetime are needed that are gained in bending tests. Two of these bending tests are done using the same D/d-ratio but different rope forces (or Safety Factors) and the third one is using a different D/d-ratio and one of the rope forces of the other two bending tests or a new third one (Table 1).

Table 1: Combination of parameters of the bending tests

Test-No.	1	2	3
D/d-ratio	D/d1	D/d1	D/d2
Safety Factor	SF1	SF2	SF2 oder SF3

Therefore three bending test are theoretical needed for the new approach. Anyhow the author recommends doing a minimum number of two tests per lifetime point to give statistical evidence. In the event of a significant deviation of two results a third bending test should be done for this specific combination of parameters. It is proposed to do a third test if the deviation is more than 25% of the higher bending cycle.

Example:

Lifetime Test 1.1: 50.000 Bending cycles

Lifetime Test 1.2: 70.000 Bending cycles

25% of 70.000 Bending cycles are 17.500 Bending cycles

→ A third bending test has to be done

For the establishment of the new method several approaches (Table 2) were researched. For the formulation of these approaches the most influencing factors on the rope lifetime in the real application were identified. These factors are

- D/d-ratio
- Safety Factor SF
- Ratio of the actual rope diameter under a certain load to the nominal diameter d_{act}/d_{Nom}

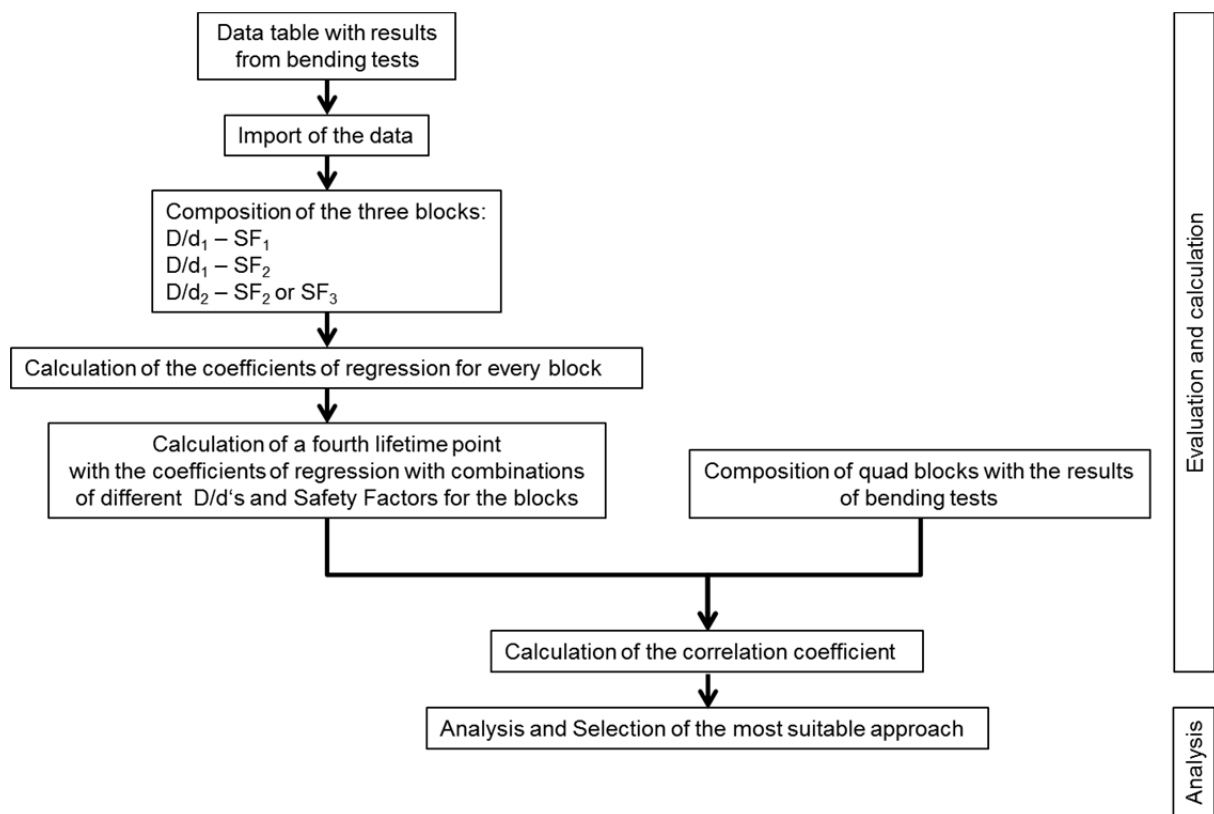
All three factors are also the main parameters in standard bending tests.

Table 2: Formulated approaches for the estimation of the rope lifetime

Approach 3	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$
Approach 4	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \frac{1}{\lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]}$
Approach 5	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$
Approach 6	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \frac{1}{\lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]}$
Approach 8	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\frac{\left(D/d\right)}{SF}\right] + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$
Approach 9	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\left(D/d\right) \times SF\right] + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$
Approach 10	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{SF}{D/d}\right) + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$
Approach 11	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\frac{\left(D/d\right)}{SF}\right] + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$
Approach 12	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\left(D/d\right) \times SF\right] + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$
Approach 13	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(D/d\right)}\right] + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$

For the evaluation of the approaches with the new method results from several different sources were used. These include research of Feyrer [Fey91], Heinze [Hei13] and Gerz [Ger15]. For the evaluation of the approaches for the new method the author programmed an evaluation software using National Instruments LabView.

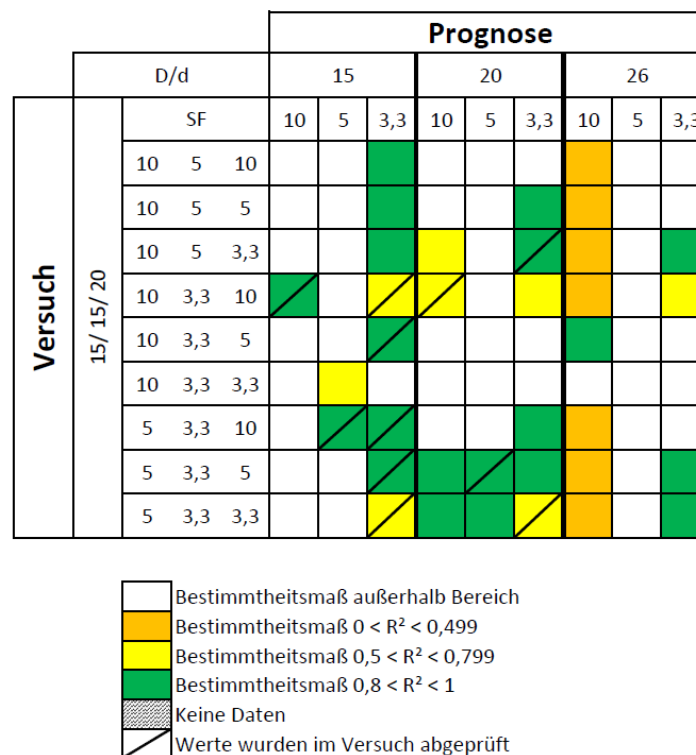
In Picture 5 a flow chart is shown with the steps which the above mentioned evaluation software is following. From a data table with several results of bending tests the software is automatically composing blocks with three results which are then used to calculate coefficients of regression. With these coefficients a fourth lifetime point is calculated and added to the three corresponding lifetime points from the specific block. These are compared to a corresponding block that is consisting of four lifetime points solely from bending tests and the correlation coefficient is calculated. This procedure is done automatically; further processing of the correlation coefficient is done using Microsoft Excel.



Picture 5: Block diagram of the evaluation software

The correlation coefficients are evaluated for every approach of a data table. In Picture 6 an example for the evaluation of the results of Gerz is presented.

Datensatz: Gerz
D/d: 15/ 20
Seilwerkstoff: Dyneema SK78
Ansatz: 11



Picture 6: Exemplary display of results of the local evaluation

On the left side the D/d-ratios of the bending tests are listed and next to them the combinations of safety factors. In the upper rows the D/d-ratios and the safety factors of the estimation are listed. The orange boxes show points with a probability between 0 and 49.9 %; the yellow boxes show probabilities between 50 % and 79.9 % and the green boxes representing probabilities between 80 % and 100 %. Boxes which are white represent points which probabilities are out of range and boxes with a crossed line were tested in the bending tests which results were used for the estimation.

With the use of these tables the most suitable approaches were identified which are subsumed in Table 3.

Table 3: Listing of the most suitable approaches of the evaluation of the new method

Rope Material	Rope Construction	Approach
Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantle Construction with laid core	6
Dyneema SK 75	Kern-Mantle Construction with braided core	6
Dyneema SK 78	Open 12 strand Braid	11
Technora T221	Kern-Mantle Construction with braided core	6
Vectran T97	Kern-Mantle Construction with braided core	13

Additional to the evaluation of the new method an evaluation comparable to the conventional approach of Feyrer and others was done using Microsoft Excel. The results for the global evaluation are listed in Table 4. It can be observed that even with these simple approaches correlation coefficients R^2 of more than 0,971 can be achieved.

Table 4: Listing of the most suitable approaches of the global evaluation

Rope Material	Rope Construction	Approach	R^2
Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantle Construction with laid core	11	0,971
Dyneema SK 75	Kern-Mantle Construction with braided core	8	0,998
Dyneema SK 78	Open 12 strand Braid	8	0,997
Technora T221	Kern-Mantle Construction with braided core	4	0,977
Vectran T97	Kern-Mantle Construction with braided core	5	0,996

Because of the amount of data the coefficients of regression for the evaluation of the new method are not listed. In Table 5 the coefficients of regression b_i for the conventional evaluation can be found.

Table 5: Coefficients of regression b_i for the conventional evaluation

Rope Material	Rope Construction	Approach	b_0	b_1	b_2
Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantle Construction with laid core	11	-2,3675	8,1413	4,0529
Dyneema SK 75	Kern-Mantle Construction with braided core	8	-0,4755	4,3872	2,3052
Dyneema SK 78	Open 12 strand Braid	8	-1,0237	5,2117	2,7916
Technora T221	Kern-Mantle Construction with braided core	4	1,7272	4,1163	-1,9678
Vectran T97	Kern-Mantle Construction with braided core	5	-1,4377	4,7360	0,8992

A conventional evaluation was also done for the approaches that were identified most suitable for the evaluation of the new method. In Table 6 the correlation coefficients R^2 and coefficients of correlation b_i are presented. For these approaches correlation coefficients R^2 of minimum 0,874 were found.

Table 6: Correlation coefficient R^2 and coefficients of regression b_i for the approaches of the local evaluation when evaluated globally

Rope Material	Rope Construction	Approach	R^2	b_0	b_1	b_2
Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantle Construction with laid core	6	0,874	0,9307	3,6062	-0,2872
Dyneema SK 75	Kern-Mantle Construction with braided core	6	0,911	2,3164	2,0915	-0,3562
Dyneema SK 78	Open 12 strand Braid	11	0,985	-0,5379	5,1204	2,8191
Technora T221	Kern-Mantle Construction with braided core	6	0,961	1,2485	3,9731	-1,1488
Vectran T97	Kern-Mantle Construction with braided core	13	0,996	-0,9972	5,4444	-4,7360

Discussion of the limitations of the new method

With the new method there is the possibility to estimate the lifetime of a running high modulus fibre rope with a limited number of bending tests. However limitations have to be considered regarding the quality of the results. Extrapolations should be kept to a minimum and the used Safety Factors of the smaller D/d -ratio should be not more than two times apart. Furthermore it is beneficial to use the same Safety Factor for the bigger D/d -ratio that was already used for the smaller D/d -ratio.

Conclusion

With the introduction of the new method, the lifetime of running high modulus fibre ropes can be assessed with a simple approach. The achieved correlation coefficients proved that the lifetime can be estimated in a very secure way using a limited number of bending tests.

1. Einleitung

1.1 Begriffserklärung „Faserseil“

Technische Faserseile werden in zwei Hauptgruppen eingeteilt, die sich im Grundmaterial unterscheiden. Die erste Hauptgruppe umfasst die herkömmlichen Faserseile, die sowohl aus Naturfasern als auch aus niederfesten Kunstfasern bestehen können. Zu den Naturfasern zählen zum Beispiel Hanf und Sisal, die auch als Seilkern oder -herz bei Drahtseilen zum Einsatz kommen [Fey15]. Aus Naturfasern werden bereits seit Jahrtausenden Seile unterschiedlichster Form hergestellt. Zu den niederfesten Kunstfasern zählen zum Beispiel Polyamid und Polyester, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurden [McK04]. Niederfeste Kunststoffe finden als Faserwerkstoffe für Technische Faserseile heutzutage vor allem in der Freizeitindustrie, zum Beispiel bei Kletterseilen, und im Schifffahrtsbereich Anwendung. Im Schifffahrtsbereich werden vor allem Festmacherleinen und Seile für Schlepper aus diesen Werkstoffen hergestellt. Ein weiteres Anwendungsgebiet in diesem Bereich sind Mooring-Lines, mit denen zum Beispiel Offshore-Plattformen am Meeresgrund verankert werden. Hinsichtlich der Normung sind niederfeste Faserseile sehr gut abgebildet. So sind Normen für Einfach- und Doppelgeflechte aus Polyester [DIN10-2], [DIN10-4], [DIN12-2], verschiedenste Seilkonstruktionen aus Polypropylen [DIN12-3], Einfach- und Doppelgeflechte aus Polyamid [DIN10-3], [DIN12-1] und gedrehte Konstruktionen aus Polyethylen [DIN05] verfügbar. In Abgrenzung zu den weiter unten vorgestellten hochmodularen Faserwerkstoffen weisen die niederfesten Faserwerkstoffe eine eher ungerichtete Molekülstruktur auf (Abb. 1).



Abb. 1: Molekülstruktur eines niederfesten Faserwerkstoffes [McK04]

Die zweite Hauptgruppe umfassen die hochmodularen Faserseile, die aus den niederfesten Kunstfaserseilen hervorgegangen sind. Sie weisen als herausragende Eigenschaft gegenüber den niederfesten Kunstfasern eine in Längsrichtung der Fasern überaus gerichtete Struktur der Molekülketten auf (Abb. 2).



Abb. 2: Ideale Molekülstruktur eines hochmodularen Faserseiles
[McK04]

Die gerichtete Struktur erlaubt eine gute und gleichmäßige Lastaufnahme der einzelnen Molekülketten, dies führt zu einer hohen Festigkeit des hochmodularen Faserwerkstoffes. Diese Eigenschaften prädestinieren hochmodulare Faserseile als Ersatz für Drahtseile in hochbeanspruchten Anwendungen [Weh97], [Weh00] wie Mobil- und Raupenkrane, Regalbediengeräten, Personenaufzügen usw.

1.1.1 Hochmodulare Faserwerkstoffe

Die oben beschriebene gerichtete Molekülstruktur ermöglicht es Fasern mit sehr hohen Festigkeiten zu erreichen, die über denen von Drähten aus Stahlseilen liegen. Als Werkstoffe kommen insbesondere hochmodulares Polyethylen (HMPE), aromatische Polyamide (Aramid), aromatische Polyester (LCP) und Poly(benzoxazol) (PBO), eine Art Aramid, zur Anwendung. In Tabelle 1 sind für die vier aufgeführten hochmodularen Faserwerkstoffe Standardwerte der mechanischen Eigenschaften mit Vergleichswerten für Stahl zu finden.

Tabelle 1: Übersicht über Standardwerte der mechanischen Eigenschaften verschiedener hochmodularer Faserwerkstoffe und Stahl [McK04]

Eigenschaft	Einheit	Aramid	LCP	PBO	HMPE	Stahl
Dichte	g/cm ³	1,45	1,40	1,55	0,98	7,85
Schmelzpunkt	°C	500	330	650	150	1.600
Feuchtigkeitsaufnahme, bei 65% RH ³ , 20°C	%	1 – 7	0	0	0	0
Zugfestigkeit	N/ mm ²	2.900	3.100	5.700	3.400	2.600
Bruchdehnung	%	3,5	3,5	3	3,5	2
E-Modul	N/mm ²	90.000	80.000	280.000	100.000	160.000

³ RH: Relative Humidity (engl.), Relative Luftfeuchtigkeit

Hochmodulares Polyethylen (HMPE)

HMPE weist die zweit-höchste Bruchlast der vier genannten Faserwerkstoffe auf, besitzt als Nachteil jedoch eine hohe Kriechneigung. Kriechen ist ein bei höherer konstanter Belastung auftretender kontinuierlicher Prozess, bei dem sich die Moleküle zum einen geraderichten und zum anderen aneinander abgleiten. Dieser Prozess kann zum Bruch des Faserseiles führen. Verbesserte und optimierte Molekülstrukturen begegnen diesem Nachteil und sollen die Kriechneigung zu einem großen Teil eindämmen [DSM12]. Hochmodulares Polyethylen wird als Stehendes Seil vor allem für Festmacherleinen im Schiffsverkehr und als Mooring-Line für Offshore-Plattformen eingesetzt. In jüngerer Vergangenheit werden im Bereich der Offshore-Krane Faserseile aus HMPE verwendet [Tor10]. Die auf dem Markt am weitesten verbreiteten Fasern aus HMPE sind Dyneema®, heute vor allem SK78, DM20 und SK99 [Geo13] mit einer XBO⁴-Beschichtung für Biegebeanspruchungen, von DSM⁴⁵ und Spectra®, vor allem Spectra 800 und Spectra 1000, von Honeywell. Für geflochtene Seile aus HMPE ist eine Norm verfügbar [DIN10-1].

Polyethylen weist im Vergleich zu anderen Faserwerkstoffen sehr lange und flexible Molekülketten auf. Bei der Herstellung werden diese physisch in eine sehr gleichgerichtete Struktur gebracht und dabei gestreckt. Der Herstellprozess wird als Gel-Spinning bezeichnet, bei dem eine gelartige Lösung durch Düsen gedrückt wird (Abb. 3). Aufgrund der sehr hohen Viskosität der Schmelze des Ausgangsmaterials UHMW-PE kommt nur dieses Verfahren in Frage [Hea01].

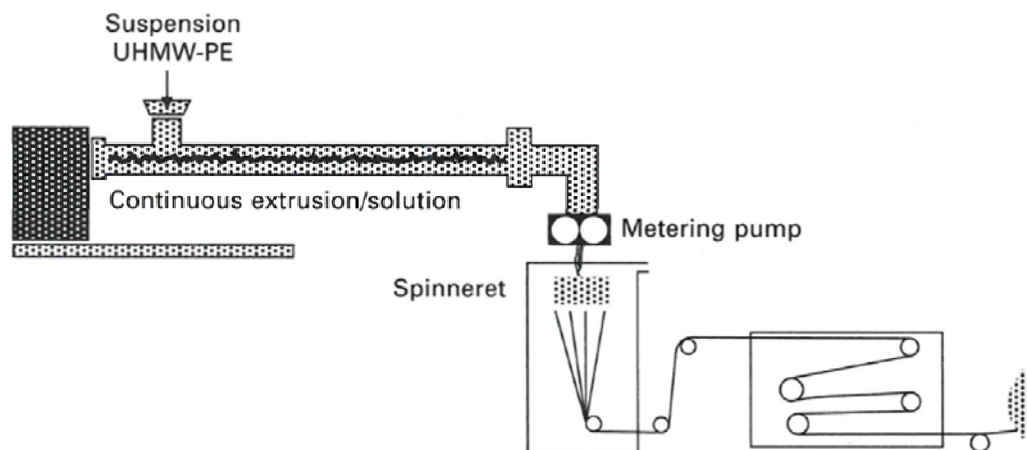


Abb. 3: Herstellprozess von HMPE [Bun09]

Die Eigenschaften der hergestellten Fasern werden nicht von chemischen Faktoren beeinflusst sondern rein durch die physischen und mechanischen Einflüsse während des Herstellungsprozesses der Fasern. Somit können mit dem prinzipiell selben Herstellverfahren,

⁴ Biegeoptimierte Beschichtung, entwickelt von DSM

⁵ DSM: Dutch State Mines, 1902 gegründetes Bergbauunternehmen, heute in der Chemiebranche tätig

aber mit vom Aufbau her unterschiedlichen Anlagen Fasern mit verschiedenen Eigenschaften hergestellt werden.

Neben der bereits oben genannten hohen Bruchlast als herausragender Eigenschaft weist HMPE daneben noch weitere positive Eigenschaften auf. Aufgrund der geringen Dichte von $0,98 \text{ g/cm}^3$ ist HMPE schwimmfähig und wird daher bevorzugt in der Offshore-Industrie eingesetzt. Die mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit, E-Modul und Bruchdehnung, sind von der Temperatur und der Verformungsgeschwindigkeit abhängig. So sind bei niedrigen Temperaturen oder bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten die Festigkeit und das E-Modul um ein Vielfaches höher als zum Beispiel bei Raumtemperatur. Die Beständigkeit gegenüber Säuren und Chemikalien, die Unempfindlichkeit gegenüber UV⁶-Strahlung und die gute Recyclebarkeit sind weitere herausragende Eigenschaften von HMPE.

Aromatische Polyamide (Aramid)

Aramid war die erste hochmodulare Faser, die entwickelt wurde. Unter dem Markennamen Kevlar® wurde diese Faser von DuPont in den 1960er entwickelt und vertrieben [McK04]. Aramid kommt nicht nur in Faserseilen sondern z.B. auch in Schutzwesten und in Fahrradreifen⁷ zum Einsatz. Als Werkstoff für Faserseile ist Aramid aufgrund der guten Biege- und Knickeigenschaften, der guten Abrasionsbeständigkeit und der einfachen Herstellung als geeignet. Allerdings ist die UV-Beständigkeit von Aramid eher gering. Daher sollten vor allem bei kleinen Seildurchmessern Kern-Mantel-Konstruktionen verwendet werden oder es sollte, wenn die Verwendung eines Mantels nicht gewünscht ist oder die UV-Belastung niedrig ist, eine entsprechende Beschichtung (Coating) aufgetragen werden.

Der Begriff *aromatisch* rührt von dem markanten Geruch der ersten entdeckten Aramide her. Chemisch gesehen ist ein Aramid eine Poly(para-phenylenterephthalamide)-Verbindung, kurz PPTA, also ein Polyamid. Die United States Federal Trade Commission veröffentlichte 1974 als offizielle Definition eines Aramides folgende Beschreibung: „A manufactured fibre in which the fibre-forming substance is a long chain synthetic polyamide in which at least 85% of the amide (-CO-NH-) linkages are attached directly to two aromatic rings“. Der chemische Aufbau besteht aus NH- und CO-Verbindungen, die mit zwei sogenannten aromatischen Ringsystemen verbunden sind (Abb. 4) [Hea01]. Für Garne aus Para-Aramid ist ein Prüfverfahren normiert [DIN99].

⁶ Ultraviolette Strahlung, kürzere Wellenlänge als sichtbares Licht ($< 400 \text{ nm}$)

⁷ Sog. Faltreifen, bei denen die umlaufenden Stahldrähte in den Reifenflanken durch Aramidfäden ersetzt sind

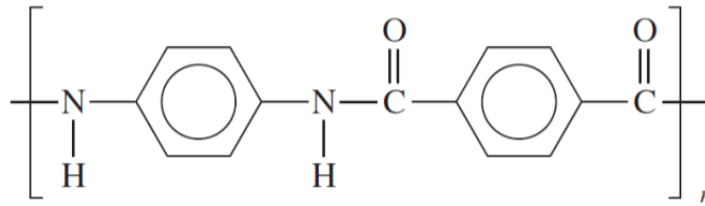


Abb. 4: Strukturformel von Kevlar® mit zwei Benzolringen [Hea01]

Das aromatische Ringsystem besteht im Allgemeinen aus Benzolringen, die als chemische Lösung bei der Herstellung der Fasern eine hohe Orientierung der Molekülketten bewirken und somit zu einer hohen Festigkeit führen.

Neben den herkömmlichen Polyamiden existieren die sogenannten Copolyamide, die einen ähnlichen chemischen Aufbau aufweisen wie die bereits vorgestellten Polyamide (Abb. 5).

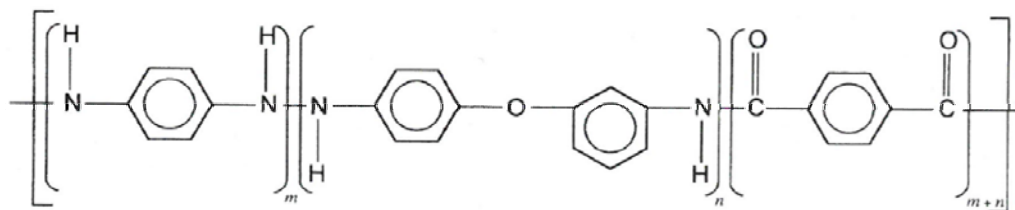


Abb. 5: Strukturformel von Technora® [Hea01]

Die Vorteile der Copolyamide, sogenannte 3,4'-POP-T Kopolymere [Bun09], liegen in der einfacheren Herstellung und der verbesserten Festigkeit. Die Copolyamid-Faser wurde von Teijin⁸ entwickelt und unter dem Namen Technora® vertrieben. Technora® bietet eine gute Abrasionsbeständigkeit, einen hohen Schmelzpunkt und gute Biegeeigenschaften bei niedrigen Herstellungskosten und geringer Kriechneigung.

Aromatische Polyester (LCP)

LCP (Liquid Crystal Polymer) wurde bereits in den 1970er Jahren entwickelt, wurde allerdings erst zu Beginn der 1990er Jahren als Vectran auf den Markt gebracht [Hea01]. LCP weist sehr gute Biegeeigenschaften, eine hohe Abrasionsbeständigkeit und keine Kriechneigung auf [Bee90]. Unter dem Namen Vectran® wird eine LCP-Faser für die Seilherstellung vertrieben. Aufgrund der derzeit noch relativ hohen Herstellungskosten ist Vectran ein Nischenprodukt für High-Performance Anwendungen, wie zum Beispiel als Seilwerkstoff für den Sky Crane des Curiosity Mars-Rovers [Atk16].

⁸ Teijin: japanisches Chemie- und Pharmaunternehmen

Die chemische Struktur ist vergleichbar mit der der aromatischen Polyamide. LCP wird durch Polymerisation einer 4-Hydroxybenzoesäure und 6-Hydroxid-2-Naphthol gewonnen und weist im Unterschied zu den Aramiden drei aromatische Ringsysteme, Benzolringe, auf (Abb. 6) [Hea01].

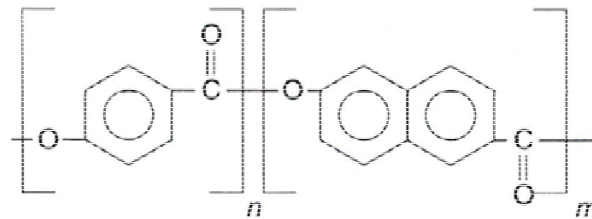


Abb. 6: Strukturformel von Vectra® [Hea01]

Neben der hohen Zugfestigkeit und der geringen Dehnung weist LCP weitere herausragende Eigenschaften auf, wie zum Beispiel eine sehr hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Faser-Faser-Abrasion. Diese kann für die Faserherstellung durch ein aufgebrachtes Finish weiter verbessert werden. Die UV-Beständigkeit ist hingegen als schlecht zu betrachten, daher müssen Faserseile aus LCP einen Mantel oder ein entsprechendes Coating haben.

Polyoxazoline Duroplaste (PBO)

PBO (poly(benzoxazol)) ist prinzipiell eine Weiterentwicklung der para-aromatischen Polyamide unter Verwendung einer sogenannten Flüssigkristall Polymerlösung. PBO weist von allen hochmodularen Faserwerkstoffen die höchste Bruchfestigkeit und das größte E-Modul auf, allerdings sind die Herstellungskosten im Vergleich die höchsten. Unter dem Namen Zylon® wird ein Faserwerkstoff zur Seilherstellung vertrieben.

Die chemische Struktur von PBO weist mit zwei aromatischen Ringsystemen einen ähnlichen Aufbau wie Aramid auf (Abb. 7) [Hea01].

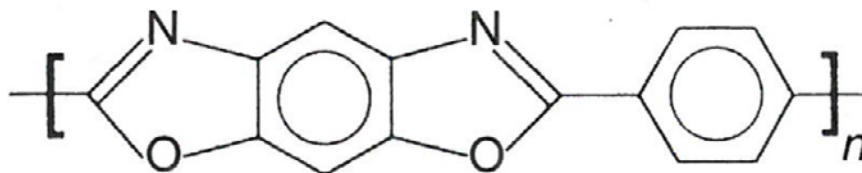


Abb. 7: Strukturformel von PBO [McK04]

PBO weist eine sehr hohe Widerstandsfähigkeit gegen Flammen auf und hat einen sehr hohen Schmelzpunkt. Gegen Kriechen, Abrasion und Chemikalien ist PBO ebenfalls sehr beständig.

1.1.2 Seilkonstruktionen

Die Seilkonstruktionen von hochmodularen Faserseilen sind generell mit denen der herkömmlichen Natur- und Kunstfaserseile vergleichbar. Folgende Konstruktionsarten sind gebräuchlich:

Geflochtene Konstruktion

Geflochtene Seilkonstruktionen werden in vielen Anwendungen eingesetzt, insbesondere für laufende Anwendungen [McK04]. Diese sehr gute Eignung resultiert aus ihrem runden Querschnitt und der guten Lastaufnahme. Aufgrund ihres Aufbaus weist diese Seilkonstruktion im unverdrehten Zustand kein Drehmoment auf. Geflochtene Seilkonstruktionen werden sowohl mit als auch ohne Mantel hergestellt. Bei den geflochtenen Konstruktionen werden drei Macharten unterschieden: 8-litzig, Einfachgeflecht und Doppelgeflecht [VDI90]. Alle Arten von Geflechten sind gut zu spleißen.

Bei der 8-litzigen Ausführung (Abb. 8) werden beim Verseilen vier der acht Spulenträger mit rechtsgeschlagenen Litzen und die anderen vier mit linksgeschlagenen Litzen bestückt [McK04]. Jeweils zwei der rechts- bzw. linksgeschlagenen Spulenträger bewegen sich paarweise beim Verseilprozess, wobei die Litzen auch durch das Seilinnere geführt werden, so dass eine stabile Seilstruktur entsteht. 8-litzige Seile werden in vielen Bereichen aufgrund ihrer guten Abrasionsbeständigkeit und der Drehungsfreiheit eingesetzt. Zusätzlich zu den zuvor genannten Normen sind Rund- und Spiralgeflechte nochmals allgemein genormt [DIN13-1].

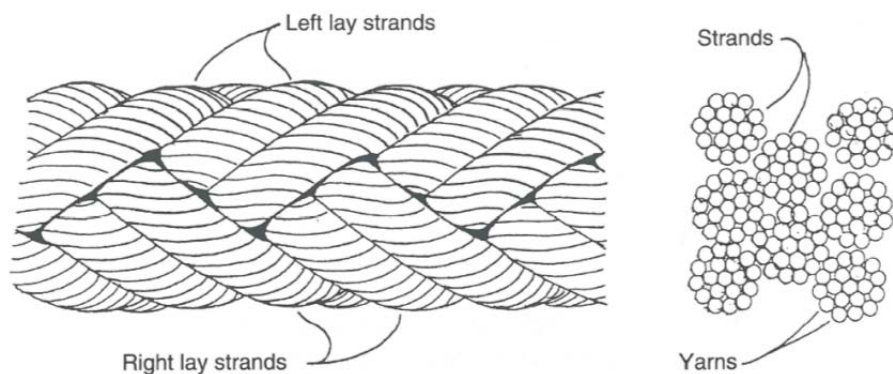


Abb. 8: 8-litziges geflochtenes Faserseil [McK04]

Bei der Herstellung von Einfachgeflechten läuft eine Hälfte der Spulen im Uhrzeigersinn und die andere Hälfte der Spulen entgegen dem Uhrzeigersinn um die Seilachse. Dabei bewegen sich die Spulen gleichzeitig von innen nach außen und wieder nach innen, im englischen Sprachraum wird dieses Herstellungsprozess deswegen auch „Maypole Braiding“ genannt (Abb. 9 und Abb. 10) [McK04].

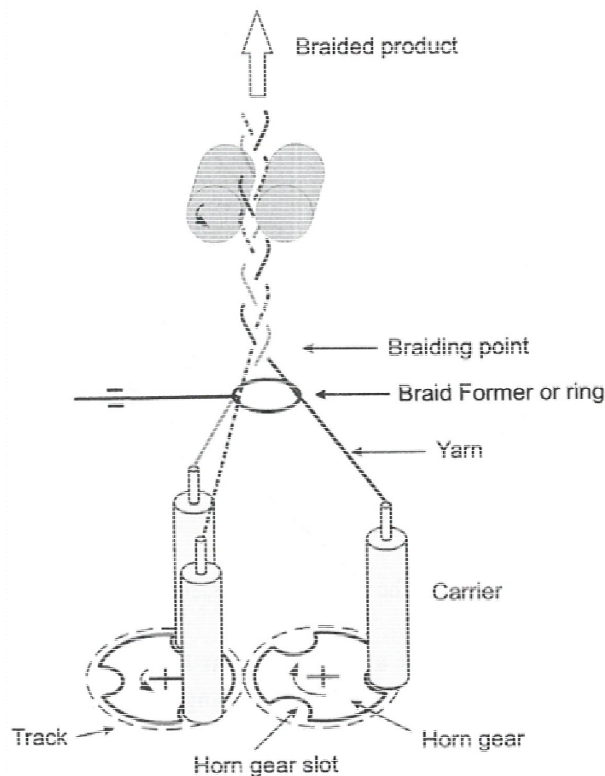


Abb. 9: Verseilprinzip für Einfachgeflechte [Kyo15]

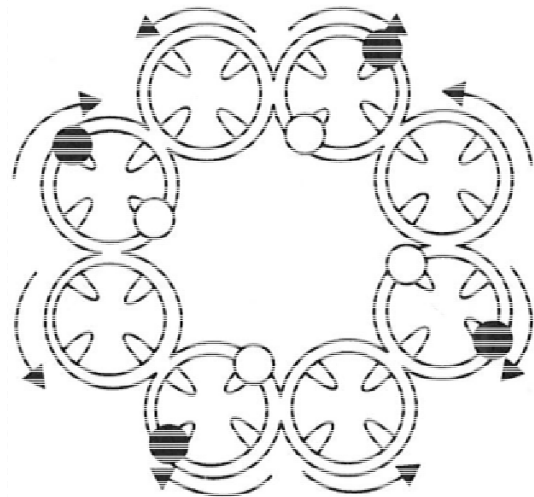


Abb. 10: Verseilprinzip Einfachgeflecht in der Draufsicht [McK04]

Bei diesem Prozess bleibt im Seilinnern ein Loch (Abb. 11), das beim Belasten des Seiles zusammenfällt. Die Spulenzahl muss immer ganzzahlig sein, im Allgemeinen werden 8-, 12-, 16- und 24-litzige Konstruktionen verwendet [McK04]. Beim 8-litzigen Einfachgeflecht laufen die Spulen einzeln und nicht in Paaren wie bei einem geflochtenen 8-litzigen Faserseil. Eine Variante bei der Produktion ist die Verseilung von 24 Spulen auf 12 Spulenträgern. Damit können rundere Seile hergestellt werden, deren kleinere Litzenkuppen die Abrasion besser verteilen.

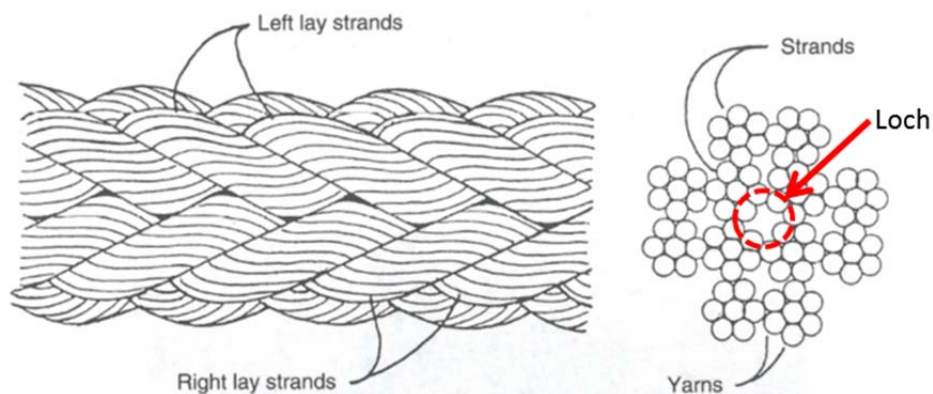


Abb. 11: 12-litziges Einfachgeflecht [McK04]

Doppelgeflechte weisen einen zweilagigen Aufbau auf (Abb. 12), wobei beide Lagen lasttragend sind. Der Kern wird mit einer langen Schlaglänge ausgeführt, um eine gute Zugkraftübertragung bei geringer Dehnung zu erreichen [McK04]. Als Werkstoff werden meist niedrmodulare Fasern verwendet, da bei hochmodularen Werkstoffen nicht sichergestellt werden kann, dass die Last gleichmäßig auf die beiden Lagen verteilt wird.

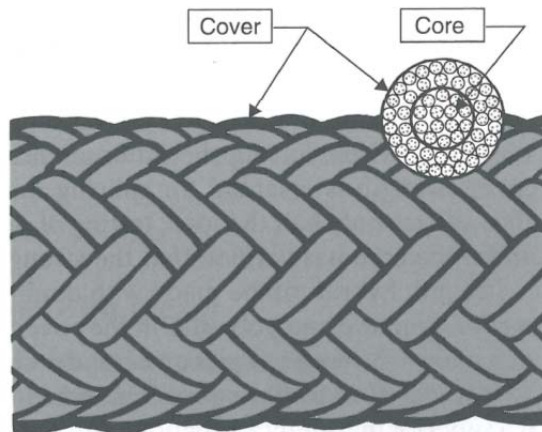


Abb. 12: Doppelgeflecht [McK04]

Geschlagene Konstruktion

Geschlagene Seilkonstruktionen (Abb. 13) werden im Technischen Bereich vor allem als Festmacherleinen im Schiffsbereich eingesetzt. Als laufende Seile eignen Sie sich aufgrund ihres Eigendrehmomentes und der niedrigen erzielbaren Bruchlasten nicht. Ihr Vorteil liegt in ihrem einfachen Aufbau und ihrer einfachen Herstellung, wobei auch die gute Spleißbarkeit zu nennen ist [McK04].

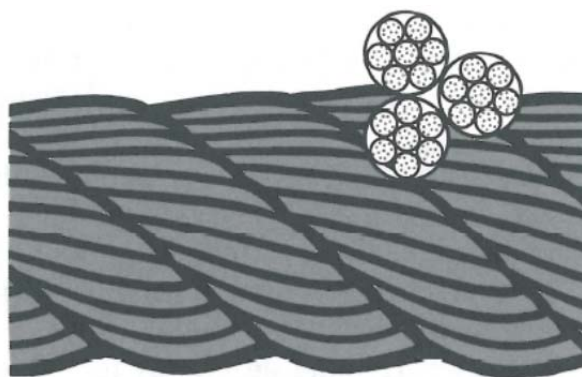


Abb. 13: Faserseil in geschlagene Konstruktion mit drei Litzen [McK04]

Geschlagene Faserseile werden meist aus drei Litzen hergestellt, selten werden aber auch Seile mit 4 und 6-litzigem Aufbau angeboten, wobei bei letzterer Ausführung die 6 Litzen um eine Kernlitze verseilt werden [McK04]. Beim Verseilen der Litzen zum Seil wird eine

zusätzliche Verdrehung eingebracht, um eine kompakte und stabile Seilstruktur zu erhalten. Da hochmodulare Fasern empfindlich gegenüber Verdrehung sind, werden diese Fasern nur in Seilen mit großer Schlaglänge eingesetzt, wie zum Beispiel bei sogenannten Subropes⁹, die als Parallellitenseil, siehe unten, in Mooring-Lines verwendet werden [McK04]. Die große Schlaglänge bewirkt weiterhin eine gute Verteilung der Last.

Gelegte Konstruktion

Gelegte Konstruktionen sind in ihrem Aufbau mit Drahtseilen vergleichbar (Abb. 14), im Englischsprachigen Raum werden sie daher auch als Wire Rope Construction bezeichnet. Die einzelnen Fasern werden zu Litzen verseilt, die wiederum zu einem ein- oder mehrlagigen Seil verseilt werden. Es gibt sowohl nichtdrehungsfreie Seile, 6-litzige und 8-litzige, als auch drehungsarme, 18-litzige, bzw. drehungsfreie, 36-litzige, Seile [McK04]. Wie bei einem drehungsfreien Drahtseil wird die äußere dritte Litzenlage bei den drehungsfreien Faserseilen in entgegengesetzter Richtung geschlagen wie die beiden inneren Lagen. Dadurch kommt es zu einem Ausgleich des Drehmomentes der einzelnen Lagen. Neben der Drehmomentfreiheit sind die guten Biege- und Zugschwebeleigenschaften aufgrund der flexiblen Konstruktion zu nennen. Gelegte Seilkonstruktionen werden immer mit einem Mantel hergestellt, der einen Schutz vor Abrasion und eine Unterstützung der Seilstruktur bewirkt.

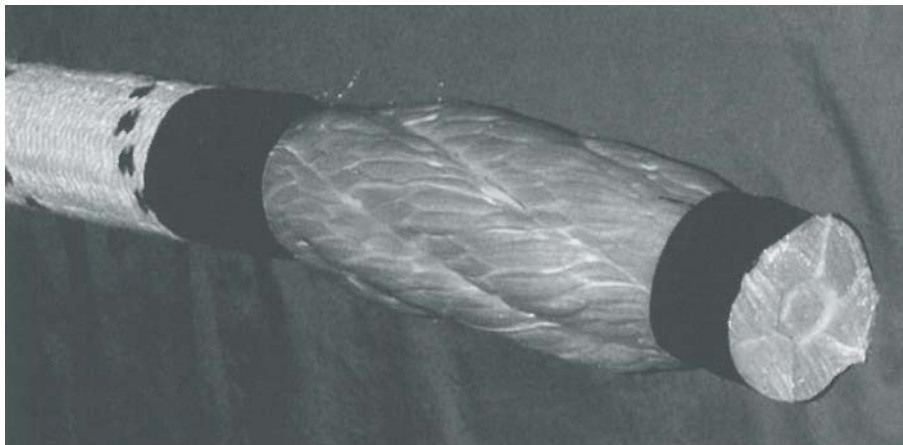


Abb. 14: Faserseil in gelegter Konstruktion [McK04]

Parallel-Konstruktionen

Para- oder auch Parallelkonstruktionen sind aus parallel gelegten Litzenbündeln, Parallellitenseil (Abb. 15), oder parallel gelegten Faserbündeln, Parallelfaserseil (Abb. 16), aufgebaut.

⁹ Für das Festmachen von Erdöl- oder Gasplattformen in großen Tiefen, müssten Seile eingesetzt, die einen großen Durchmesser aufweisen der nicht herstellbar ist. Daher werden kleinere Seile hergestellt, die zusammengefügt werden und mit einem Mantel umschlossen sind.

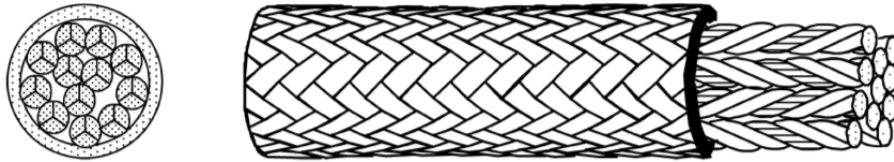


Abb. 15.: Aufbau eines Parallellitenseiles [DIN10-1]

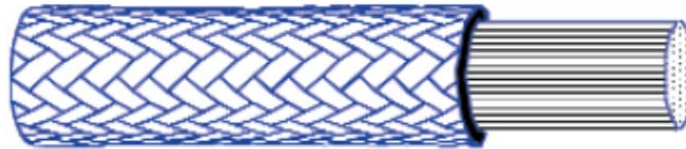


Abb. 16: Aufbau eines Parallelfaserseils [Bex04]

Beim Parallellitenseil ist eine Hälfte der Litzen rechtsgeschlagen, die andere Hälfte linksgeschlagen, um eine drehmomentfreie Konstruktion zu erreichen. Beide Konstruktionsarten werden mit einem Mantel hergestellt, der Schutz vor Abrasion bewirkt und die Seilstruktur stabilisiert. Faserseile in Parallelkonstruktion werden nur als Stehende Seile, d.h. als Abspannseile oder Mooring Lines, zum Beispiel bei Ölförderplattformen, eingesetzt.

Seilmantel

Faserseile werden sowohl mit Mantel, als Kern-Mantel-Konstruktion bezeichnet, als auch ohne Mantel hergestellt (Abb. 17 und Abb. 18).



Abb. 17: Prinzipskizze einer Kern-Mantel-Konstruktion [Geo14]



Abb. 18: Geflochtenes Faserseil mit Mantel

Der Mantel ist hierbei im Allgemeinen geflochten ausgeführt. Als Mantelmaterialien können sowohl hochmodulare Faserwerkstoffe, HMPE und LCP, als auch niederfeste Faserwerkstoffe, meist Polyester, verwendet werden, wobei Polyester die mit Abstand häufigste Verwendung findet (Abb. 19). Der Mantel dient als Schutz des tragenden Kerns vor Abrasion. Durch die Trennung der lasttragenden Komponenten (Kern) von der schützenden Umhüllung (Mantel) können beide Komponenten spezifisch optimiert werden.

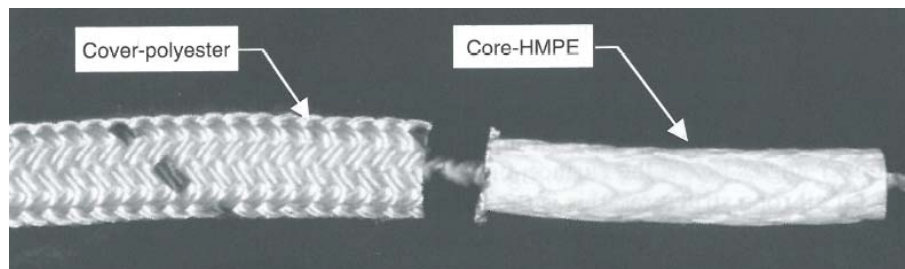


Abb. 19: Faserseil in geflochtener Konstruktion mit Mantel [McK04]

Der Mantel wird dabei möglichst eng auf den Kern aufgebracht, um eine Verschiebung des Mantels auf dem Kern, der sogenannten Kern-Mantel-Verschiebung, zu verhindern. Ausgeschlossen ist dies nicht immer, vor allem bei verschlissenen Faserseilen, die bereits länger im Einsatz sind. Dies kann dazu führen, dass es zu einem Aufstauen des Mantels vor, im Falle eines Kletterseiles, vor einem Karabiner oder, im Falle eines laufenden hochmodularen Faserseiles, vor einer Seilscheibe kommt. Um dies zu verhindern wurde von dem österreichischen Seilhersteller Teufelberger eine Technologie mit dem Markennamen Platinum entwickelt, bei der der Mantel mit dem Seilkern mit Verbindungsfäden verwoben wird (Abb. 20), wodurch eine Verbindung geschaffen wird, die die Kern-Mantel-Verschiebung verhindert [Teu12]. Weiterer Vorteil ist die laut Teufelberger höhere Querdruckstabilität, welche in Rillen verhindert, dass das Seil zu stark gepresst wird. Der Kletterausrüster Beal bietet unter dem Markennamen Unicore eine ähnliche Technologie für dessen Kletterseile an.



Abb. 20: Prinzipdarstellung der Platinum-Technologie von Teufelberger (Rot und Blau Verbindungsfäden) [Teu12]

Kretschmer hat darauf aufbauend Untersuchungen durchgeführt und dabei vor allem einen Vorschlag für eine Verseilmaschine erarbeitet, mit der ein solches Seil in Verbindung mit einem dreiflechtigen Mantel hergestellt werden kann [Kre16]. Mit den auf dieser neuen Verseilmaschine hergestellten Faserseilmustern wurden verschiedenste Prüfungen

durchgeführt, um die Seilkonstruktion im Vergleich zu einer herkömmlichen Seilkonstruktion ohne Kern-Mantel-Verbindung zu prüfen. Dabei konnten von Kretschmer keine signifikanten Vorteile der Seilkonstruktion mit Kern-Mantel-Verbindung hinsichtlich der Seillebensdauer festgestellt werden.

1.1.3 Faserbeschichtung

Durch Aufbringung einer Beschichtung der Fasern können spezifische Eigenschaften in das Seil eingebracht werden, die eine Anpassung an die Umgebungsbedingungen erlauben [Mam09]. Zum Beispiel kann auf Aramidfasern eine Beschichtung aufgebracht werden, die eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen UV-Belastung zur Folge hat. Die Beschichtung kann direkt während der Faserherstellung nach dem Extrusionsprozess oder vor dem Verseilen auf die Fasern aufgebracht werden. Das Beschichten der Fasern ist ein sehr wichtiger Prozess bei der Seilherstellung und unterliegt dem Know-How des jeweiligen Seilherstellers. Dazu gehört nicht nur der Beschichtungsprozess selbst, sondern auch das Beschichtungsmittel. Beschichtungsmittel können als Basis Silikon, Parafinwachs oder Mineral- oder Pflanzenöl haben [McK04], [Kur11].

1.2 Anwendungen mit laufenden hochmodularen Faserseilen

Hochmodulare Faserseile werden wie bereits beschrieben vermehrt eingesetzt. Im Folgenden sollen exemplarisch die wichtigsten Beispiele vorgestellt werden.

Eine Forschergruppe des Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart hat in den letzten Jahren den Seilroboter IPAnema, ein Parallelkinematischer Roboter, entwickelt [Pot09]. Der Seilroboter besteht aus einem Quaderförmigen Rahmen, in dessen acht Ecken jeweils eine Hochleistungsseilwinde platziert ist, mit denen sehr hohen Beschleunigungen möglich sind. Auf den Seilwinden sind hochmodulare Faserseile, mit Durchmessern von derzeit 2 mm oder 6 mm, gewickelt, die in der Mitte des Arbeitsraumes an einem Manipulator befestigt sind (siehe Abb. 21). Die hochmodularen Faserseile bieten dabei eine geringe Eigenmasse bei guten Biegeewecheigenschaften.

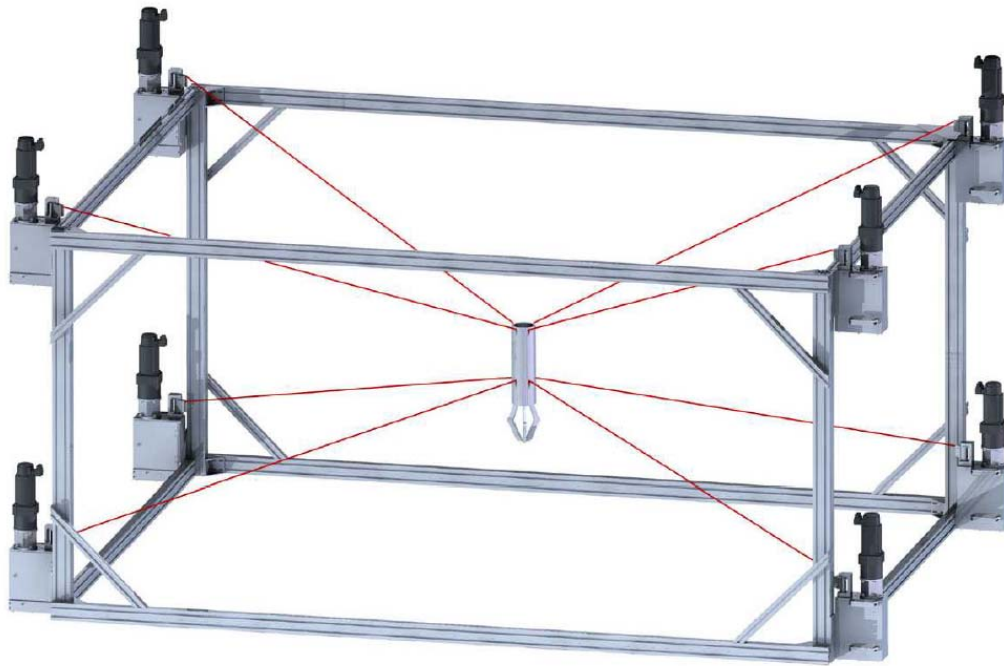


Abb. 21: Aufbau eines IPA-Seilroboters [Kue08]

Im Bereich der Mobilkrane gibt es derzeit zwei Kranhersteller die hochmodulare Faserseile einsetzen. Bereits 2014 wurde von dem amerikanischen Kranhersteller Manitowoc zusammen mit dem ebenfalls amerikanischen Seilhersteller Samson Ropes ein hochmodulares Faserseil mit der Bezeichnung K-100 auf den Markt gebracht (Abb. 22) [Sch16]. Das Faserseil besteht aus einem offenes 12er-Geflecht¹⁰ aus Dyneema mit einem Polyethylen-Kern zur Stabilisierung. Von dem deutschen Kranhersteller Liebherr und dem österreichischen Seilhersteller Teufelberger wurde 2016 ein hochmodulares Faserseil mit Bezeichnung soLite in Kern-Mantel-Konstruktion entwickelt (Abb. 23), von dem jedoch die genaue Kernkonstruktion und der Werkstoff nicht bekannt sind [Teu16]. Vorteile bieten sich für Mobil- und Raupenkrane vor allem in der geringen Eigenmasse, die zum einen das Transportgewicht auf der Straße verringert und zum anderen die Tragfähigkeit des Krans erhöht. Diese Erhöhung der Tragfähigkeit resultiert aus dem niedrigen Metergewicht, welches die Kranauslegerstruktur weniger belastet.

¹⁰ Als offenes Geflecht wird ein geflochtenes Faserseil ohne Mantel bezeichnet



Abb. 22: K-100 auf Maniowoc Kran [Sam16]



Abb. 23: soLite auf Liebherr Kran [Teu16]

Im Bereich der Offshore-Fördertechnik werden hochmodularen Faserseilen in laufenden Anwendungen bereits seit mehreren Jahren in einzelnen Anwendungen eingesetzt. Im Folgenden sollen drei Technologien vorgestellt werden, die verschiedene Ansätze verfolgen. Bei den sogenannten Offshore-Kranen sind im Unterschied zu landgestützten Kranen mit einer sogenannten Active-Heave-Compensation (AHC)¹¹ ausgestattet, die es erlaubt die Wellenbewegung und die dadurch erzeugte Auf und Ab Bewegung des Schiffes auszugleichen.

In 2006 wurde von ODIM SA (heute Rolls-Royce Marine) eine speziell für Faserseile entwickelte Spillwinde mit der Bezeichnung Cable Traction Control Unit (CTCU) [Tor10] an das Offshore-Dienstleistungs- und Bauunternehmen Subsea 7 geliefert [Off07-2], deren Spill nicht aus zwei Trommeln besteht, sondern aus mehreren gegenüberstehenden Reihen an einzeln angetriebenen Seilscheiben. Dies hat den Vorteil, dass der bei Trommelspillwinden auftretende Schlupf und die für hochmodulare Faserseile schädliche Abrasion verringert wird. Die CTCU wurde in das Gesamtsystem Fibre Rope Deployment System (FRDS) integriert, das als Modul auf einem Schiff eingesetzt werden kann (Abb. 24).

¹¹ In Heave Compensations werden heute vor allem Drahtseile eingesetzt



Abb. 24: FRDS von Rolls-Royce (Ziffer 4: CTCU) [Tor10]

Das eingesetzte Faserseil besteht aus einer geflochtenen 12x12 Konstruktion mit einem Fasergemisch aus HMPE (Spectra) und LCP (Vectran) **[Off07-2]**. Das System kann mit einem 88 mm Seil in einer Einzelstrang- oder auch in einer Zweistrangkfiguration, mit einer maximalen Tragfähigkeit von 125 Tonnen im Einzelstrang und respektive 250 Tonnen mit zwei Strängen eingesetzt werden. Die Zweiseilkonfiguration kann auch Unterwasser eingesetzt werden.

MacGregor hat 2016 eine sogenannte Retro Fit Lösung für ihre Offshore Kräne vorgestellt, bei der ein bestehender und bereits im Einsatz befindlicher Kran mit einem neuen Windensystem, dem FibreTrac1500, ausgestattet wird **[OEn16]**. Dieses Windensystem besteht aus einer Speicherwinde und einer neuartigen Spillwinde, die im Unterschied zu bisherigen Systemen nicht aus zwei Trommeln oder, wie bei oben vorgestellter CTCU, aus mehreren einzelnen Scheiben besteht, sondern aus einer Art umlaufenden Plattentrommel (Abb. 25).



Abb. 25: Spillwinde von MacGregor [Dry16]

Diese Platten bilden einen elliptischen Umfang auf dem das Seil läuft und mit dem die erforderliche Traktion aufgebracht wird. Durch die abwechselnde schräge Stellung der Platten werden quasi zwei Trommeln geformt auf denen das Seil läuft. Vorteile sind der kompakte Aufbau und, im Vergleich zu einer Trommellösung, die Reduzierung des Schlupfes. Die maximale Tragfähigkeit beträgt 100 Tonnen, wobei zu beachten ist, dass mit einem Faserseilkran aufgrund des geringeren Eigengewichtes im Vergleich zu einem Drahtseil eine höhere Last tiefer abgelassen bzw. gehoben werden kann. MacGregor gibt an, dass der FibreTrac 1500 mit 100 Tonnen Tragfähigkeit in 3000 Metern Tiefe vergleichbar ist mit einem Standardkran mit Drahtseil der eine Tragfähigkeit von 200 Tonnen aufweist.

2015 wurde von DSM, DeepTek und Lankhorst eine Kooperation eingegangen, deren Produkt und Dienstleistung von den Partner unter dem Namen „Soft Rope Systems“ vermarktet wird [Boe15]. Das System besteht aus einer Winde mit einem sogenannten Chevron-Rillensystem¹², bei dem, ähnlich einer Garnspule, die Rillen spiralförmig in einem sehr steilen Winkel zur Trommelachse stehen. Im Unterschied zu einer Systemrillung wie z.B. Lebus wird das Faserseil pro Umwicklung über mehrere darunterliegende Seilstränge geführt.

¹² Auch Non-Parallel Spooling genannt

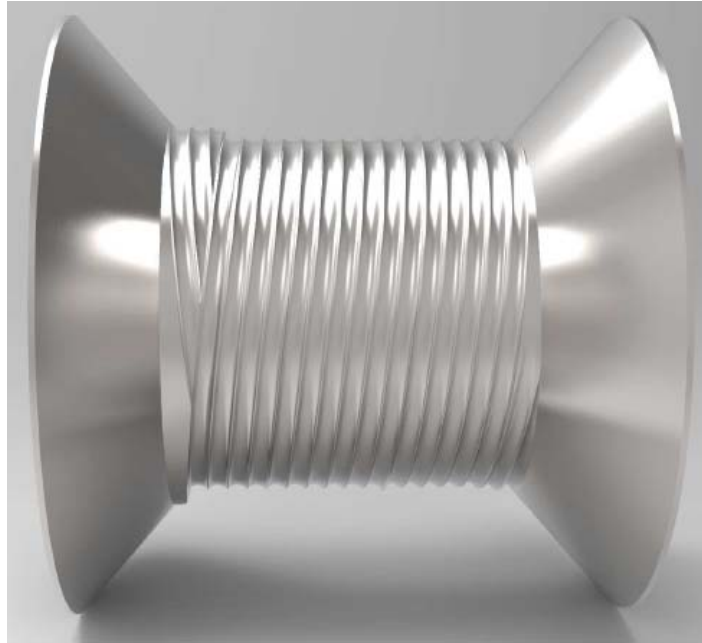


Abb. 26: Chevron-Winde Soft Rope Systems [Boe15]

Dies führt zu einer Vielzahl an Kreuzungspunkte und somit zu einer stabilen Wickelpyramide mit dem Nachteil, dass an diesen Kreuzungspunkten eine erhöhte Pressung auftritt, die das Seil schädigen kann. Das hochmodulare Faserseil wird ohne Spillwinde aufgespult und ist somit sehr kompakt. Es wird ein geflochtenes 76 mm Seil aus Dyneema DM20 XBO eingesetzt [Lan15], was ergibt eine Tragfähigkeit von 110 Tonnen ergibt.

Im Bereich der Aufzugstechnik wurde bereits 2003 von ThyssenKrupp ein Maschinenraumloser Aufzug mit einem hochmodularen Faserseil in den Vereinigten Staaten auf den Markt gebracht [Pat03]. Die Konstruktion der Faserseile, Markenname KCore, war eine Kern-Mantel-Konstruktion mit einem Mantel aus Nomex und einem Kern aus Kevlar, wobei die Kernlitze in einem nicht näher definierten Schmiermittel getränkt war. Es waren mehrere hundert Aufzüge mit dem System ausgeliefert worden. Der Einsatz dieser hochmodularen Faserseile wurde nach mindestens einem nicht näher beschriebenen Unfall gestoppt.

In Deutschland wird derzeit ein Aufzug mit hochmodularen Faserseilen als Tragmittel [Lif14] in einer Kooperation zwischen dem Aufzugshersteller Brobeil und der TU Chemnitz [Hei14] erprobt. Das Faserseil wurde speziell von der TU Chemnitz entwickelt und hergestellt und besteht aus einem geflochtenen 6 mm Technora-Kern, in einem Wachsschmiermittel mit PTFE-Anteil getränkt, und einem stützenden Mantel welcher wiederum mit einem PUR-Mantel umgeben ist. Der PUR-Mantel dient dazu, die für Aufzugsanlagen nötige Treibfähigkeit zu erreichen.

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Die in dieser Arbeit bearbeitete Problemstellung umfasst folgende zwei Punkte:

1. Die Ermittlung der Lebensdauer von hochmodularen Faserseilen beim Lauf über Scheiben
2. Das Aufzeigen von Ansätzen, wie ein Seiltrieb für den Einsatz von hochmodularen Faserseilen gestaltet werden sollte

Im Folgenden sollen die einzelnen Punkte näher erläutert werden.

Zu 1.: Aufgrund der zu erwartenden höheren Seillebensdauer und anderer Vorteile, wie zum Beispiel das geringere Gewicht und das Fehlen von Schmiermittel, sind sowohl die Hersteller wie auch die Anwender von Hebezeugen, wie zum Beispiel Mobilkrane oder Regalbediengeräte, daran interessiert hochmodulare Faserseile einzusetzen **[Sme12]**. Um diese hochmodularen Faserseile sicher und wirtschaftlich einsetzen zu können, ist es notwendig die Lebensdauer der Faserseile beim Lauf über Scheiben zu kennen und die Ablegereife, des Zeitpunktes, an dem das Seil aufgrund von innerem Verschleiß oder äußerer Beschädigung ausgetauscht werden muss, sicher zu erkennen. Die sichere Erkennung der Ablegereife ist vor allem ein sicherheitstechnisch relevantes Thema, da zum Beispiel bei Nichterkennen im Falle von Kränen Lastabstürze aufgrund von Seilbrüchen die Folge sein können. Neben der sicherheitstechnischen Relevanz, haben die Erkennung der Ablegereife und die Kenntnis der wahrscheinlichen Seillebensdauer wirtschaftliche Gründe. So können zum Beispiel bei Prozesskranen und bei Regalbediengeräten vor allem die regelmäßigen Prüfintervalle festgelegt werden und der rechtzeitige Seiltausch bei den regulären Servicearbeiten eingeplant werden und somit ungeplante Stillstandzeiten vermieden werden. In den Kapiteln 2, 4 und 5 wird näher auf diese Problemstellung eingegangen.

Zu 2.: Seiltriebe für hochmodulare Faserseile können und sollten im Vergleich mit Drahtseilen in spezifischen Bereichen einen anderen Aufbau aufweisen **[Ern10]**. Diese Bereiche umfassen die Gestaltung der Seilscheibenrillen, die Seilscheibendurchmesser, die Seilführung, die Seilendverbindung und die Gestaltung von Seiltrommeln. Die Potentiale umfassen dabei die Erhöhung der Seillebensdauer, zum Beispiel durch eine neuartige Spulvorrichtung, oder den Gewinn von Bauraum. In den Kapiteln 2, 3 und 6 wird näher auf diese Problemstellung eingegangen.

1.4 Vorgehensweise

In Kapitel 2 wird der aktuelle Stand der Forschung für das bearbeitete Themengebiet dargelegt.

In Kapitel 3 werden die lebensdauerbeeinflussenden Faktoren für laufende hochmodulare Faserseile betrachtet.

In Kapitel 4 werden vom Autor durchgeführte experimentelle Arbeiten vorgestellt.

In Kapitel 5 wird eine neuartige Methode zur Lebensdauerabschätzung laufender hochmodularer Faserseile vorgestellt. Mit dieser Methode soll es erstmals möglich sein, mit einer geringen Anzahl an Biegeversuchen gute Prognosen hinsichtlich der Lebensdauer zu erzielen. Weiter wird die praktische Anwendung der hergeleiteten Gleichung besprochen.

In Kapitel 6 werden Gestaltungsrichtlinien vorgestellt, wie ein Seiltrieb für hochmodulare Faserseile aufgebaut werden sollte, um alle Potentiale derselben zu erschließen. Dazu gehört auch eine neuartige Spulvorrichtung für hochmodulare Faserseile. Mit dieser ist es möglich, verdrehte Seile derart auf eine Rillenflanke, einer Seilscheibe oder einer Seiltrommel, oder einen benachbarten Seilstrang zu führen, so dass das verdrehte Faserseil in einen gerichteten Zustand überführt wird.

In Kapitel 7 werden eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick gegeben.

2. Stand der Forschung

Bei der durchgeführten Literaturrecherche konnte festgestellt werden, dass in der Vergangenheit bei den stehenden Faserseile im Bereich der sogenannten Mooring-Lines, vor allem niederfeste Faserseile, eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt wurden [McK04], [Bee90], [Bex04], [Him57], [Ern06], [Sha04], [Bit80], [Cra83], [Rie86], [Shi94], [Bos96], [Dav06] [Sha76], bei den allgemeinen Anwendungen jedoch weiter eher ein Mangel an Forschung, besonders hinsichtlich der Ablegereifeerkennung und der Bestimmung der Seillebensdauer, vorherrscht. Im Bereich der laufenden Seile wurden teils nur rudimentäre Untersuchungen [McK04], [Tor10], [Sme12], [Ern10], [Hei11], [Hei13], [Dav11], [Hob91], [Vog98], [Fey91], [Vog02-1], [Nut10], [Gru12], [Abr13], [Ger15], [Hei14], [Hei12], [Nov14] durchgeführt, weshalb ein erheblicher Forschungsbedarf besteht.

2.1 Allgemeine Untersuchungen zu Faserseilen

Von ersten umfangreichen Untersuchungen zu Faserseilen berichtete bereits 1957 Himmelfarb [Him57], wobei der Schwerpunkt auf Naturfasern, wie Manila und Hanf, lag und niedermodulare Kunstfasern, wie Polyamid und Polyethylen, nur rudimentär behandelt wurden.

2.1.1 Stehende Seile

Mit der steigenden Verfügbarkeit von Kunstfasern, sowohl der niedermodularen als auch der hochmodularen, gewann deren Verwendung in technischen Anwendungen an Bedeutung. In der Folge wurde eine Vielzahl an Untersuchungen durchgeführt, die die Verwendbarkeit vor allem im Bereich der Schifffahrt zum Hintergrund hatten. Besonders der Einsatz als Mooring-Line war und ist hierbei von großem Interesse. Mooring-Lines sind hierbei Tragelemente, die als Abspannung für eine Offshore-Plattform oder ähnlichem dienen [Ern06]. Als Tragelemente kommen heutzutage neben Faserseilen auch Ketten und Drahtseile zum Einsatz. Eine Mooring-Line kann hierbei im Ganzen aus einem Tragelement aufgebaut sein oder die Mooring-Line besteht aus der Kombination mehrerer Tragelemente, man spricht in diesem Fall von einer Multi-Component Mooring-Line. Auf diese Weise kann entsprechend der Gegebenheiten das passende Tragelement eingesetzt werden. So werden zum Beispiel an der Plattform selbst drehungsfreie Drahtseile eingesetzt, da hier in der Regel eine Möglichkeit, zum Beispiel eine Seiltrommel, zum Ausgeben und Einholen der Mooring-Line vorgesehen werden muss, um die Plattform auf Position halten zu können. Auf der freien Strecke können Faserseile eingesetzt werden, die nur auf Zug-Schwellbelastung beansprucht werden und ein geringes Metergewicht aufweisen. Am Meeresgrund können Ketten eingesetzt werden, die besonders widerstandsfähig gegen Verschleiß, hervorgerufen zum Beispiel durch Bewegung auf felsigem Grund, sind. Prinzipiell ist jede Kombination anwendbar. In Abb. 27 ist beispielhaft

eine Multi-Component Mooring-Line abgebildet, die an beiden Enden aus Drahtseilen und in der Mitte aus mehreren Polyester-Faserseilen aufgebaut ist.

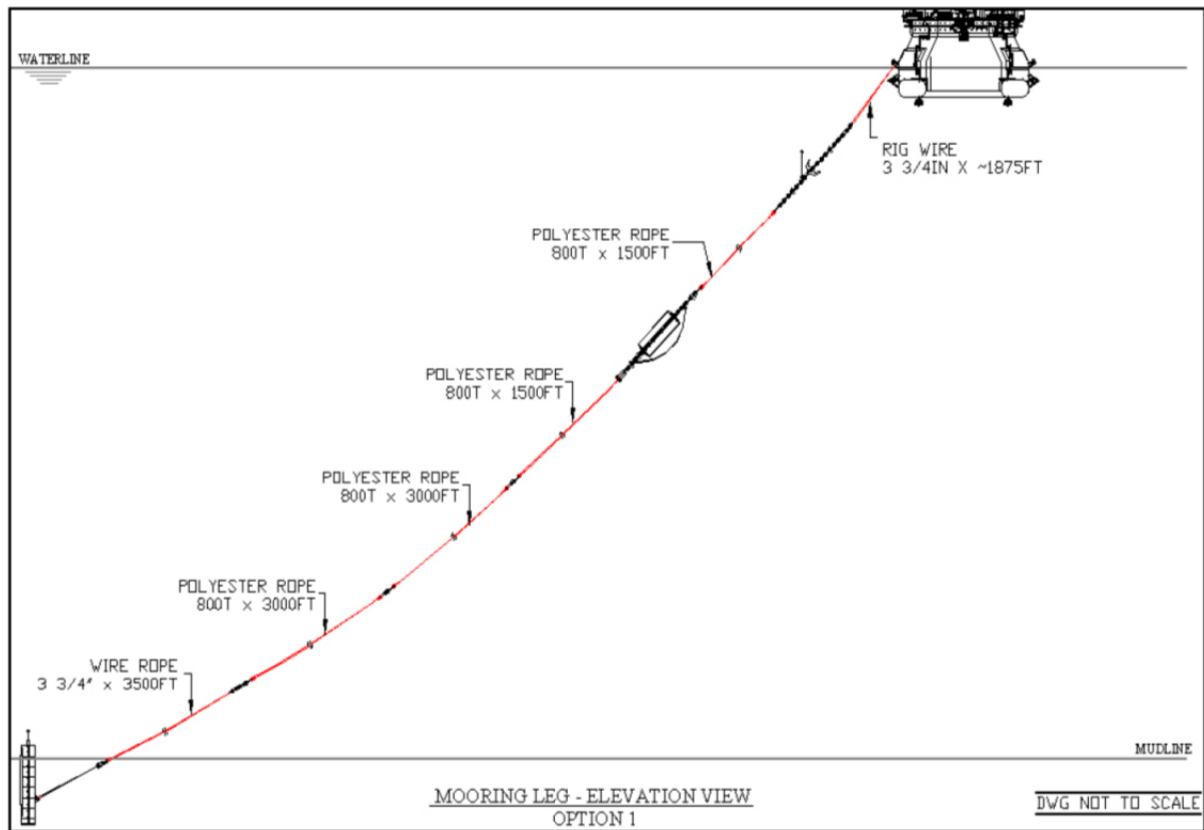


Abb. 27: Beispiel für den Aufbau einer Multi-Component Mooring Line aus Drahtseil und Faserseil [Sha04]

Die an Mooring-Lines, sowohl solche die nur aus Faserseilen bestehen als auch Multi-Component Mooring-Lines mit Teilen aus Faserseilen, durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich hierbei vor allem auf die Zugschwellbeanspruchung der eingesetzten Faserseile [Bit80], [Cra83], [Rie86] und die dabei auftretenden Problemfelder Kriechneigung [Shi94] und Erwärmung im Seilinneren [Bos96]. Daneben wurden auch Untersuchungen zum Zusammenwirken der Einzelkomponenten, Drahtseil und Faserseil, bei Multi-Component Mooring-Lines unter Zugbeanspruchung durchgeführt, da es hierbei aufgrund unterschiedlicher Drehmomente und -steifigkeiten zu einer Lebensdauerreduzierung kommen kann [Dav06]. Neben Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Faserseilen und Drahtseilen oder Ketten wurden die Vor- und Nachteile von Faser- und Drahtseilen in maritimen Anwendungen untersucht [Sha76].

2.1.2 Faserwerkstoffe und -brüche

Die bisher geleistete Forschungsarbeit gliedert sich in die Bereiche der Eigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe [Hop97], [Shi94], [Pig79], [Der09] und [Mam12] und in die

Beschichtungs-/ Coatingtechnologie **[Mam09]**. Daneben gibt es erste Ansätze zur Beurteilung gerissener Fasern und Seile **[Rie86]**, **[Hea98]**, **[Sch14-2]**, **[Wol15]**, **[Wen16]**.

Hoppe **[Hop97]** berichtet über Möglichkeiten der Steigerung der Lebensdauer unter Zugschwellbeanspruchung und Biegebeanspruchung bei Verwendung höherwertiger HMPE-Fasern. Dazu verglich er Faserseile aus Dyneema SK 60 und SK 75. Bei Biegebeanspruchung führt die Verwendung des höherwertigen Dyneema SK 75 zu einer signifikanten Steigerung der Seillebensdauer.

Shin **[Shi94]** berichtet von Zug- und Kriechversuchen mit verschiedenen Faserwerkstoffen, sowohl nieder- als auch hochmodular. Der Hauptfokus der Zugversuche lag in der Ermittlung der spezifischen Dehnungen der einzelnen Faserwerkstoffe. Für die hochmodularen Faserseile aus LCP (Vectran) und HMPE (Tekmilon) wurden bei einer Seilzugkraft von 70 % der Bruchkraft Dehnungswerte von etwa 2,8 % bzw. 4,7 % ermittelt. Bei den Kriechversuchen wurden die Faserseile aus LCP und HMPE unter verschiedenen Zugkräften getestet, so dass eine Vergleichbarkeit nicht gewährleistet ist.

Pigliacampi **[Pig79]** berichtet von Versuchen an Faserseilen aus Aramid, wobei der Fokus auf den Dehnungseigenschaften lag.

Derombise **[Der09]** führte Untersuchungen an Aramidfasern hinsichtlich der chemischen Beständigkeit durch. Die Fasern wurden in Natriumcarbonatsalzlösung bei pH9 und pH11 und in entionisiertem Wasser bei vier verschiedenen Temperaturen eingelegt. Mit den Proben wurden spektroskopische Untersuchungen, Viskositätsversuche, Thermogravimetrische Analysen, Dichtemessungen, Untersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop und Zugversuche durchgeführt. Bei den Zugversuchen konnte keine signifikante Veränderung der Festigkeiten festgestellt werden. Dies gilt ebenso für den gemessenen E-Modul der Fasern.

Mammitzsch **[Mam12]** untersuchte die Witterungsbeständigkeit von hochmodularen Faserseilen aus HMPE, Aramid und LCP in geflochtener Konstruktion ohne Mantel in Anlehnung an DIN EN 12224 **[DIN00]** mit Seilen, die einen Durchmesser von 6 mm hatten. Die Seilmuster wurden sowohl ungereinigt als auch gereinigt, das heißt von Schlichte befreit, geprüft. Es wurden Zerreißversuche sowohl im Anlieferungszustand als auch mit UV-Strahlungsenergien von 50 und 100 MJ/m² durchgeführt. Die Bruchkraft der Seilmuster aus HMPE verringerte sich durch UV-Strahlung um mehr als 25 %, bei den Seilmustern aus Aramid und LCP verringerte sich die Bruchkraft nur leicht. Mammitzsch erklärt diese Erkenntnisse, die von bisherigen Auffassungen abweichen für die Seilmuster aus Dyneema

damit, dass der Hersteller von Dyneema die Firma DSM UV-Versuche nur mit Seilmustern mit größeren Seildurchmessern durchgeführt hat. Dabei gilt, dass je größer der Seildurchmesser ist desto weniger Faseranteil des Seilquerschnittes geschädigt wird. Für die Seilmuster aus Aramid gibt Mammitzsch an, dass die Laborversuche als nicht repräsentativ anzusehen sind. Die von Kuraray, dem Hersteller der LCP-Faser Vectran, durchgeführten UV-Versuche für LCP sind nach Ansicht von Mammitzsch nicht mit den von ihm durchgeführten Versuchen vergleichbar.

Im Bereich der Beschichtungs- und Coatingtechnologie wurden von Mammitzsch in **[Mam09]** vor allem die verschiedenen Beschichtungsverfahren und Beschichtungswerkstoffe untersucht.

Riewald **[Rie86]** analysierte verschiedene Mooring-Lines aus dem Faserwerkstoff Aramid, die vorzeitig versagten, nachdem diese vier bis sechs Wochen vor der Installation an der Plattform im Wasser treibend und nur am Meeresboden verankert waren. Als Gründe für dieses vorzeitige Versagen wurden mechanische Beanspruchungen identifiziert, die vor der Installation eingebracht wurden und Beschädigungen während der Installation. Die mechanischen Beanspruchungen umfassen dabei eine durch von außen eingebrachtes Drehmoment herbeigeführte Verdrehung und Knickung einzelner Fasern.

Hearle untersuchte unter einem Rasterelektronenmikroskop (REM) Faserfrakturen verschiedener Faserwerkstoffe **[Hea98]**. Der Fokus lag dabei auf in Zugversuchen gerissenen Fasern. Hearle stellte fest, dass hochmodulare Werkstoffe vor allem axiale Frakturen aufweisen (Abb. 28 und Abb. 29).

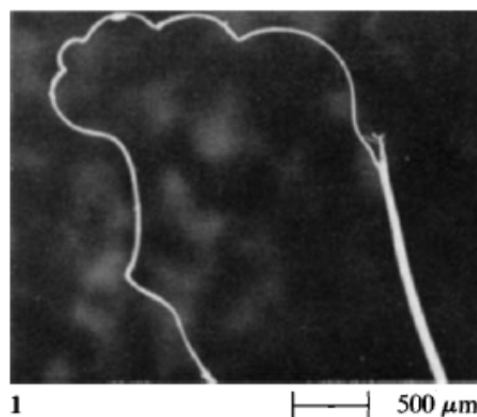


Abb. 28: Faserfraktur HMPE [Hea98]

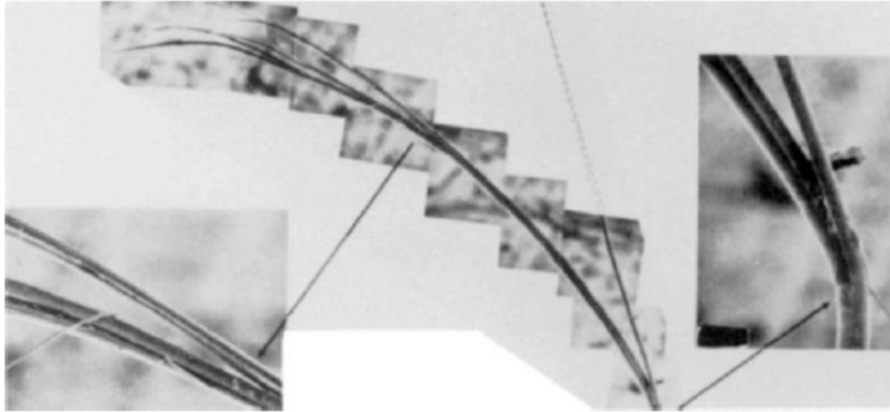


Abb. 29: Faserfraktur Aramid [Hea98]

Schmieder untersuchte in Biegeversuchen getestete hochmodulare Faserseile aus einem nicht näher beschriebenen Werkstoff, die von der Autorin selbst hergestellt wurden und mit verschiedenen Sensorfäden zur zerstörungsfreien Analyse ausgestattet wurden [Sch14-2]. Die Biegeversuche wurden auf einer sogenannten 5-Zonen-Biegemaschine [Ver11] geprüft, bei der das Seil über fünf hintereinander positionierten Seilscheiben während einer Fahrt läuft. Das Faserseil weist dabei fünf Zonen mit, bezogen auf die Biegewechselanzahl, unterschiedlichen Beanspruchungen von 100%, 80%, 60%, 40% und 20% auf, wobei die Beanspruchungsfolge in beide Richtungen gleich ist. Der Bruch sollte dabei in der Mitte in der 100%-Zone erfolgen. Die Sensorfäden umfassten unter anderem Sensoren zur Widerstandsmessung wie sie auch in [Fin11] angewendet wurden. Dabei konnte eine generelle Zunahme des Widerstandes über der Biegewechselzahl festgestellt werden. Schmieder hat des Weiteren sowohl die Bruchstelle analysiert, als auch die weiteren Zonen mit geringerer Biegewechselzahl um einen Schadensverlauf zu ermitteln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Zonen durch den auftretenden Rückschlag beim Seilbruch in der 100%-Zone eine Beeinflussung erfahren und die in diesen Zonen gemachten Beobachtungen dies berücksichtigen müssen. Bei diesen Untersuchungen wurden unter anderem Computertomografie-Aufnahmen angefertigt (Abb. 30 und Abb. 31), auf denen innerer Verschleiß festgestellt werden konnte.



Abb. 30: Computertomografie-Aufnahme eines Faserseiles [Sch14-2]

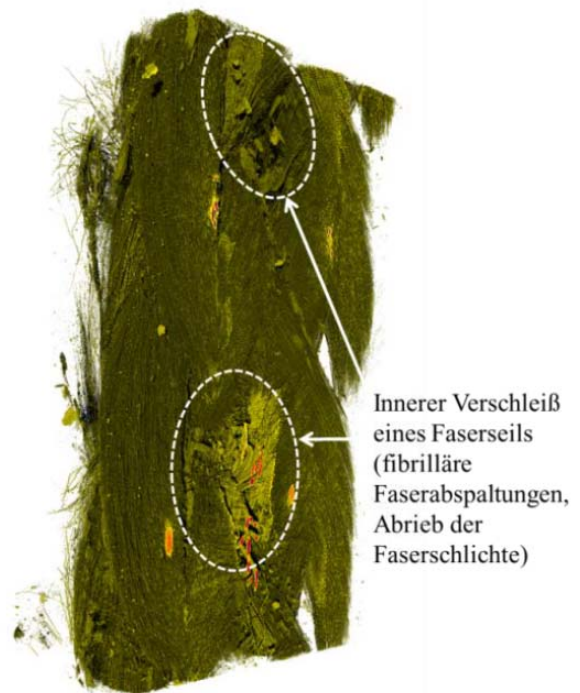


Abb. 31: Längsschnitt einer Computertomografie-Aufnahme [Sch14-2]

In einer vom Autor betreuten Bachelorarbeit von Wolf [Wol15] wurden hochmodulare Faserseile aus HMPE und LCP makroskopisch und mikroskopisch untersucht, die in Biegeversuchen am IFT bis zum Bruch getestet wurden. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich die Bruchbilder von HMPE von denen des LCP teils erheblich unterschieden (Abb. 32 und Abb. 33 exemplarisch). Das in Abb. 32 dargestellte Bruchende eines Faserseiles aus LCP zeigt kaum Ausfaserungen und kurze Faserbruchenden. Dem gegenübergestellt ist in Abb. 33 ein Bruchende eines Faserseiles aus HMPE das eher eine ausgefaserte Form und lange Faserbruchenden aufweist.

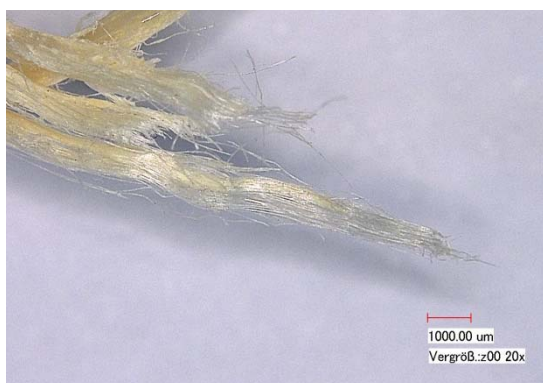


Abb. 32: Bruchende LCP (Gerades Bruchende) [Wol15]



Abb. 33: Bruchende HMPE (Einzelne lange Faserbruchenden) [Wol15]

In einer weiteren vom Autor betreuten Bachelorarbeit wurden, aufbauend auf den Ergebnissen von Wolf, von Weng Bruchenden von Litzen hergestellt [Wen16]. Dazu wurden Litzen aus HMPE und LCP in Zugversuchen, Zugschwellversuchen und Torsionsversuchen bis zum Bruch belastet und diese Bruchenden anschließend makroskopisch und mikroskopisch untersucht um Rückschlüsse auf die Versagensart machen zu können.

2.1.3 Seilendverbindungen für Faserseile

Die Verfügbarkeit einer zuverlässigen Endverbindung für Faserseile, die die Ausnutzung der vollen Bruchkraft des Seiles zulässt und dies wiederholbar, ist für den Einsatz hochmodularer Faserseile in industriellen Einsatzfeldern von herausragender Bedeutung.

In der Vergangenheit wurden als Seilendverbindungen vor allem Spleiße (Abb. 34) benutzt, die jedoch den Nachteil haben, dass für die Herstellung ein gewisse Vorkenntnis von Nöten ist. Weiterhin erlauben Spleiße nicht die volle Ausnutzung der Bruchkraft des Seiles, da der Spleiß einen Schwachpunkt aufgrund der Vielzahl an Überkreuzungsstellen darstellt. Im Zugversuch wird das Faserseil in den meisten Fällen nicht auf der freien Seilstrecke zwischen den Spleißen brechen, sondern im Spleiß selbst [McK04]. Hinsichtlich der Zugschwelleigenschaften sind Spleiße eher ungeeignet. Vor allem bei nahezu vollständiger Entlastung kann es zu einer Lockerung und Rutschen des Spleißes kommen. Spleiße für Faserseile sind in DIN 83319 genormt [DIN13-2].



Abb. 34: Augspleiß [Pau08]

Als Seilendverbindung für Faserseile können prinzipiell auch Kunststoffvergüsse in der gleichen Machart wie bei Drahtseilen verwendet werden. Wie bei den Drahtseilen wird auf der zu vergießenden Länge das Seil in die einzelnen Litzen und Fäden aufgelöst und in eine passende Gabel- oder Bügelseilhülse eingeschoben (siehe Abb. 35). Als Vergussmaterial wird Gießharz verwendet, wie zum Beispiel Socket Fast Blue [Phi13]. Kunststoffvergüsse erreichen insbesondere bei kleinen Seildurchmessern sehr gute Ergebnisse bei der erreichbaren Seilbruchkraft, jedoch verschlechtern sich die Ergebnisse bei größeren Seildurchmessern stark [McK04].



Abb. 35: Kunststoffverguss

Am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) wurde im Rahmen der DFG-Forscherguppe „Hybride Intelligente Konstruktions-Elemente“ (HIKE) eine neuartige Seilendverbindung für hochmodulare Faserseile (Abb. 36) entwickelt [Win15]. Diese als Verguss ausgeführte Seilendverbindung erlaubt es nicht nur bei kleinen Seildurchmessern sehr gute Ergebnisse im Zugversuch zu erreichen, sondern es können auch bei größeren Seildurchmessern¹³ Bruchkräfte von bis zu 90% der Mindestbruchlast des Seiles erreicht werden. Hinsichtlich der Zugschwelleigenschaften konnte nachgewiesen werden, dass diese nicht nur mit der entwickelten Endverbindung gut aufgenommen werden können, sondern es wurden in anschließenden Zerreißversuchen Bruchkräfte von 100%¹⁴ der vom Faserseilhersteller angegebenen Mindestbruchlast erreicht.



Abb. 36: HIKE-Endverbindung für ein 4 mm Faserseil [Win15]

¹³ Bei Seildurchmessern von 50 mm bis 96 mm

¹⁴ Bei Seildurchmessern von bis zu 26 mm

Weiterhin war es Ziel des Forschungsprojektes, Sensorik in das Faserseil und in die Endverbindung einzubringen. Als Sensorik kann dabei in die Endverbindung zum Beispiel ein Dehnmessstreifen eingebracht werden, der die angreifende Last detektiert und als Lastüberwachung dienen kann. In dieser Variante kann eine möglicherweise zu verbauende Lastmessachse eingespart werden und Bauraum besser ausgenutzt werden.

2.1.4 Drehmoment von Faserseilen

Zum Themenkomplex Drehmoment von Faserseilen, sowohl mit niedermolekularen als auch mit hochmolekularen Faserwerkstoffen, wurden in der Vergangenheit nahezu keine Untersuchungen durchgeführt. Das Drehmoment von Seilen bzw. deren Drehverhalten hat Einfluss auf die Seillebensdauer von laufenden Faserseilen, da durch Schrägzug eine Verdrehung induziert werden kann. Schrägzug tritt in Seiltrieben in zwei Fällen auf. Zum einen tritt Schrägzug zwischen der Seiltrommel und der ersten Seilscheibe auf, zum anderen tritt Schrägzug auf, wenn aufeinander folgende Seilscheiben nicht in einer Flucht liegen. Im Folgenden sollen sowohl die Arbeiten von Reimann [Rei14] und Ridge [Rid08] vorgestellt werden als auch eigene Untersuchungen des Autors.

Als Vergleich ist in Abb. 37 die Drehmomentkennlinie eines drehungsfreien Drahtseiles in 35x7-Konstruktion¹⁵ mit Durchmesser 12 mm abgebildet [Web13]. Im unverdrehten Zustand bei 0°/ 100d baut das Drahtseil bei der maximalen Zugkraft ein Drehmoment von ca. 16 Nm auf. Bei einer positiven Verdrehung von 180°/ 100d, das heißt, dass das Drahtseil um eine halbe Drehung auf das 100-fache des Seildurchmessers bezogen zuge dreht¹⁶ wird, entwickelt das Drahtseil ein Drehmoment von ca. 58 Nm bei der maximalen Zugkraft. Bei einer negativen Verdrehung von -180°/ 100d, das heißt das Seil wird aufgedreht¹¹, entwickelt das Seil ein Drehmoment von ca. -41 Nm bei der maximalen Zugkraft. Die Drehmomentkurve im unverdrehten Zustand weist einen konstanten Verlauf auf, die Kurven im verdrehten Zustand weisen jeweils Knicke in ihrem Verlauf auf. Diese sind darauf zurückzuführen, dass sich im verdrehten Zustand die Seilgeometrie ändert und ein unterschiedliches Tragverhalten in den einzelnen Litzenlagen vorherrscht. So tragen im aufgedrehten Zustand die inneren Lagen zu Beginn die Last. Wird die Zugkraft gesteigert beginnt die äußere aufgedrehte Lage mitzutragen und wirkt dem Drehmoment der inneren Lagen entgegen.

¹⁵ Diese Seilkonstruktion besteht aus drei Litzenlagen, die Litzenlagen 1 und 2 (vom Kern aus gezählt) sind dabei in eine andere Richtung geschlagen als die dritte äußerste Lage

¹⁶ Zu- bzw. Aufdrehen in Bezug auf die Außenlage

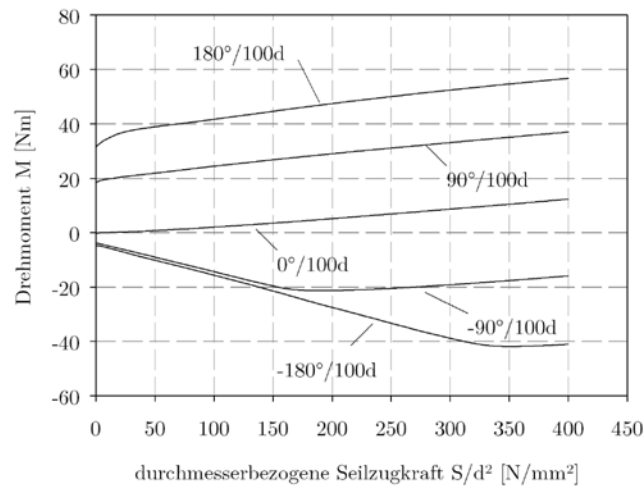


Abb. 37: Drehmomentkennlinie eines drehungsfreien Drahtseiles in 35x7 Konstruktion [Web13]

Reimann beschäftigte sich mit der Fragestellung welches Drehmoment in einem vorgespannten Faserseil aufgebaut wird [Rei14]. Hierzu wurden zwei verschiedene Seilkonstruktionen, gedreht und geflochten, mit einem Nenndurchmesser von 20 mm aus Dyneema untersucht. Das Prüfmuster wurde in eine Zugprüfmaschine eingebaut und mit einer Vorlast in drei Stufen (1000 N, 3500 N und 7000 N) beaufschlagt. An einem Ende wurden die Prüfmuster sowohl mathematisch negativ¹⁷ als auch positiv verdreht und mittels eines Drehmomentaufnehmers am gegenüberliegenden Ende das auftretende Drehmoment gemessen. Die sich ergebende Drehmomentkurve wurde über den Verdrehwinkel aufgetragen (Abb. 38). Es zeigte sich, dass mit größerer Vorspannkraft das Drehmoment ansteigt und dass sich ebenfalls mit ansteigender Vorspannkraft die Hysterese vergrößert.

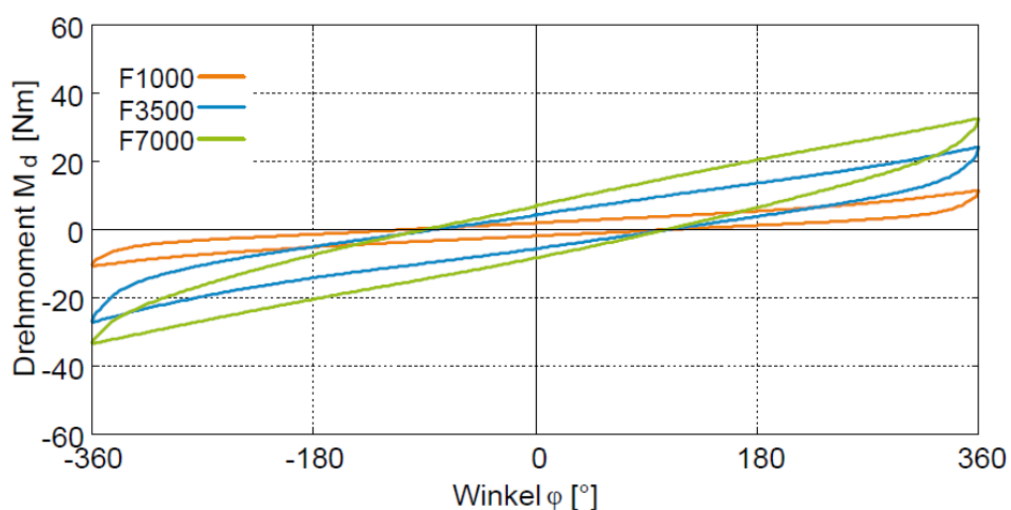


Abb. 38: Drehmomentkurve des geflochtenen Seilmusters [Rei14]

¹⁷ Mathematisch negativ ist eine Drehrichtung im Uhrzeigersinn, entsprechend ist mathematisch positiv gegen den Uhrzeigersinn

Ridge [Rid08] orientierte sich für ihre Drehmomentversuche an der Vorgehensweise nach Feyrer [Fey15]. Ein Faserseil in Parallellitzen-Machart¹⁸ mit einem Nenndurchmesser von 37,6 mm wurde in eine Zugprüfmaschine eingespannt, an deren einen Ende eine Drehmomentmesseinrichtung sich befindet und am gegenüberliegenden Ende eine Vorrichtung mit der das Prüfmuster definiert verdreht werden kann. Der Drehwinkel wird dabei auf eine Bezugslänge von 100x dem Seildurchmesser normiert. Das Seil wird zu Beginn der Prüfung im unverdrehten Zustand bis zu einer bestimmten Seilzugkraft belastet und die Drehmomentkurve aufgenommen, anschließend wird das Prüfmuster in definierten Winkelschritten abwechselnd auf- und zuge dreht. Mit der von Ridge verwendeten Methode nach Feyrer können nun für bestimmte Belastungen und Verdrehwinkel das wirkende Seildrehmoment ermittelt werden. Auch wenn bei der Konstruktion Parallel-Machart von einem drehmomentfreien Seil gesprochen wird, entwickelt das Seil im unverdrehten Zustand bei der maximalen Zugkraft ein Drehmoment von ca. 20 Nm. Im verdrehten Zustand entwickelt das von Ridge getestete Seil ein Drehmoment, deren Entstehung darauf zurückzuführen ist, dass aus dem Parallellitzen Faserseil ein Faserseil in gedrehter Konstruktion wird und die Litzen ein Eigendrehmoment aufbauen (siehe auch Kapitel 1.1.2).

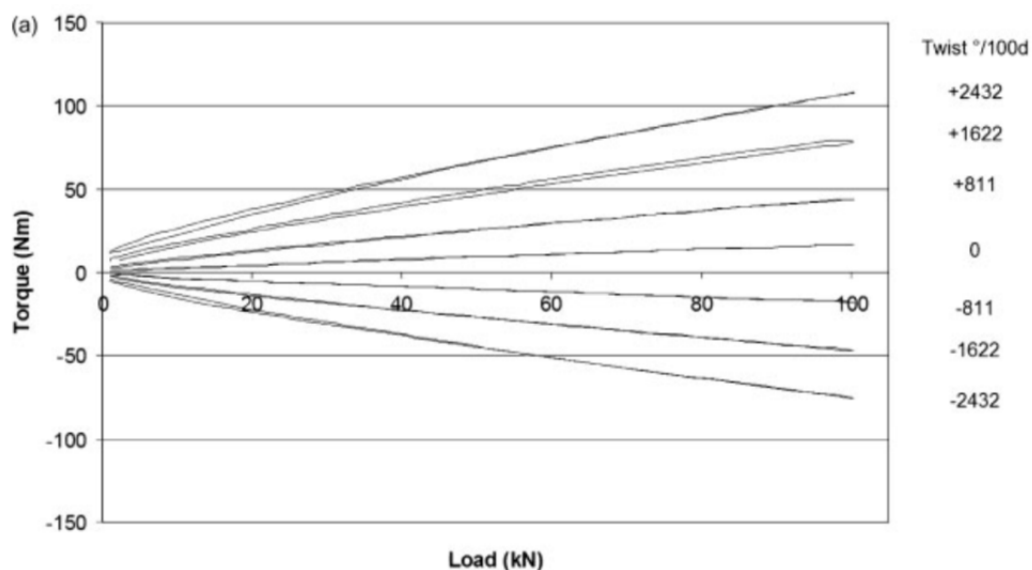


Abb. 39: Drehmomentkurve nach Ridge [Rid08]

Der Autor hat mit zwei Seilmustern aus dem in Kapitel 4 vorgestellten Forschungsprojekt Drehmomentenversuche nach der Methode von Feyrer [Fey15] durchgeführt. Es wurden Drehmomentversuche mit einem Seilmuster in geflochtener Konstruktion und einem Seilmuster in gelegter Konstruktion jeweils mit Mantel und dem Werkstoff Vectran durchgeführt. Die Versuche wurden mit Verdrehwinkel von 0° und $\pm 1080^\circ / 100d$ bis zu einer

¹⁸ Siehe Kapitel 1.1.2

Seilzugkraft von 30 kN (dies entspricht einem Sicherheitsfaktor von 2,1) durchgeführt (siehe Abb. 40 und Abb. 41). Im unverdrehten Zustand wurden 5 Schwellzyklen durchgeführt und im verdrehten Zustand 3 Schwellzyklen und jeweils der letzte Zyklus für die Auswertung herangezogen. Mit der Durchführung der Schwellzyklen soll sichergestellt werden, dass die Seilgeometrie nicht durch den Transport und das Einbauen des Seiles in die Prüfmaschine beeinflusst wird.

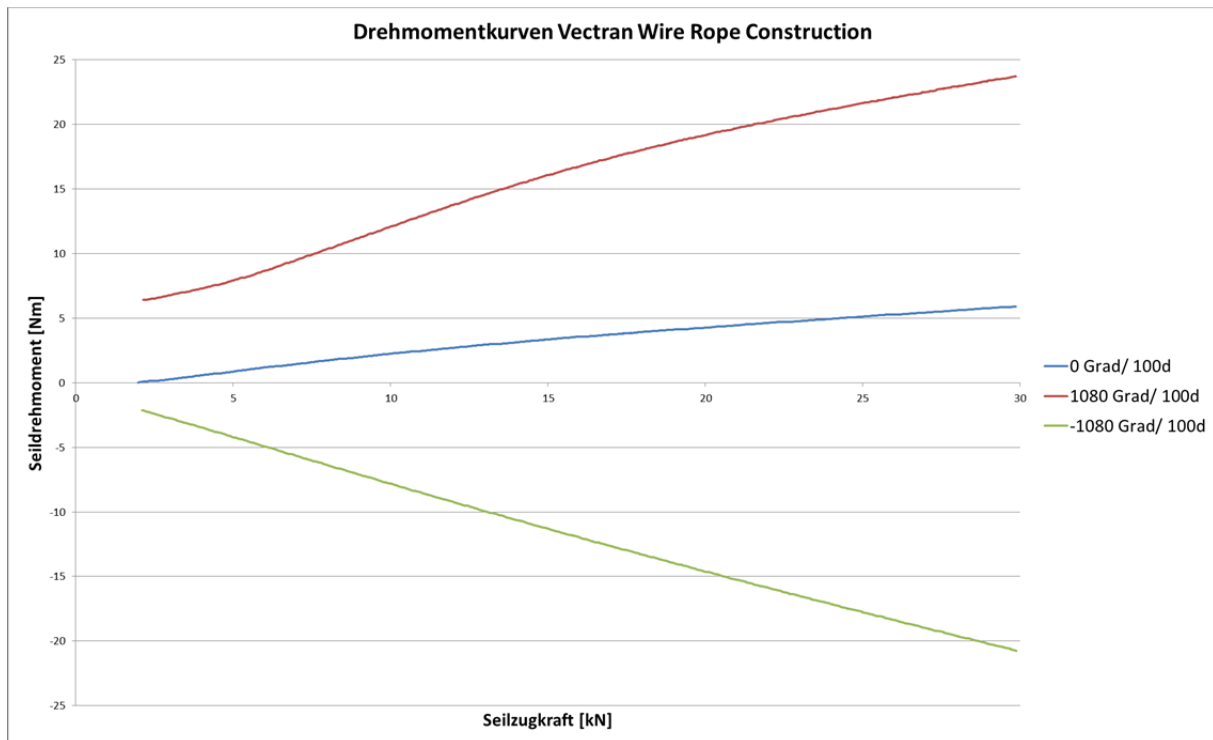


Abb. 40: Drehmomentkennlinie der gelegten Konstruktion

Das Faserseil in gelegter Konstruktion baut im unverdrehten Zustand bei der maximalen Zugkraft ein geringes Drehmoment von ca. 6 Nm auf, die Steigung der Kurve ist nicht konstant. Im aufgedrehten Zustand bei $-1080^\circ/100d$ ist die Kurve nahezu konstant und bei der maximalen Zugkraft wird ein Drehmoment von ca. -21 Nm erreicht. Im zuge drehten Zustand ist ein nichtkonstanter Anstieg der Drehmomentkurve ersichtlich. Es ist zu vermuten, dass sich durch das Zudrehen des Seiles der innere Seilaufbau derart verändert hat, dass die unterschiedlichen Lagen durch das Aufbringen der Seilzugkraft wieder in die richtige Position gebracht werden. Bei der maximalen Seilzugkraft entwickelt das Faserseil im zuge drehten Zustand ein Drehmoment von ca. 24 Nm. Im Vergleich zum vorher angesprochenen Drahtseil baut sich bei diesem Faserseil ein Seildrehmoment auf, das um ca. 2/3 geringer ist.

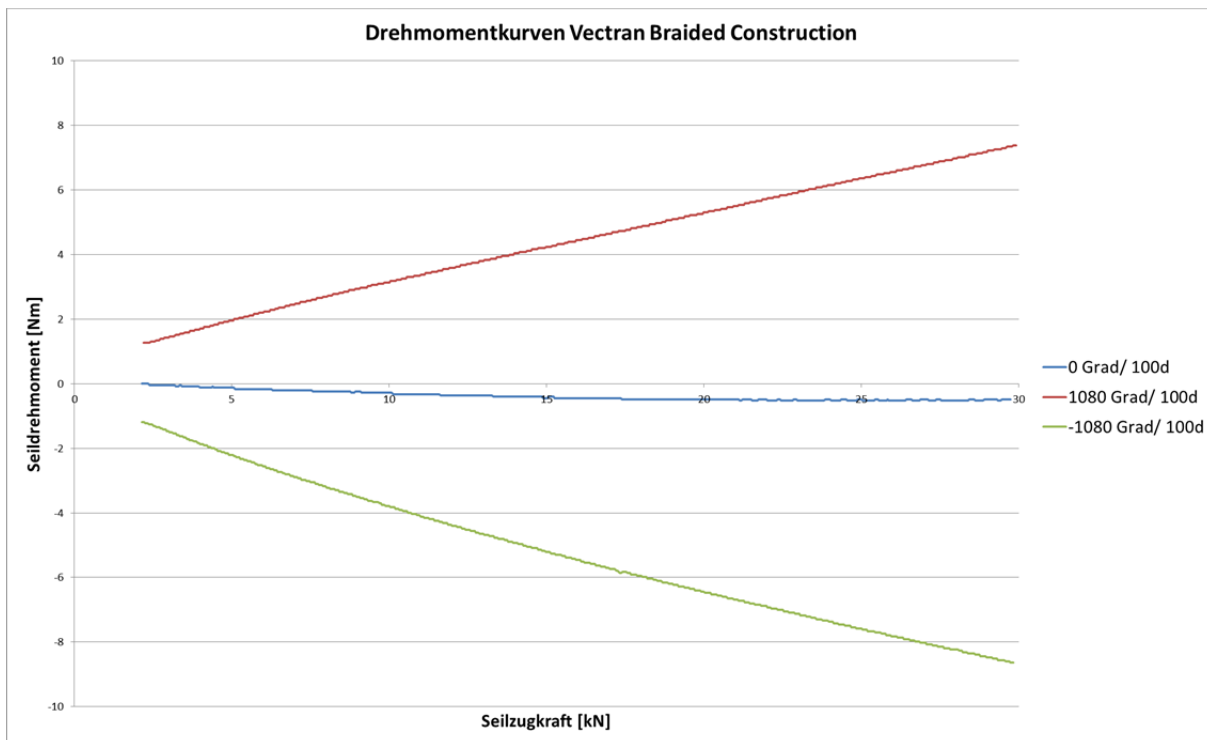


Abb. 41: Drehmomentkennlinie der geflochtenen Konstruktion

Die Drehmomentkurve des geflochtenen Faserseiles weist aufgrund des symmetrischen Aufbaus theoretisch kein Drehmoment im unverdrehten Zustand auf. Im durchgeführten Versuch tritt bei der maximalen Seilzugkraft ein Drehmoment von ca. -0,5 Nm auf, dieses Drehmoment ist auf Unregelmäßigkeiten beim Vergießen (nicht zentrischer Seilauslauf aus der Seilhülse) zurückzuführen. Da es aufgrund des symmetrischen Aufbaus bei der geflochtenen Konstruktion kein Auf- und Zudrehen des Seiles im eigentlichen Sinn gibt, wird als positive Drehrichtung die Verdrehung im Uhrzeigersinn und als negative Drehrichtung die Verdrehung gegen den Uhrzeigersinn angesehen. Im verdrehten Zustand wird im Unterschied zum unverdrehten Zustand ein Drehmoment generiert, das jedoch nicht den gleichen Betrag für die positive und die negative Verdrehrichtung aufweist. Im positiv verdrehten Zustand tritt bei der maximalen Zugkraft ein Drehmoment von ca. 7,5 Nm auf, im negativ verdrehten Zustand tritt ein Drehmoment von ca. -8,6 Nm auf. Die Drehmomente sind im Vergleich zum oben vorgestellten drehungsfreien Drahtseil und zum Faserseil in gelegter Konstruktion erheblich geringer.

Bei Drahtseilen werden für sogenannte drehungsfreie Seile Drallfänger, oder auch Wirbel, verwendet, die einen Aufbau von Verdrehung verhindern, wodurch das Seil aufgrund der gegenläufigen Verseilung eine erhebliche Schädigung erfahren würde. Die Lagerung dieser Wirbel bestehen meist aus Wälzlager mit entsprechend hohem Losbrechmoment, welches für hochmodulare Faserseile, wie oben gezeigt, zu hoch ist. In einer vom Autor betreuten Bachelorarbeit [Bub16] wurde ein leichtgängiger Drallfänger entwickelt, der durch eine

hydraulische Lagerung überaus leichtläufig ist und ein geringes Losbrechmoment aufweist. Wie in Abb. 42 zu erkennen, liegt das Eigendrehmoment des neu entwickelten Drallfängers unter dem Seildrehmoment der geflochtenen Seilkonstruktion im verdrehten Zustand aus Abb. 41.

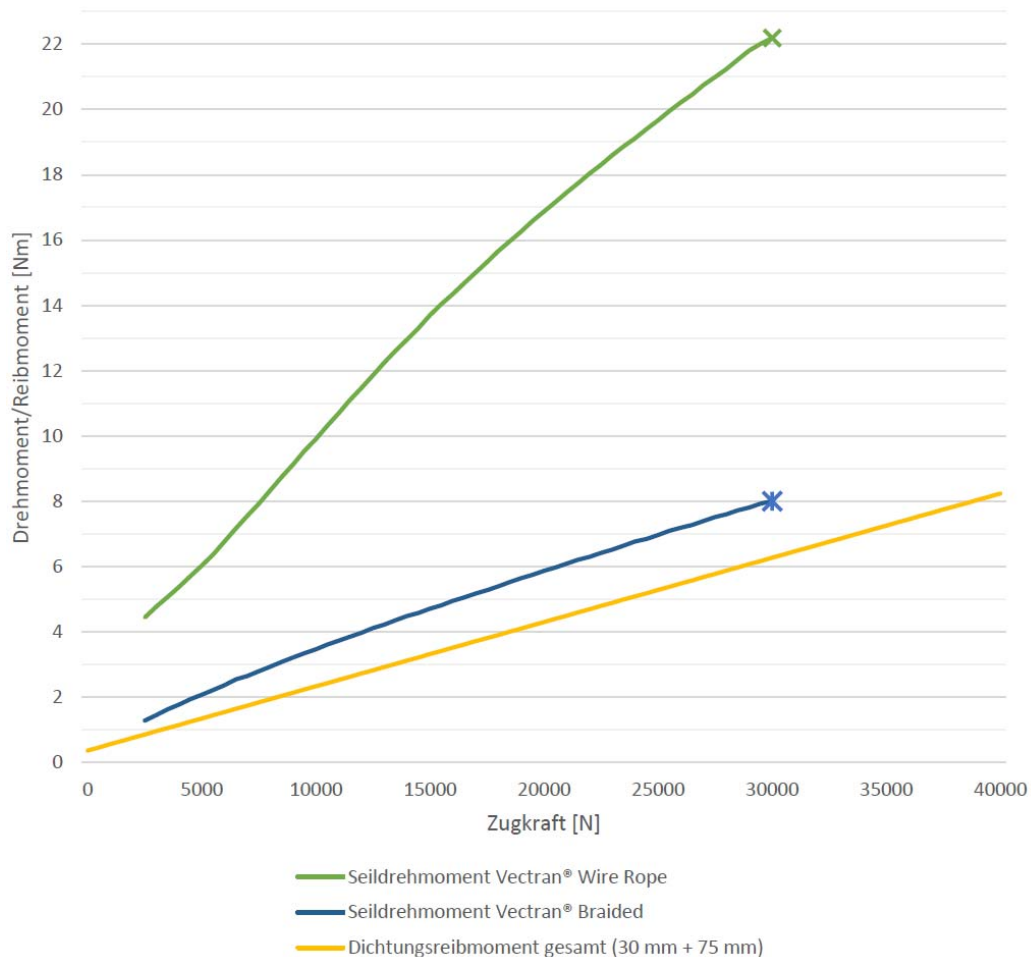


Abb. 42: Diagramm der Seildrehmomente aus **Abb. 41** zusammen mit dem Dichtungsreibmoment des entwickelten Drallfängers [Bub16]

Die Gelbe Linie im Diagramm zeigt hierbei das Dichtungsreibmoment, welches niedriger ist und sein muss, als das Seildrehmoment. Das aufgebaute Seildrehmoment wirkt im Betrieb als Rückstellmoment, welches den Wirbel verdreht und somit einen unverdrehten Seilzustand herstellt.

2.2 Untersuchungen zur Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile

In der Vergangenheit wurden im Vergleich zu Stahlseilen eine geringe Zahl an Untersuchungen hinsichtlich der Seillebensdauer durchgeführt, diese jedoch immer nur

stichprobenartig. Eine Formel zur Berechnung der Seillebensdauer wurden nur von Feyrer **[Fey91]**, Vogel **[Vog98]**, dem Dyneema-Faser-Herstellers DSM **[Nut10]**, **[Sme10]** und Heinze **[Hei14]** aufgestellt.

Am IFT von Ernst **[Ern10]**¹⁹ und dem Autor **[Nov14]**²⁰ durchgeführte Forschungsprojekte beschäftigten sich innerhalb der Projektlaufzeit ausschließlich mit der Frage nach der Verwendbarkeit hochmodularer Faserseile in Hubanwendungen bzw. wie diese Faserseile aufgebaut und optimiert werden können. Die Studienarbeiten von Gruber **[Gru12]** und Abraham **[Abr13]** haben für den Anwendungsfall eines parallelen Seilroboters Biegeversuche an 2,5 mm Faserseilen aus dem Werkstoff Dyneema hinsichtlich des Verschleißverhaltens und des Optimierungspotentials durchgeführt. Gerz **[Ger15]** hat diese Untersuchungen an geflochtenen 2 mm Seilen aus Dyneema weitergeführt.

Weitere am IFT durchgeführte Untersuchungen an laufenden Faserseilen umfassen die von Vogel durchgeführten Biegeversuche mit geflochtenen Konstruktionen aus einer Mischung von HMPE- und Polyethylenfasern, um die ein Mantel aus Polyethylen geflochten ist **[Vog02-1]**. Hierbei wurden fünf verschiedene Seilmuster, deren Schlaglänge variiert wurde untersucht. Alle anderen Parameter wurden konstant gehalten. Das Ziel der durchgeführten Biegeversuche war es, den Zusammenhang aus Schlaglänge und Seillebensdauer zu untersuchen. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine kürzere Schlaglänge eine höhere Seillebensdauer beim Lauf über die Seilscheibe ergibt. Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich die Seilbruchkraft mit der Schlaglänge ändert. Eine lange Schlaglänge wird eine höhere Bruchkraft des Seiles ergeben, als eine kurze Schlaglänge. Weiter wurden Biegeversuche mit Atlas-Seilen durchgeführt **[Vog02-2]**, bei denen es sich um eine gedrehte Konstruktion aus Polyamidmonofil und –multifilen handelte (Abb. 43). Die Monofil²¹ wirken dabei wie Drähte, um die die Multifilen²² zu Litzen verseilt werden. Diese Art von Seilen wird vorwiegend als Festmacherseile in der Schifffahrt verwendet. Da es sich um niedermolekulare Faserseile handelt, werden keine den hochmodularen Faserseilen vergleichbaren Lebensdauern erreicht. Jedoch können diese Art von Seilen auch in laufenden Anwendungen verwendet werden, wenn keine hohen Anforderungen an die Lebensdauer gestellt werden.

¹⁹ Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik - AiF-Förderkennzeichen 15370 N1

²⁰ Entwicklung eines hochfesten Faserseiles für Regalbediengeräte - ZIM-Förderkennzeichen KF2271507LK0

²¹ Monofile werden drahtförmig extrudiert und haben Durchmesser größer 1 mm

²² Einzelne Filamente, die zu Garnen wie bei herkömmlichen Faserseilen zusammengefasst werden



Abb. 43: Atlasseil links in Längsansicht, rechts im Querschnitt

Weitere in der vom Autor durchgeführten Literaturrecherche gefundene Untersuchungen zu laufenden hochmodularen Faserseilen umfassen von van Leeuwen durchgeführte Biegeversuche mit geflochtenen und gelegten Seilen aus Aramid [Van90]. Van Leeuwen wertete die von ihm erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich der Flechtlänge, der Art des Mantels und des Einflusses des Seildurchmessers aus. Wie Vogel in seinen Versuchen ebenfalls festgestellt hat, verringert sich die Seillebensdauer bei zunehmender Flechtlänge. Die Verwendung eines geflochtenen Mantels ergibt eine höhere Lebensdauer als ein extrudierter Mantel, wobei ein Mantel aus einem Doppelgeflecht eine höhere Lebensdauer erreichte als ein Mantel aus Einfachgeflecht. Der Einfluss des Seildurchmessers äußert sich in einer Abnahme der Seillebensdauer bei zunehmendem Durchmesser. Weiter berichtet Sloan [Slo03] von Biegeversuchen mit geflochtenen hochmodularen Seilen komplett aus HMPE und Mischungen aus HMPE und LCP Fasern. Dabei wurde von Sloan festgestellt, dass die aus einer Kombination aus HMPE und LCP hergestellten Faserseile eine höhere Lebensdauer erreichten als die Faserseile, die nur aus HMPE bestanden. Eine weitere Erkenntnis von Sloan war der Einfluss der Rillengröße. Eine eher engere Rille begünstigt dabei die Seillebensdauer.

Im Folgenden werden die Formeln zur Lebensdauerberechnung von Feyrer, Vogel, DSM und Heinze näher vorgestellt und erläutert.

2.2.1 Lebensdauergleichung von Feyrer

Die Formel von Feyrer (1) verwendet die zu dem damaligen Zeitpunkt für laufende Drahtseile verwendete Version **[Fey91]**. Regressionskoeffizienten wurden für ein Faserseil in gelegter Kern-Mantel-Konstruktion aufgestellt, dessen Kern aus Dyneema SK 60 bestand.

$$\lg N = a_0 + a_1 * \lg\left(\frac{S}{d^2}\right) + a_2 * \lg\left(\frac{D}{d}\right) + a_3 * \lg\left(\frac{S}{d^2}\right) * \lg\left(\frac{D}{d}\right) \quad (1)$$

Mit: N: Biegewechselzahl

a_i : Regressionskoeffizienten

S/d^2 : Durchmesserbezogene Seilzugkraft [N/mm²]

D/d : Verhältnis Seilscheibendurchmesser zu Seilnerndurchmesser

Die Regressionskoeffizienten für das von Feyrer untersuchte Seil sind in Tabelle 2 abgebildet.

Tabelle 2: Regressionskoeffizienten für Lebensdauergleichung von Feyrer

Regressionskoeffizient	Wert
a_0	-6,15
a_1	2,22
a_2	15,87
a_3	-5,24

Laut Feyrer wurde ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,991 erreicht²³. Jedoch wurden in den Untersuchungen keinerlei andere Faserwerkstoffe oder Seilkonstruktionen untersucht, so dass nicht nachgewiesen ist, dass die Formel Allgemeingültigkeit aufweist. Der Autor der vorliegenden Arbeit hat die Formel für Ergebnisse aus Biegeversuchen von Vogel **[Vog98]** (siehe auch Kapitel 2.2.2) für eine vergleichbare Konstruktion mit dem gleichen Seilwerkstoff Dyneema SK60 angewendet und keine gute Übereinstimmung gefunden (Abb. 44). So konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Berechnung (Rote Punkte in Abb. 44) nahezu vollständig außerhalb des 80 % Konfidenzintervalls (Blau gestrichelte Linien in Abb. 44) der Versuchsergebnisse (Blaue Punkte in Abb. 44) liegen. Darüber hinaus kreuzt die Gerade der Berechnungsergebnisse (Rote Linie) die Gerade der Versuchsergebnisse (Blaue Linie) in einem sehr starken Winkel.

²³ Das hohe Bestimmtheitsmaß ist auf die geringe Anzahl an Versuchen zurückzuführen

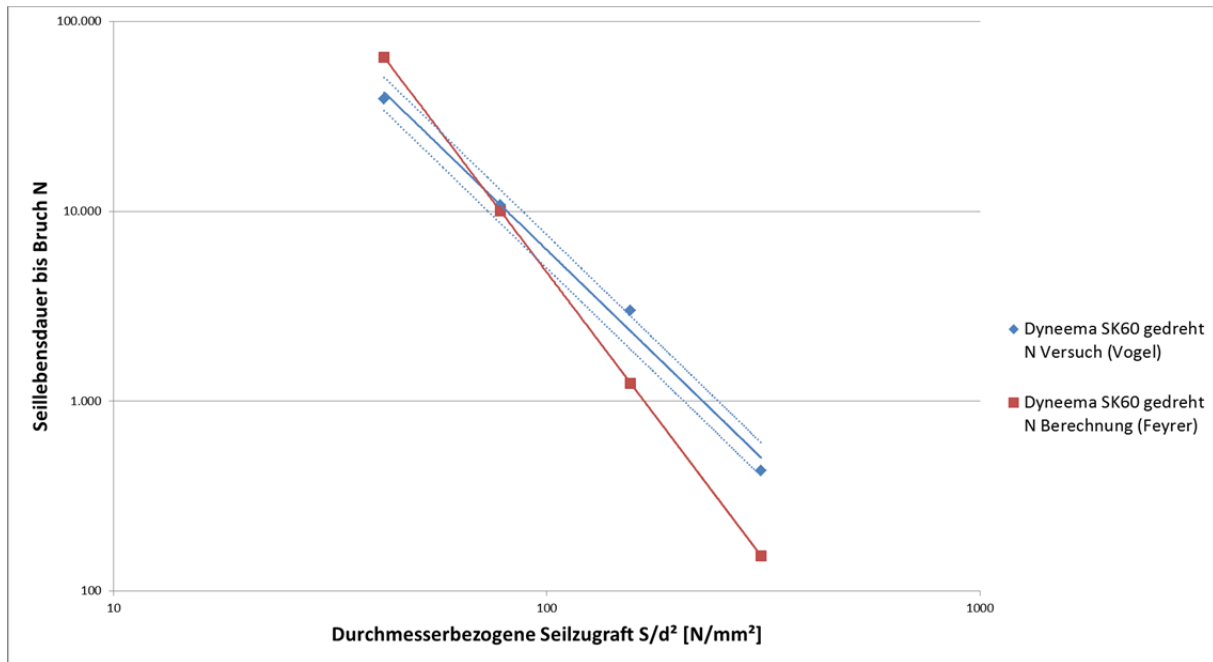


Abb. 44: Vergleich der Versuchsergebnisse von Vogel mit den Berechnungsergebnissen mit der Formel von Feyrer (Das Konfidenzintervall von 80% ist blau gestrichelt eingezeichnet)

Bei den von Feyrer durchgeführten Untersuchungen wurde erstmals eine zu Drahtseilen vergleichbare Belastungsgrenze hinsichtlich eines starken Abfallens der Lebensdauer nachgewiesen. Die bei Drahtseilen „Donandtpunkt“ genannte Belastungsgrenze und im Folgenden für hochmodulare Faserseile ebenso genannte Grenze markiert den Übergang vom Bruch durch Materialermüdung zum Gewaltbruch. Bei einem D/d -Verhältnis von 12,5 lag der Donandtpunkt bei einem S/d^2 von 243 N/mm², bei einem D/d -Verhältnis von 25 bei einem S/d^2 von 277,7 N/mm² und bei einem D/d -Verhältnis von 63 lag der Donandtpunkt bei einem S/d^2 von 312,5 N/mm². Feyrer hat zur Ermittlung der wirklichen Bruchkraft einen Zerreißversuch durchgeführt, bei dem das Faserseil mit Aluminiumhülsen verpressten Seilschlaufen als Endverbindungen ausgeführt wurde. Die erreichte Bruchkraft betrug $F_w = 53$ kN. Wird diese wirkliche Bruchkraft als Grundlage zur Berechnung der Seilsicherheit beim Erreichen des Donandtpunktes herangezogen werden Seilsicherheiten von 1,5, 1,3 und 1,2 für die oben genannten D/d -Verhältnisse von 12,5, 25 und 63 erreicht. Diese niedrigen Seilsicherheiten werden in der Praxis aber nahezu nicht erreicht, so dass der Donandtpunkt für die untersuchten Seilmuster als untergeordnet anzusehen ist.

2.2.2 Lebensdauergleichung von Vogel

Die von Vogel aufgestellte Lebensdauergleichung basiert auf einzelnen Biegeversuchen, die er mit gedrehten und geflochtenen Faserseilen aus zwei verschiedenen HMPE-Fasern mit Nenndurchmesser 8 mm durchgeführt hat [Vog98]. Im Unterschied zu der von Feyrer aufgestellten und oben vorgestellten Lebensdauergleichung verwendete Vogel einen neuen

vereinfachten Ansatz. Dabei stellte er einen Ansatz auf, der sowohl mit der durchmesserbezogenen Seilzugkraft (2) als auch mit der massebezogenen Seilzugkraft (3) verwendet werden kann

$$\lg N = a_0 + a_1 * \lg \left(\frac{S}{d^2} \right) \quad (2)$$

$$\lg N = b_0 + b_1 * \lg \left(\frac{S}{m^*} \right) \quad (3)$$

Mit: N: Biegewechselzahl
 a_i, b_i : Regressionskoeffizienten
 S/d^2 : Durchmesserbezogene Seilzugkraft [N/mm²]
 S/m^* : Massebezogene Seilzugkraft [N/tex]

In Tabelle 3 sind die Regressionskoeffizienten für die von Vogel untersuchten Seile aufgeführt.

Tabelle 3: Regressionskoeffizienten für die Formel von Vogel

Regressionskoeffizient	Dyneema SK 60 geflochten	Dyneema SK 60 gedreht	Dyneema SK 75 geflochten	Dyneema SK 75 gedreht
a_0	7,524	8,224	7,56	7,592
a_1	-1,856	-2,214	-1,852	-1,875
Bestimmtheitsmaß B für durchmesserbezogenen Ansatz	0,986	0,992	0,936	0,971
b_0	2,442	2,086	2,460	2,465
b_1	-1,865	-2,214	-1,875	-1,852
Bestimmtheitsmaß B für massebezogenen Ansatz	0,986	0,992	0,971	0,936

Laut Vogel werden Bestimmtheitsmaße zwischen 0,935 und 0,992 für den durchmesserbezogenen Ansatz und Bestimmtheitsmaße zwischen 0,936 und 0,992 für den massebezogenen Ansatz erreicht²⁴. Für den Werkstoff SK60 wurden in etwa die gleichen Bestimmtheitsmaße wie bei der Formel nach Feyrer/ Vogel erreicht, unabhängig von der Seilkonstruktion. Die Bestimmtheitsmaße für SK75 fielen geringer aus als für den Werkstoff SK60, wobei die von Feyrer aufgestellte Formel nur den Werkstoff SK60 abdeckt und somit kein Vergleich für den Werkstoff SK75 gezogen werden kann. Vogel konnte damit zeigen,

²⁴ Die hohen Bestimmtheitsmaße sind auf die geringe Anzahl an Versuchen zurückzuführen

dass prinzipiell auch ein relativ einfacher Ansatz gute Ergebnisse für eine Abschätzung der Seillebensdauer geben kann.

2.2.3 Lebensdauergleichung von DSM

Die von DSM, Hersteller von Dyneema, entwickelte Formel (4) orientiert sich an der Formel von Feyrer zur Berechnung der Lebensdauer laufender Drahtseile [Nut10], [Sme10].

$$\log N = a_0 + a_1 * \log\left(\frac{F}{d^2}\right) + a_2 * \log^2\left(\frac{F}{d^2}\right) + a_3 * \log^3\left(\frac{F}{d^2}\right) + a_4 * \log\left(\frac{D}{d}\right) + a_5 * \log\left(\frac{S}{d^2} * \frac{D}{d}\right) + a_6 * \log(d) + a_7 * \log\left(\frac{D}{d}\right) \quad (4)$$

Mit: N: Biegewechselzahl
 a_i : Regressionskoeffizienten
 F/d^2 : Durchmesserbezogene Seilzugkraft [N/mm²]
 D/d : Verhältnis Seilscheibendurchmesser zu Seilnenndurchmesser
 d : Seilnenndurchmesser

Regressionskoeffizienten wurden in den vom Autor gefundenen Veröffentlichungen nicht gefunden. Auch wurden keine Angaben zu der Vorhersagegenauigkeit, also dem Bestimmtheitsmaß R^2 , gemacht.

2.2.4 Lebensdauergleichung von Heinze

Die von Heinze aufgestellte Formel (5) verwendet im Unterschied zu den vorangegangenen vorgestellten Formeln zusätzlich zu der Logarithmusfunktion auch eine Arkustangensfunktion, um laut Heinze die zu erwartende Seillebensdauer besser abzubilden [Hei13]. Mit der entwickelten Formel kann laut Heinze die Seillebensdauer eines geflochtenen Seiles mit Mantel für die Seilwerkstoffe Dyneema SK75, Technora T200 und Vectran HT T97 mit einer hohen Zuverlässigkeit berechnet werden.

$$\lg \bar{N} = p_{00} + p_{01} * \arctan(p_{02} * BV) + p_{10} * \lg(\sigma) + p_{11} * \lg(\sigma) * \arctan(BV) - \lg(10^{\sigma - a_{D0} + a_{D1} * BV^{-2}} + 1) \quad (5)$$

Mit: $\bar{N}$: Mittlere Biegewechselzahl

p_i, a_{Di} : Regressionskoeffizienten

BV: Biegedurchmesser Verhältnis $BV = \frac{D_1^*}{d_{ET}}$

Mit: D_1^* : Auflagedurchmesser (Rillengrunddurchmesser)

d_{ET} : tragender Seilersatzdurchmesser

σ : Seilzugspannung [N/mm²]

In Tabelle 4 sind die Regressionskoeffizienten für die Berechnungsformel von Heinze aufgeführt, Bestimmtheitsmaße werden von Heinze nicht angegeben.

Tabelle 4: Regressionskoeffizienten für die Formel von Heinze für geflochtene Faserseile mit Mantel

Regressionskoeffizient	Dyneema	Technora	Vectran
p_{00}	5,96	-968129	6,087
p_{01}	2,476	616342	1,814
p_{02}	0,111	4454	0,024
p_{10}	-1,891	58,808	-17,637
p_{11}	0	-40,629	11,119
a_{D0}	-940,4	-1024,3	-284,3
a_{D1}	-31454	-82012	-17654

2.2.5 Vergleich der vorgestellten Lebensdauergleichungen

Die oben vorgestellten Lebensdauergleichungen von Feyrer, Vogel und Heinze werden im Folgenden miteinander verglichen. Die Formel von DSM wird bei diesem Vergleich nicht berücksichtigt, da für diese keine Regressionskoeffizienten vorliegen.

Für den Vergleich wurden Lebensdauern basierend auf einer vergleichbaren Seilkonstruktion, wie sie auch von den jeweiligen Autoren verwendet wurde, berechnet. In Abb. 45 sind die Ergebnisse in einem Diagramm zusammengefasst. Die Seilkraftbezogenen und Massebezogenen Gleichungen von Vogel ergeben prinzipiell einen parallelen Verlauf, jedoch kann ein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen festgestellt werden. Die mit der Lebensdauergleichung von Feyrer berechnete Lebensdauerlinie hat einen sehr steilen Verlauf und kreuzt in dem untersuchten Bereich die Linien der anderen drei Gleichungen. Die Gleichung von Heinze ergibt wiederum einen parallelen Verlauf zu denen von Vogel, jedoch mit einem sehr großen Abstand zu diesen.

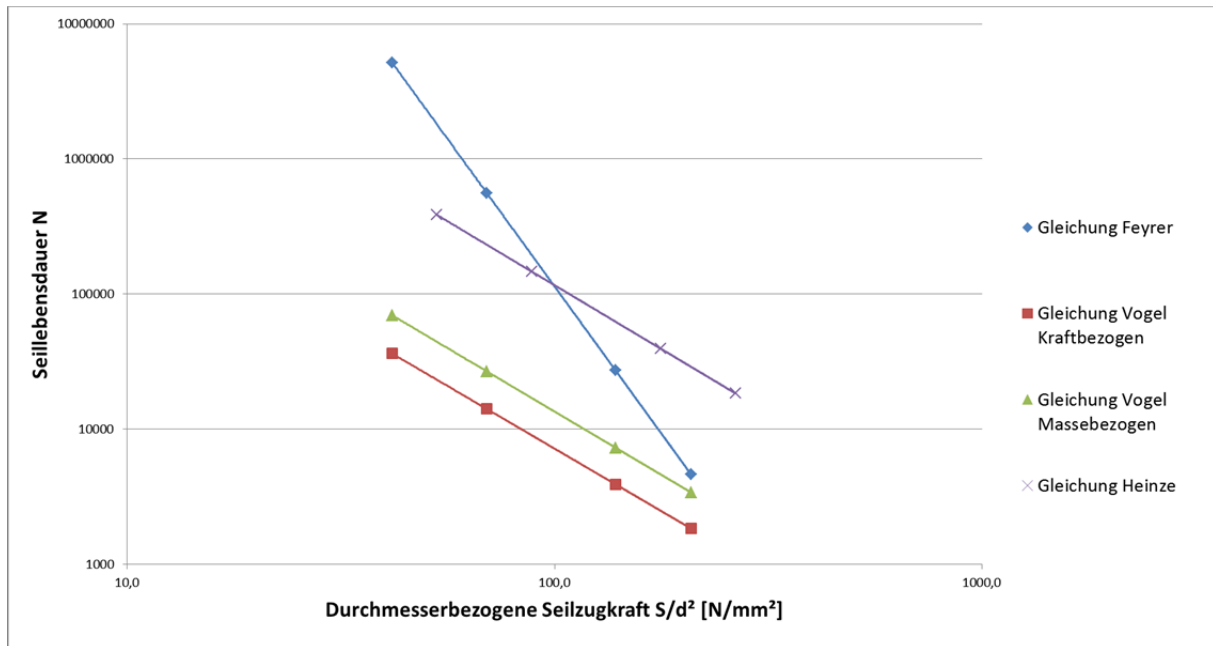


Abb. 45: Vergleich der Lebensdauergleichungen von Feyrer, Vogel und Heinze an einem Berechnungsbeispiel

Wie in Abb. 45 zu erkennen, weicht die Gleichung von Feyrer (Blaue Linie) somit signifikant von den Gleichungen der anderen beiden Autoren ab und kreuzt deren Lebensdauergeraden. Die eher komplexe Gleichung von Heinze (Lila Linie) ergibt wie bereits beschrieben eine parallel verschobene Gerade zu den Geraden von Vogel (Grüne und rote Linie), jedoch mit höheren berechneten Lebensdauern.

Fazit: Feyrer (Kapitel 2.2.1) und Vogel (Kapitel 2.2.2) haben als einzige der vorgestellten Autoren Bestimmtheitsmaße für die von ihnen aufgestellten Ansätze angegeben. Dabei kann festgestellt werden, dass auch mit einem eher einfachen Ansatz, wie ihn Vogel gewählt hat, zu komplexeren Ansätzen vergleichbare Bestimmtheitsmaße erzielt werden können.

2.2.6 Life Factor

Abschließend soll der Berechnungsansatz „Life Factor“ erwähnt werden, der sowohl für laufende Drahtseile als auch zunehmend für laufende hochmodulare Faserseile verwendet wird [Ven08]. Die Gleichung des Life Factor LF lautet:

$$LF = SF \times D/d \quad (6)$$

Mit: LF: Life Factor
 SF: Safety Factor
 D/d: Verhältnis Scheibendurchmesser D zu Seilnenndurchmesser d

Problematisch an diesem Ansatz ist, dass keine Berechnung der Lebensdauer möglich ist, sondern man kann diesen Faktor nur zum Vergleich verschiedenster Ergebnisse heran ziehen. Weiter wird keine genaue Unterscheidung hinsichtlich der Seilkonstruktion oder dem Seildurchmesser gemacht.

2.2.7 Sonstige Lebensdaueruntersuchungen

Die von Gruber gemachten Untersuchungen wurden an hochmodularen Faserseilen aus Dyneema SK75 mit einem Nenndurchmesser von 2,5 mm durchgeführt. Dieses Seil wurde im sogenannten „IPAnema“-Seilroboter des Institutes für Produktion und Automatisierung (IPA) der Fraunhofer-Gesellschaft verwendet. Gruber führte Biegeversuche mit einer Variation der Seilzugkräfte bei sonst gleichen Bedingungen durch. Ziel war es hierbei für den Anwendungsfall des Seilroboters die Seillebensdauer zu ermitteln und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Die Biegeversuche umfassten eine breite Bandweite an Seilzugkräften, so dass Gruber wie andere Autoren bereits vor ihm einen Donandtpunkt (siehe auch Kapitel 2.2.1) bestimmen konnte. Dieser Donandtpunkt lag bei diesen Untersuchungen bei einem D/d -Verhältnis von 18,36 bei einem S/d^2 von $178,5 \text{ N/mm}^2$, dies ergibt eine Seilsicherheit von 5,2.

Abraham führte für den oben genannten Seilroboter „IPAnema“ weitergehende Untersuchungen durch. Es wurden dabei zwei verschiedene Seilmuster aus SK75 und DM20, deren Unterschied vor allem in der Kriechneigung lag, mit demselben Nenndurchmesser von 2,5 mm in mehreren Biegeversuchen getestet. Neben der Variation des Werkstoffes wurden auch die Seilzugkräfte und die Seilscheibendurchmesser variiert. Das Hauptaugenmerk der Arbeit lag in der Ermittlung der Einflüsse auf die Seillebensdauer und deren Stärke. Die Änderung der Geschwindigkeit hatte dabei nur einen geringen Einfluss und der Faserwerkstoff einen mittleren Einfluss. Die Änderung der Seilzugkraft und des Seilscheibendurchmessers haben hingegen einen großen Einfluss auf die Seillebensdauer.

Innerhalb eines DFG-Forschungsprojektes über die Lebensdauer hochmodularer Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung [Weh17] führte Gerz [Ger15] in einer Bachelorarbeit Biegeversuche mit geflochtenen 2 mm Dyneema-Seilen durch, die auf die obigen beiden Arbeiten basierte. Um den Einfluss des D/d -Verhältnisses bei verschiedenen Seilzugkräften näher zu untersuchen wurden die Biegeversuche mit drei verschiedenen D/d -Verhältnissen und drei Seilzugkräften durchgeführt.

2.3 Untersuchungen zur Erkennung der Ablegereife laufender hochmodularer Faserseile

Zum vollumfänglichen Einsatz laufender hochmodularer Faserseile ist die sichere Erkennung der Ablegereife wichtig. Für die durchzuführenden regelmäßigen Inspektionen, die zum Beispiel von der Berufsgenossenschaft in deren Richtlinien gefordert werden, muss dazu ein eindeutiger Indikator festgelegt sein der angibt, dass das Seil abgelegt werden muss.

Hinsichtlich der Erkennung der Ablegereife gibt es verschiedenste Ansätze, die mit verschiedensten Technologien verfolgt werden. Die einfachsten Ansätze reichen dabei von visueller Zustandsermittlung mittels einer farbigen Zwischenschicht [Teu16] oder der Zuordnung einer Bildertafel zum Außen- und Innenzustand eines Seiles [Sam13] bis zur Verwendung speziell beschichteter Fasern [Hun15]. Allgemein sollten mehrere Inspektionsmöglichkeiten und Ablege Kriterien beim Betrieb hochmodularer Faserseile herangezogen werden, um einen sicheren Einsatz hochmodularer Faserseile zu gewährleisten.

Die in Kapitel 1.2 vorgestellten Krananwendungen von Manitowoc/ Samson Ropes und Liebherr/ Teufelberger benutzen als Ablegereifekriterium wie oben erwähnt eine visuelle Zustandsermittlung. Manitowoc und Samson Ropes verwenden als Ablegereife-Indikator für das K-100-Seil einen sogenannten Pocket Guide, in dem Zustandsbilder des Seiles mit dazugehörigem Schadensindikator (Grün, Gelb, Rot)²⁵ abgebildet sind (Abb. 46).



Abb. 46: Auszug aus Pocket Guide für AmSteel Blue von Samson Ropes (oben Seilzustand außen, unten Seilzustand im Innern) [Sam13]

Liebherr und Teufelberger haben in das SoLite-Seil eine rote Zwischenschicht eingefügt, die bei Verschleiß des Mantels sichtbar wird und dem Kranführer ein Ablege Kriterium gibt (Abb. 47). Weiter geben Liebherr und Teufelberger in [Teu16] an, dass ebenfalls eine

²⁵ Grün gibt einen einwandfreien Zustand an, Gelb gibt einen Zustand an, bei dem ein fortschreitender Verschleiß feststellbar ist und Rot gibt an, dass das Seil nicht mehr betriebssicher ist und ausgetauscht werden muss

zerstörungsfreie automatische Zustandserkennung implementiert ist, wobei keine Angaben dazu gemacht werden, wie dies genau realisiert wird.



Abb. 47: SoLite mit roter Zwischenschicht
[Teu16]

In [Hun15] stellt Huntley eine Ablegereifeerkennung mittels beschichteter Fasern in Kombination mit der Methode der magnetinduktiven Seilprüfung, wie sie bereits bei Drahtseilen Verwendung findet, und eine auf Röntgen basierende Methode vor. Dabei werden einige wenige Faserstränge mit einem Marker-Material behandelt, wobei nicht genannt wird, um welches Marker-Material es sich handelt. Es wurden Biegeversuche mit einem Aramid-Seil durchgeführt, welches Faserbündel mit den behandelten Fasersträngen beinhaltet. Dabei konnte eine prinzipielle Erkennbarkeit der Schädigung in der Biegezone durch eine Signalverbreiterung im Messgraphen der magnetinduktiven Messung festgestellt werden. Im Röntgenbild konnte an Stellen, an denen im Messgraphen ein größeres Signal festgestellt wurde, eine Unterbrechung des behandelten Fasermaterials festgestellt werden.

Eine am IFT [Nov14] verfolgte Möglichkeit beinhaltet die visuelle Inspektion und die automatisierten Ablegereifeerkennung durch das Winspect-System [Soe15]. Mit diesem System kann mittels vier über den Umfang verteilter hochauflösender CCD-Kameras und einer LED-Beleuchtung das Seil aufgenommen und mittels Software-implementierter Erkennungsroutinen im Falle von Drahtseilen nach Drahtbrüchen o.ä. gesucht und angezeigt werden. Eine Weiterentwicklung könnte hierbei der Einsatz bei laufenden hochmodularen Faserseilen sein [Nov15], bei dem das Winspect-System für Durchmesser- und Flechtlängenmessungen (oder Dehnung) und für die Detektion von Unregelmäßigkeiten wie starke Ausfaserungen o.ä. verwendet wird. Weiter wird in [Nov15] eine multidimensionale Auswertung mehrerer Inspektionswerte wie z.B. Durchmesser, Flechtlänge und Ausfaserung vorgestellt, die alle Werte, ähnlich zu ISO 4309 [DIN13-3], in Verhältnis setzt und somit einen sicheren Betrieb gewährleistet.

Das amerikanische Unternehmen Cortland entwickelte ein Structural Health Monitoring (SHM) um den Zustand und die Ablegereife eines hochmodularen Faserseiles zerstörungsfrei ermitteln zu können [Cor15]. Dabei wird ein System benutzt, das auf Ultraschall basiert. Es wurden von Cortland sowohl Biegeversuche als auch Praxistests durchgeführt, wobei keine Angaben gemacht werden, wie gut der Zustand oder die Ablegereife erkannt wird.

2.4 Untersuchungen zur Optimierung von Seiltrieben für hochmodulare Faserseile

Die vom Autor durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass es keine öffentlich verfügbaren Untersuchungen zur Ausführung von Seiltrieben und zu der Lebensdauer hochmodularer Faserseile beim Einsatz von Seiltrommeln, sowohl einlagig als auch mehrlagig, gibt. Die einzigen verfügbaren Untersuchungen in diesem Zusammenhang behandeln die Optimierung von Seiltrommeln für den Einsatz mit Faserseilen und spezielle Spulsysteme und werden im folgenden Kapitel behandelt.

2.5 Untersuchungen und Bauarten von Spulvorrichtungen und Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile

Die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen an Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile zielen vor allem auf die Beanspruchung der Trommeln durch die andersartigen Werkstoffeigenschaften der Faserseile ab. Speziell für Faserseile entwickelte Windensysteme und Spulvorrichtungen sind bereits auf dem Markt erhältlich und werden vereinzelt im Offshore-Bereich eingesetzt. Im Folgenden sollen beide Themenkomplexe näher vorgestellt werden. Der Einfluss auf die Seillebensdauer wurde hierbei soweit der Autor dies durch die durchgeführte Literaturrecherche überblicken kann noch nicht behandelt.

2.5.1 Untersuchungen an Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile

Von Dietz [Die05] bzw. in jüngerer Vergangenheit von Schulze [Sch14-1] und Lohrengel [Loh11-1], [Loh11-2], [Loh13-1], [Loh13-2] wurden an der TU Clausthal verschiedene Forschungsprojekte zur Untersuchung der Beanspruchungsgerechten Gestaltung von Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile durchgeführt.

Dietz [Die05] führte hierzu Untersuchungen an nicht näher bestimmten Faserseilen durch, um eine geeignete Anordnung und Optimierung der Bordwände einer Seiltrommel mittels der Finiten Elemente Analyse zu bestimmen.

Schulze [Sch14-1] führte in seiner Arbeit Untersuchungen hinsichtlich der Quersteifigkeiten hochmodularer Faserseile und deren Auswirkungen auf eine mehrlagig bewickelte Seiltrommel durch. Hierzu wurden Faserseile verschiedener Macharten und Werkstoffen mit einer Prüfeinrichtung zur Messung der Querelastizität untersucht.

Die von Lohrengel [Loh11-1], [Loh11-2], [Loh13-1], [Loh13-2] durchgeführten Untersuchungen beschäftigten sich vor allem mit dem Einfluss mit hochmodularen Faserseilen mehrlagig bewickelten Seiltrommeln. Die Untersuchungen umfassten hierbei sowohl Versuche als auch computerbasierte Berechnungen mittels Finite Elemente Analyse (FEA). Zur Beanspruchungsanalyse und zum späteren Vergleich mit der FEA wurden Versuche durchgeführt, bei denen Dehnungsmessstreifen (DMS), wie auch in [Wei08] beschrieben, auf den Trommelmantel aufgebracht wurden. Daneben wurden Quersteifigkeitsmessungen unter verschiedenen Zugkräften durchgeführt, die als Basis für die FEA dienten. Die Ergebnisse flossen in verschiedene Optimierungen des Trommeldesigns, so dass eine beanspruchungsgerechte Auslegung für Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile möglich ist und darüber hinaus Möglichkeiten des Leichtbaus ausgenutzt werden können.

2.5.2 Auf dem Markt erhältliche Spulvorrichtungen und Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile

Zum sicheren Auf- und Abspulen hochmodularer Faserseile wurde von Rolls-Royce Marine Systems (früher ODIM) das Spulsystem Fibre Rope Deployment System (FRDS) entwickelt, das mit einer sogenannten Cable Traction Control Unit (CTCU)²⁶ kombiniert wurde [Tor10]. Die CTCU ist hierbei ein neuentwickelter Spilltrieb, der nicht, wie bei einem herkömmlichen Spilltrieb aus zwei gegenüberliegenden Trommeln besteht, sondern aus einzeln angetriebenen Umlenkscheiben, siehe Abb. 48. Die einzeln angetriebenen Umlenkscheiben können hierbei so angetrieben werden, dass Schlupf zwischen Faserseil und Scheibe weitestgehend vermieden wird. Schlupf kann aufgrund zweier Ursachen entstehen. Die erste Ursache ist fehlende Treibfähigkeit. Um den Einfluss dieser Ursache zu begegnen werden verschiedene Rillenfutter wie zum Beispiel Gummi verwendet. Die zweite Ursache für Schlupf ist die Dehnung des Faserseiles durch die CTCU über die Umlenkscheiben. Je weiter das Faserseil die CTCU von der Speichertrommel kommend durchläuft, desto mehr wird die Seilzugkraft aufgrund der Umschlingungen aufgebaut bis nach der letzten Umlenkscheibe die volle Seilzugkraft auf das Seil wirkt. Aufgrund der Zunahme der Seilzugkraft während der Überrollung einer Scheibe dehnt sich das Seil. Diese Dehnung führt dazu, dass mehr Seillänge über die nächste Umlenkscheibe abgeführt werden muss. Damit nun kein Schlupf im System entsteht, drehen die in Richtung Seilabgang liegenden Umlenkscheiben schneller als

²⁶ Siehe Kapitel 1.2

die innenliegenden Scheiben. Dieses System setzt für die Speichertrommel²⁷ eine Lebus-Rillung ein. Das System wurde und wird bereits auf mehreren Schiffen, vor allem vor Brasilien, eingesetzt.



Abb. 48: Fibre Rope Deployment System von Rolls-Royce Marine [Rol10]

Ein ähnliches System von Logan Industries mit einer Spillwinde deren Seilscheiben, wie bei einer klassischen Spillwinde, auf jeweils einer Achse sitzen und einer Speichertrommel ist in Abb. 49 abgebildet.

²⁷ Speichertrommeln zeichnen sich durch eine geringe und konstante Seilzugkraft aus, dadurch ist ein sehr gutes Spulbild sichergestellt. Weiter kann durch die geringere Seilzugkraft die Trommel leichter gebaut werden



Abb. 49: Spillwinde mit hochmodularem Faserseil
[Boe15]

Von der DeepTek wurde eine Winde mit einer speziellen Spulgeometrie entwickelt [Boe15], die sich das Prinzip von Garnspulen mit einem sehr großen Spulwinkel zu Nutze macht, in Kombination mit nach außen hin stufenförmig angeordneten einzelnen Wicklungszonen, siehe Abb. 50 und Abb. 51. Ziel dieser Geometrie soll es dabei sein, sicherzustellen, dass das eingesetzte Faserseil gut gespult werden kann und es sich nicht in darunterliegende Lagen einschneiden kann, selbst bei geringer Seilvorspannung beim Aufspulen. Diese geringe Seilvorspannung kann vor allem im Offshore-Bereich, für den diese Winde vor allem entwickelt wurde, vorkommen, da hier oft eine Last auf den Meeresboden abgelassen wird und das Seil nur mit der Leerlast, Eigengewicht des Hakens, aufgespult wird. Im Herbst 2015 wurde erstmals ein Schiff mit diesem System und mit einem hochmodularen Faserseil aus HMPE ausgerüstet. Erste Erfahrungen wurden noch nicht publiziert.

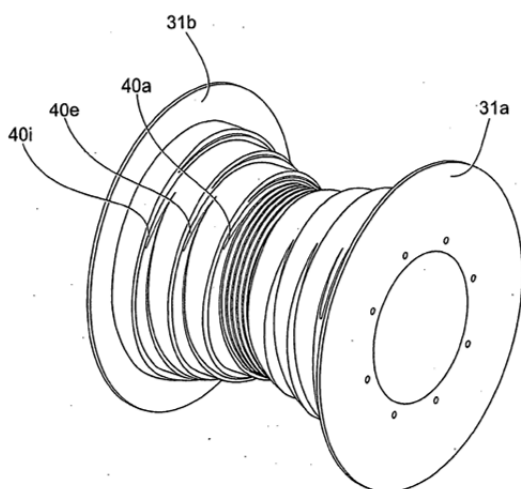


Abb. 50: Iso- Ansicht der DeepTek Winde [Cra12]

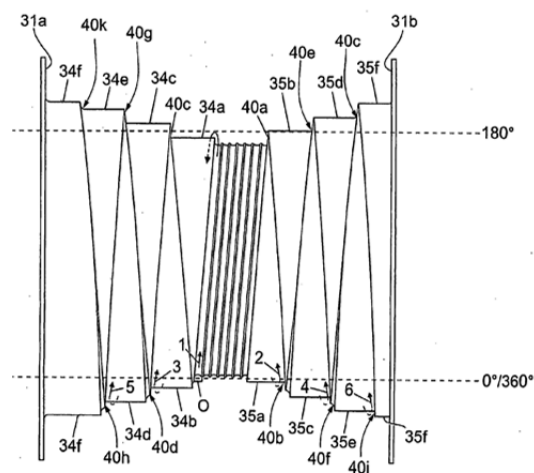


Abb. 51: Querschnitt der DeepTek Winde [Cra12]

Weiter werden auch Trommeln ohne jegliche Rillung und die von Drahtseilen bekannte Systemrillung nach Lebus (Abb. 52) eingesetzt. Die Systemrillung besteht aus zwei Parallelzonen und zwei Steigungszonen. In den Steigungszonen wird das Seil um einen halben Seildurchmesser in Trommelachsrichtung weiter geschoben. Die Lebus-Rillung bietet im Vergleich zur ungerillten Trommel den Vorteil dass sich eine stabile Wickelpyramide ausbilden kann und dass die Hauptschädigung in den Steigungszonen erfolgt [Wei08].

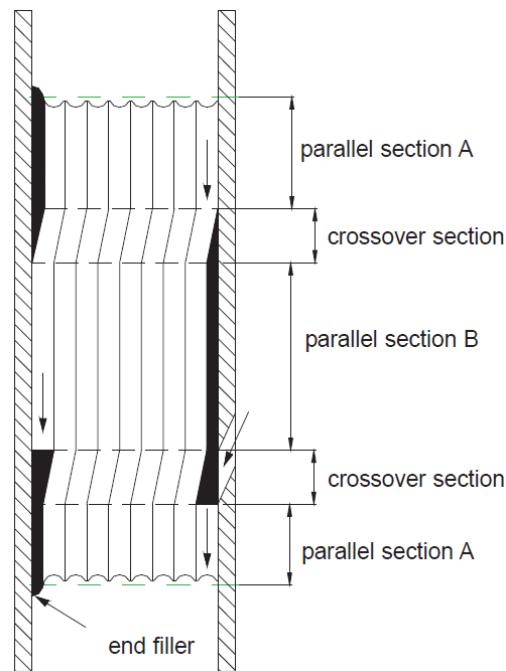


Abb. 52: Systemrillung Lebus [Leb09]

Um den bei Seiltrommeln auftretenden Schrägzug zu minimieren besteht die Möglichkeit eine Spulhilfe einzusetzen, wie Sie auch in den vorgenannten Systemen zum Teil verwendet wird. Es gibt dabei prinzipiell zwei Ausführungen. Die erste ist der Auflaufwinkel Kompensator der aus einer exzentrischen Welle besteht, auf der eine Seilscheibe läuft (Abb. 53). Das System ist passiv, da es durch die Seilspannung weitergetrieben wird.



Abb. 53: Auflaufwinkel Kompensator mit Scheibe [Leb00]

Die zweite Ausführungsart ist die Kreuzgewindespindel die aus einer Welle mit einem Gewindegang, dem Kreuzgewinde, besteht in dem eine Vorrichtung aus zwei Seilscheiben oder –walzen läuft (Abb. 54). Die Kreuzgewindespindel wird über eine Kette angetrieben, die mit der Seiltrommel verbunden ist und somit aktiv ist.



Abb. 54: Kreuzgewindespindel [Leb00]

Beide Systeme sind für Drahtseile entwickelt worden und werden im Falle der Kreuzgewindespindel bereits für hochmodulare Faserseile eingesetzt.

2.6 Bewertung des Standes der Forschung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in vielen unterschiedlichen Bereichen der hochmodularen Faserseile Untersuchungen durchgeführt wurden, die jedoch nur rudimentären Charakter haben. Es besteht weiterhin ein hoher Bedarf an Forschung im Bereich der laufenden hochmodularen Faserseile. Dabei sind die Seilbasierten Einflüsse (Werkstoff, Coating, etc.) weitestgehend grundlegend erforscht, allerdings hat vor allem die Kombination Werkstoff – Coating einen erheblichen Einfluss der zudem auch noch Anwendungsabhängig ist. Möglichkeiten zur Abschätzung oder Berechnung der Seillebensdauer sind noch weitestgehend ungeklärt und unerforscht. Ein weiterer ungeklärter Punkt und für den sicheren Einsatz hochmodularer Faserseile nötig ist die sichere Erkennung der Ablegereife.

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Lebensdauerbeeinflussende Faktoren für laufende hochmodulare Faserseile

Im Folgenden soll auf die Einflüsse auf die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile eingegangen werden, die in einem Seiltrieb, wie in Abb. 55 abgebildet, auftreten. Als Beispiel für einen Seiltrieb wurde hierbei ein Raupenkran verwendet, da hier eine Vielzahl an relevanten Einflüssen beobachtet werden können.

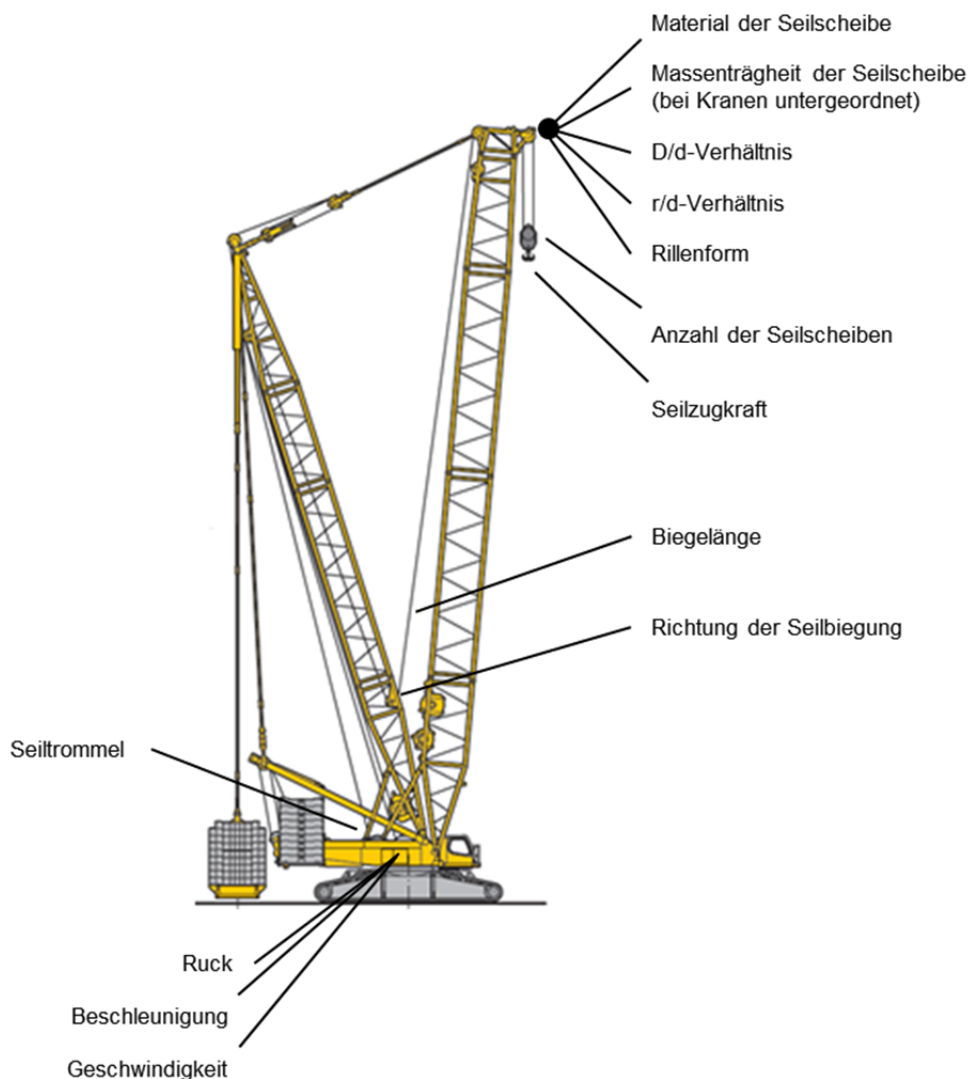


Abb. 55: Liebherr Raupenkran LR 1600/2 als Beispiel für die Maschinenbasierten Lebensdauereinflüsse (Raupenkran aus [Lie15], Eintragungen durch Autor)

Werden Seile, sowohl Draht- als auch hochmodulare Faserseile, über eine Seilscheibe gebogen, wirken eine Vielzahl an Spannungen im Seil die nur bedingt berechnet werden können (für Stahlseile siehe [Fey15]). Um die Beanspruchung eines Seiles zu beschreiben

und zu bestimmen, wird ein Kollektiv an Faktoren aufgestellt die einen Einfluss auf die Lebensdauer eines laufenden hochmodularen Faserseiles in unterschiedlicher Ausprägung haben. Der Autor hat, basierend auf der durchgeführten Literaturrecherche und der eigenen Erfahrung, das in Abb. 56 dargestellte Diagramm für die Einflussfaktoren erstellt.

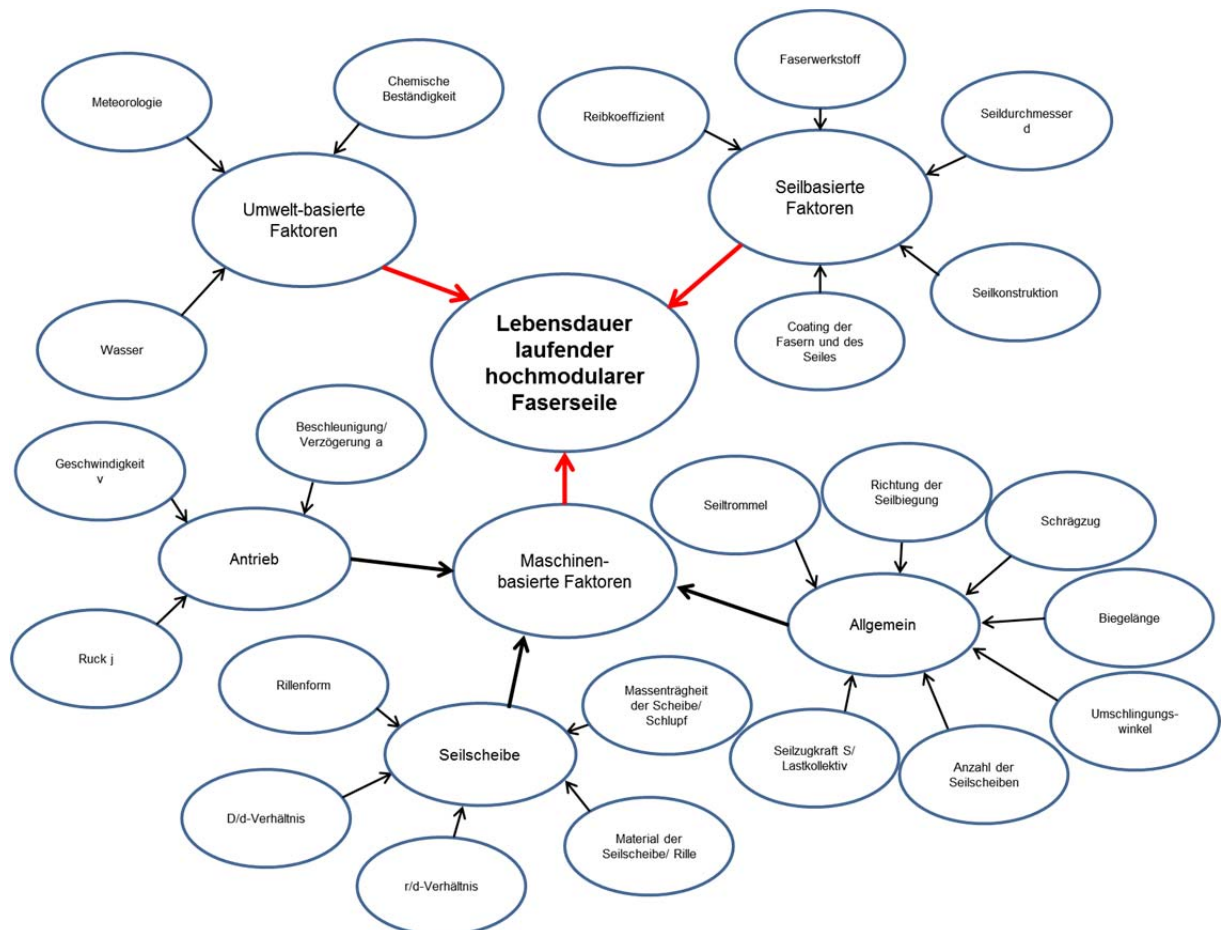


Abb. 56: Lebensdauerbeeinflussendes Faktorenkollektiv für laufende hochmodulare Faserseile

Zu den Maschinenbasierten Faktoren gehören dabei u.a. die Seilgeschwindigkeit v , Beschleunigung bzw. Verzögerung a , das D/d -Verhältnis, die Seilzugkraft S bzw. das Lastkollektiv und damit der Sicherheitsfaktor SF , das r/d -Verhältnis und die Form der Rille, das Material der Scheibe bzw. der Rille, die Anzahl der Scheiben, über die das Seil läuft und die Biegelänge. Zu den Seilbasierten Faktoren zählen der Seildurchmesser d , die Seilkonstruktion, der Seil-/ Faserwerkstoff und das Coating der Fasern bzw. des Seiles. Dazu kommen lebensdauerbeeinflussende Faktoren aus der Umwelt, in der das Faserseil eingesetzt wird. Zu diesen Faktoren gehören die Temperatur, das Vorhandensein von Chemikalien und ob das Faserseil in Wasser eingesetzt wird.

Es ist davon auszugehen, dass diese Faktoren nicht einzeln wirken, sondern dass Wechselwirkungen bestehen, die eine Erhöhung oder aber auch Minderung der jeweiligen Einflüsse bewirken.

Im Folgenden soll näher auf die Faktoren eingegangen werden.

3.1.1 Maschinenbasierte Faktoren

Die Maschinenbasierten Faktoren teilen sich in drei Hauptgruppen auf: Allgemeine Faktoren, die den Antrieb bzw. die Steuerung betreffenden Faktoren und die die Seilscheiben bzw. Seiltrommeln betreffenden Faktoren.

Allgemeine Faktoren

Der **Einfluss der Seiltrommel** betrifft die Frage, ob das Faserseil einlagig oder mehrlagig aufgespult wird. Eine mehrlagige Spulung wird die Lebensdauer aufgrund der erhöhten Pressung auf den Kreuzungsstellen heruntersetzen. Sowohl bei einlagiger als auch mehrlagiger Spulung wird die Lebensdauer aufgrund des auftretenden Schrägzuges ebenfalls gemindert. Es stehen keine veröffentlichten Untersuchungen zur Seillebensdauer beim Einsatz von Seiltrommeln zur Verfügung.

Wie bei Drahtseilen [Weh16] hat die **Biegerichtung**, in der ein hochmodulares Faserseil über eine Seilscheibe und auf eine Trommel bzw. über zwei aufeinander folgende Seilscheiben gebogen wird, einen Einfluss auf die Seillebensdauer (Abb. 57).

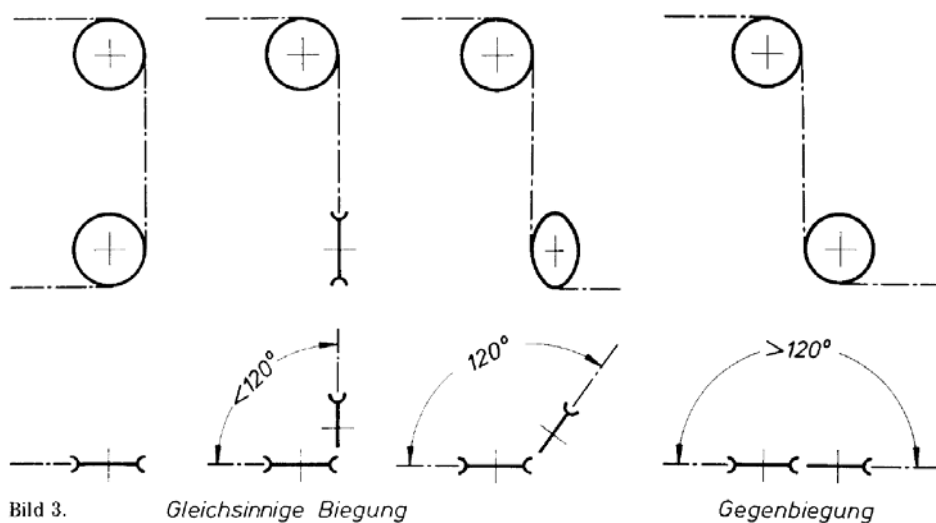


Abb. 57: Definition Gleichsinnige Biegung/ Gegenbiegung [DIN74]

Heinze [Hei11] hat hierzu erste Untersuchungen durchgeführt, die zeigen, dass es für HMPE nahezu keinen Einfluss auf die Lebensdauer bei Gegenbiegung gibt, wohingegen es für Technora und Vectran eine signifikante Reduktion der Lebensdauer gibt (Abb. 58). Für den Werkstoff Technora ist die Restlebensdauer bei Gegenbiegung im Vergleich zu gleichsinniger Biegung im Mittel ca. 30 %, bei Vectran beträgt die Restlebensdauer bei Gegenbiegung ca. 35 %.

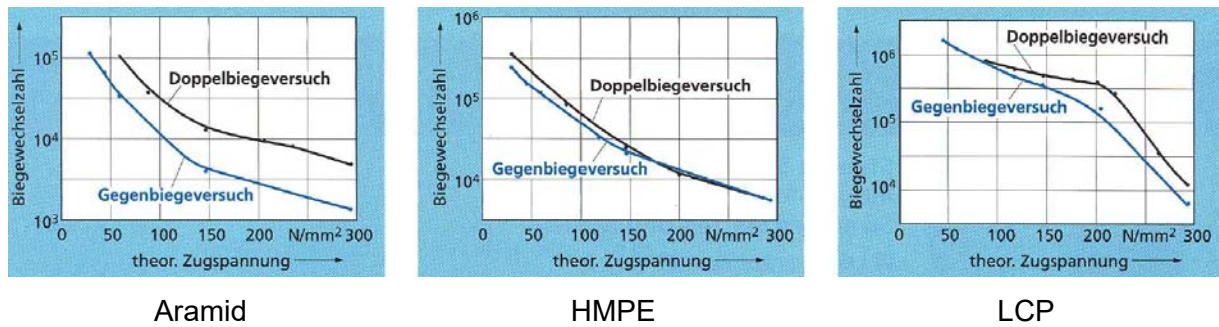


Abb. 58: Einfluss der Gegenbiegung auf die Seillebensdauer [Hei11]

In einer vom Autor mitbetreuten Studienarbeit [Fra16] wurden Gegenbiegeversuche mit hochmodularen Faserseilen aus Vectran durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Seilkonstruktionen getestet: ein offenes Geflecht und eine Kern-Mantel-Konstruktion mit gelegtem Kern, jeweils mit einem Seildurchmesser von 6 mm. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Versuchen von Heinze wurde nicht die Seilzugkraft, sondern der Achsabstand variiert (Abb. 59).

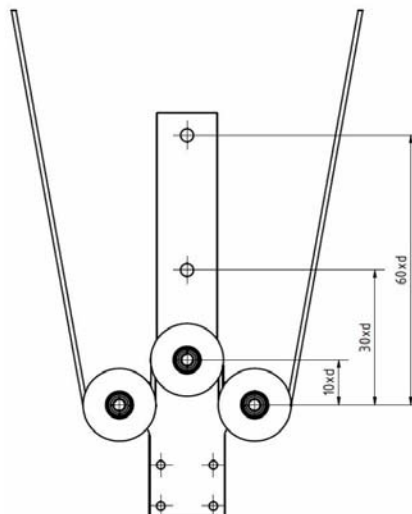


Abb. 59: Versuchsaufbau der Gegenbiegungsversuche von Franck [Fra16]

Die Ergebnisse von Franck [Fra16] zeigten allgemein einen ähnlichen Einfluss wie die von Heinze, wobei der Achsabstand in den Grenzen, in denen er variiert wurde, keinen Einfluss auf die Lebensdauer zeigte Abb. 60. Generell ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer der getesteten Faserseile durch Gegenbiegung um den Faktor 3 reduziert wird.

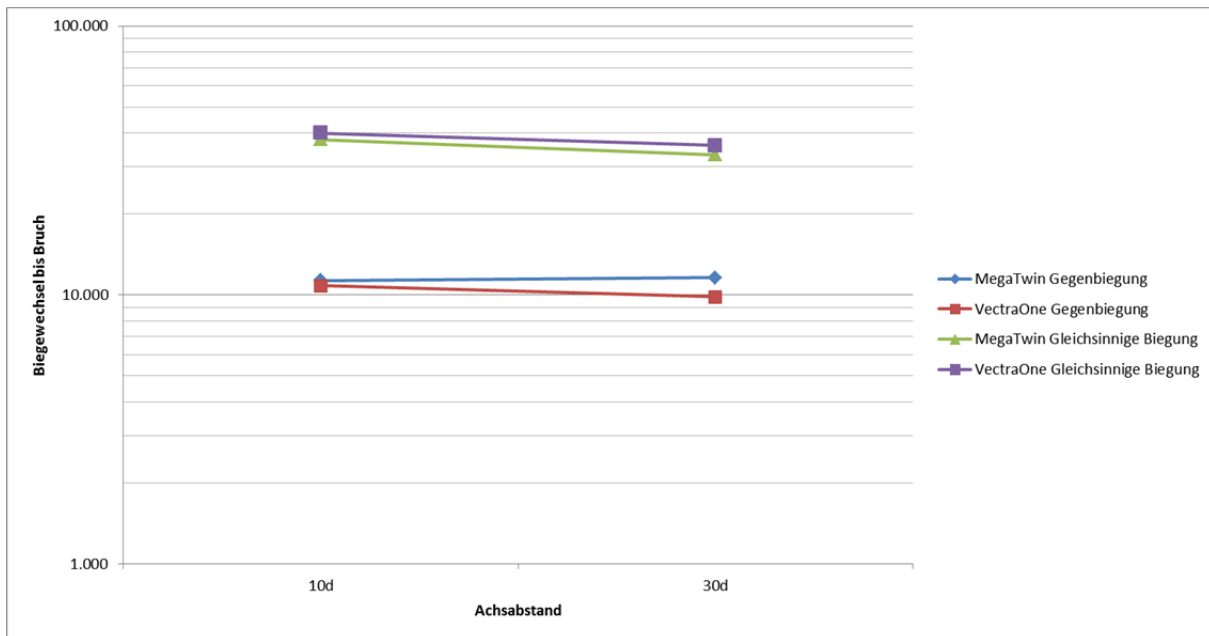


Abb. 60: Ergebnisse der Gegenbiegungsversuche von Franck (nach [Fra16])

Bei **Schrägzug** trifft das Seil nicht im Rillengrund auf die Scheibe, sondern auf der Rillenflanke auf und bewegt sich in einer kombinierten Roll- und Gleitbewegung in den Rillengrund [Sch05]. Dabei wird das Seil verdreht, wobei es zu einer Lastumverteilung im Seilinneren zwischen den einzelnen Litzenlagen kommt. Dies führt zu einer Reduzierung der Seillebensdauer und wurde für Drahtseile gut erforscht [Sch05], für hochmodulare Faserseile sind hingegen keine Untersuchungen verfügbar.

Die **Biegelänge** kann als eine statistische Größe angesehen werden. Fehlstellen, die durch die Faserherstellung und / oder die Seilherstellung bedingt sind, wirken sich Lebensdauerermindernd aus, da an diesen Fehlstellen die Fasern bzw. das Seil bevorzugt reißen werden. Hierbei gilt der Zusammenhang, dass je größer die Biegelänge ist, desto größer die Wahrscheinlichkeit wird, dass Fehlstellen auf dieser Länge vorkommen werden. Externe Untersuchungen zum Thema Biegelänge sind nicht verfügbar. In einer vom Autor mitbetreuten Studienarbeit [Fra16] wurde dieser Einfluss erstmals für hochmodulare Faserseile untersucht. Franck hat dazu vier verschiedene Biegelängen getestet und die oben aufgestellte Vermutung bestätigt. Je größer dabei die Biegelänge ist, desto geringer fällt die Lebensdauer des Faserseiles aus (Abb. 61).

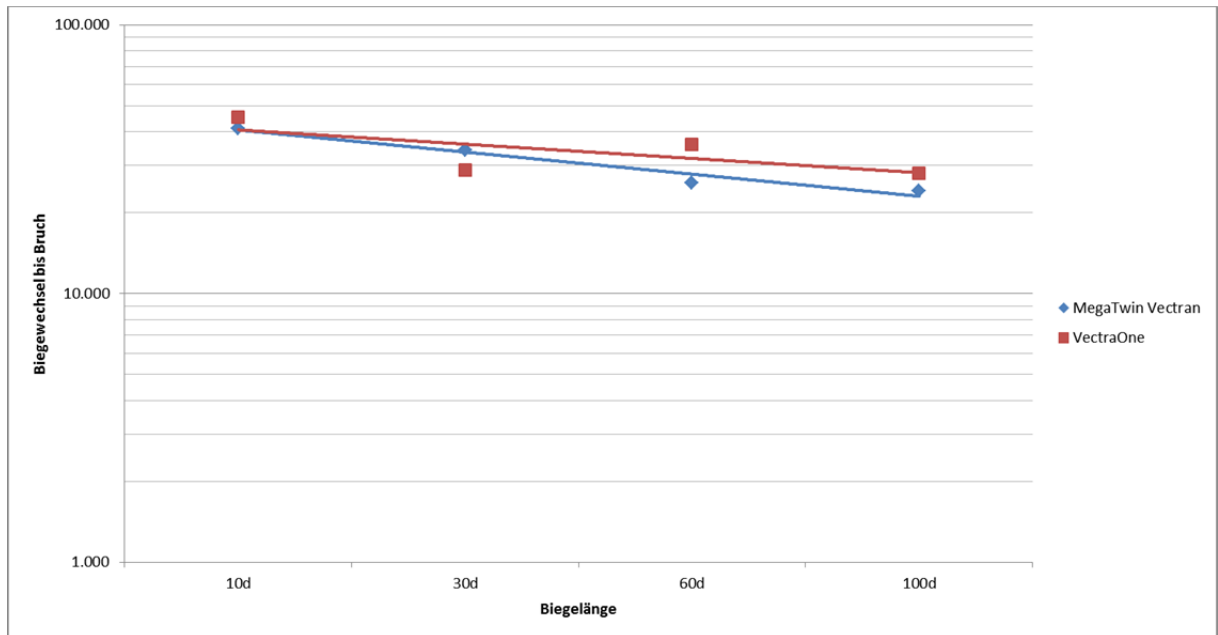


Abb. 61: Ergebnisse der Biegeversuche mit unterschiedlichen Biegelängen von Franck (nach [Fra16])

Der **Umschlingungswinkel** (Abb. 62) hat im Zusammenhang mit der Schlaglänge des Faserseiles einen Einfluss auf die Lebensdauer. Generell kann wie bei Drahtseilen davon ausgegangen werden, dass ein kleiner Umschlingungswinkel dazu führt, dass es ein Pressungsmaximum gibt, da nur eine geringe Anzahl an Litzenkuppen auf der Rille aufliegt. Die durch die Seilzugkraft hervorgerufene Pressung verteilt sich auf die Litzenkuppen und führt bei einer geringen Zahl an auf der Seilrille aufliegenden Litzenkuppen zu einer Erhöhung der spezifischen Pressung.

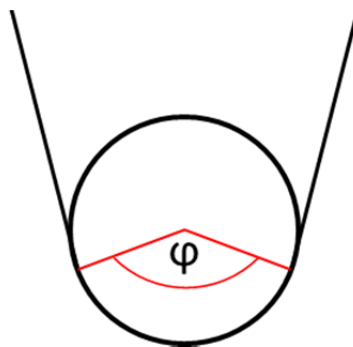


Abb. 62: Umschlingungswinkel um Seilscheibe (nach [Fey15])

Auch hat der Umschlingungswinkel einen Einfluss auf die Lebensdauer aufgrund der Seilsteifigkeit. Beim Auflaufen des Seiles wird das Seil zum einen aus seiner runden Form in eine der Rille ähnliche Form umgeformt und zum anderen wird das Seil aus einer geraden Form um die Seilscheibe gebogen. Beides führt zu einer Erhöhung der inneren Pressungen

und Spannungen. Liegt das Seil auf der Rille auf, reduzieren sich die Spannungen und steigen beim Ablaufen des Seiles von der Scheibe wieder an, wobei nicht der gleiche Wert wie beim Auflaufen erreicht wird (Abb. 63).

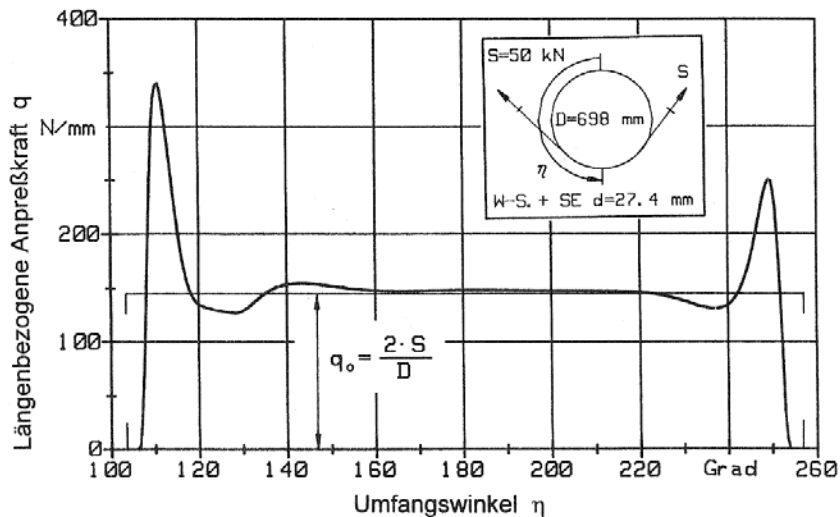


Abb. 63: Längenbezogene Anpresskraft eines Seiles beim Lauf über eine Seilscheibe [Hae95]

Ist der Umschlingungswinkel klein fallen, die beiden Maxima zusammen und ergeben eine signifikante Erhöhung der Pressung die zu einem erhöhten Verschleiß führt.

Für hochmodulare Faserseile gilt, dass je länger die Flechtlänge ist, desto größer der Umschlingungswinkel werden muss, da möglichst viele Litzenkuppen in Berührung mit der Seilrille sein sollten [Vog02-1].

Neben der kumulierten Lebensdauerreduzierung hat die **Anzahl der Seilscheiben**, über die das höchstbeanspruchte Seilstück läuft, einen zusätzlichen Einfluss auf die Seillebensdauer, da die Seilscheibenlagerung dem Seil einen Widerstand im Sinne des Wirkungsgrades der Lagerung bietet. In einer vom Autor betreuten Bachelorarbeit [Kle16] wurde erstmals der Einfluss der Anzahl der Seilscheiben mit hochmodularen Faserseilen aus LCP in einem Durchmesser von 2 mm untersucht. Die Biegeversuche wurden mit zwei und drei Seilscheiben in Reihe und drei Seilzugkräften durchgeführt: einer sehr geringen, einer mittleren, die nahe beim Donandtpunkt lag und einer sehr hohen die über dem Donandtpunkt lag. Die Ergebnisse wurden mit Standardeinfachbiegeversuchen mit einer einzelnen Scheibe verglichen. Bei der geringen und der hohen Seilzugkraft konnte kein signifikanter Einfluss auf die Seillebensdauer festgestellt werden, unabhängig von der Anzahl der Seilscheiben. Bei der mittleren Seilzugkraft konnte ein erheblicher Lebensdauerabfall festgestellt werden, wobei hier, wenn man die Ergebnisse der anderen beiden Seilzugkräfte betrachtet, zu vermuten ist, dass dieser

Abfall nicht durch Verschleiß verursacht worden sein kann. Vielmehr ist zu vermuten, dass der Wirkungsgrad der Seilscheibenlagerung eine Erhöhung der Seilzugkraft zur Folge hatte und dadurch der Donandtpunkt überschritten wurde. Somit sollte wie bei Drahtseilen der Wirkungsgrad der Scheibenlagerung und die Anzahl der Seilscheiben bei der Berechnung der wirkenden Seilzugkraft berücksichtigt werden, wie dies in DIN 15020 Teil 1 [DIN74] aufgeführt ist.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die **Seilzugkraft bzw. das Lastkollektiv**, mit dem das Faserseil beaufschlagt wird. Dabei gilt wie bei Drahtseilen, dass eine Erhöhung der Seilkraft und somit eine Steigerung der Spannungen im Seil und den Fasern zu einer Reduzierung der Seillebensdauer führt. Wie bei Drahtseilen gibt es auch bei hochmodularen Faserseilen eine Grenze, bei deren Überschreitung es zu einem Einbruch der Seillebensdauer kommt [Fey91], [Gru12]. Diese sogenannte Donandtgrenze bzw. Donandtkraft ist abhängig vom Seilwerkstoff und vom D/d-Verhältnis der Seilscheibe. Weiter hat in diesem Zusammenhang der Unterschied zwischen Tot- und Volllast einen Einfluss auf die Seillebensdauer. Je größer dieser Unterschied ist, desto mehr Dehnungs- und Verformungsarbeit muss das Tragmittel beim Anheben bzw. Absetzen der Last leisten. Dabei tritt zum einen im Seilinneren Verschleiß auf, da die einzelnen Litzen aneinander abgleiten. Zum anderen tritt Dehnungsschlupf auf den Seilscheiben auf, dies führt zu Verschleiß auf der Seiloberfläche.

Seilscheibe

Die **Massenträgheit** bzw. der **Schlupf** zwischen der Seilscheibe und dem hochmodularen Faserseil hat aufgrund der dabei auftretenden Abrasion einen Einfluss auf die Seillebensdauer. Der aus der Massenträgheit der Scheibe resultierende Schlupf kann vor allem bei geringen Seilzugkräften auftreten, für den Fall, dass die wirkende Normalkraft und somit die Reibverhältnisse nicht mehr ausreichen, um den Widerstand der Seilscheibenlagerung zu überwinden. Schlupf tritt generell bei Treibscheibenantrieben, wie sie in Aufzügen eingesetzt werden, auf, wie oben beschrieben wenn die Seilzugkraft zu gering ist und zusätzlich durch eine falsch ausgelegte Steuerung des Antriebes. Eine falsch ausgelegte Steuerung kann zu einer zu starken Beschleunigung bzw. zu einem zu großen Ruck beim Anfahren führen. Schlupf ist vor allem bei nicht ummantelten Faserseilen problematisch, da kein schützender Mantel vorhanden ist und direkt die Lasttragenden Fasern angegriffen werden. Untersuchungen hinsichtlich der Seillebensdauer sind nicht verfügbar, Michael [Mic11] hat jedoch die allgemeine Treibfähigkeit hochmodularer Faserseile untersucht.

Das **Material der Seilscheibe bzw. der Rille** hat ebenfalls einen Einfluss auf die Seillebensdauer. Der Einfluss bezieht sich hierbei auf die Erwärmung, für den Fall, dass ein

relativ kurzes Seilstück innerhalb kurzer Zeit mehrfach über eine Scheibe gebogen wird. Dies kann zum Beispiel in Biegeversuchen oder in Heave Compensations in Offshore Kränen vorkommen. Die beim Auflaufen auf die Seilscheibe auftretende Walkarbeit wird in Wärmeenergie umgewandelt. Seilscheiben aus Stahl haben hierbei den Vorteil, dass aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit ($42 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$) die Wärme in die umgebende Struktur schnell abfließen kann. Seilscheiben aus Kunststoff (z.B. Polyamid) weisen eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit ($0,25 - 0,35 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ für Polyamid) auf, weshalb die Wärme aus dem Seil nicht über die Seilscheibe in die Struktur abfließen kann. Es kommt somit zu einem Wärmestau im Seilinneren, wird dabei die Temperaturgrenze des Faserwerkstoffes überschritten, kommt es zu einer erheblichen Reduzierung der Seillebensdauer. Weiter hat die Oberflächengüte der Rille einen signifikanten Einfluss auf die Seillebensdauer. Ist die Rille besonders rau, kann die Lebensdauer erheblich reduziert werden, da die Fasern einem erhöhten Verschleiß ausgesetzt sind (siehe auch folgenden Punkt).

Die **Rauigkeit der Rille** hat vor allem für Seiltriebe einen Einfluss, die Schrägzug oder Seilschlupf aufweisen. Je rauer die Rille ist, desto mehr Abrasion wirkt zwischen der Rille und der Seiloberfläche. Kern-Mantel-Konstruktionen haben dabei den Vorteil, dass der Mantel aus einem Werkstoff bestehen kann, der einen höheren Widerstand gegen Abrasion bietet. Schlarmann [Sch16] gibt eine Rillenrauigkeit von $R_a = 7,62 \mu\text{m}$ an, Liebherr gibt in [Lie12] einen Wert für die Rillenrauigkeit von $R_a \leq 1 \mu\text{m}$ mit einem bevorzugten Wert von $R_a \leq 0,25 \mu\text{m}$ an. Nach Ansicht und Erfahrung des Autors sollte ein Wert von $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ nicht überschritten werden. Dieser Wert gibt einen guten Kompromiss zwischen Lebensdauerverbesserung und Fertigungskosten.

Das **r/d-Verhältnis**, das Verhältnis von Rillenradius r zu Seilnenndurchmesser d , gibt an, wie gut das Faserseil in der Rille gestützt wird, bzw. ob die Rille zu eng für das Seil ist. Wird die Rille zu eng für das Seil ausgewählt, das heißt das r/d-Verhältnis ist kleiner 0,5, kommt es zu überhöhter seitlicher Pressung, was schädlich für das Seil ist. Ein zu groß gewähltes r/d-Verhältnis kann dazu führen, dass das Seil platt gedrückt wird. Hier, ähnlich wie bei der oben beschriebenen erhöhten seitlichen Pressung, kommt es im Seilinneren zu starker Querpressung der einzelnen Litzen und Fasern. Sloan [Slo03] hat Untersuchungen mit drei r/d-Verhältnissen, 0,525, 0,75 und flach (entspricht einem r/d-Verhältnis von unendlich), durchgeführt. Bei dem kleinsten dieser r/d-Verhältnisse konnte dabei die höchste Lebensdauer erreicht werden, wobei nicht genannt wird, von welcher Art das getestete Seil war. In DIN EN ISO 9554 [DIN11-2] wird ein r/d-Verhältnis zwischen 0,55 und 0,575 empfohlen. Heinze [Hei11] hat mit einem geflochtenen Technora-Seil Untersuchungen zu diesem Sachverhalt durchgeführt und dabei einen ähnlichen Zusammenhang, wie er für Drahtseile besteht,

gefunden, (Abb. 64). Bei diesen Untersuchungen wurde die maximale Seillebensdauer bei einem optimalen r/d -Verhältnis von etwa 0,46 erreicht, wobei der Autor die Ansicht vertritt, dass ein r/d -Verhältnis von 0,51 das Optimum darstellt. Bei diesem Wert wird das Seil noch gestützt und vor allem zu Beginn nach dem Auflegen nicht zu stark geklemmt. Dies ist vor allem, für zukünftige Anwendungen, bei denen auch Faserseile verschiedener Hersteller und somit unterschiedlicher Durchmesser-toleranzen eingesetzt werden sollen, wichtig.

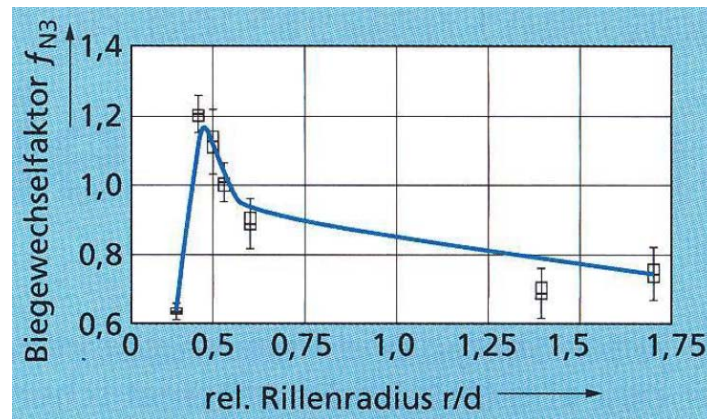


Abb. 64: Einfluss des Rillenradius auf die Seillebensdauer [Hei11]

Das **D/d-Verhältnis**, das Verhältnis von Seilscheibendurchmesser D zu Seilnennendurchmesser d , hat, wie bei Drahtseilen, einen entscheidenden Einfluss auf die Seillebensdauer. In mehreren Arbeiten, die bereits in Kapitel 2.2 vorgestellt wurden, wird dieser Einfluss beschrieben. Wie bei Drahtseilen erhöht sich die Seillebensdauer bei größer werdendem D/d -Verhältnis.

Die **Rillenform** hat in vielen Aspekten einen Einfluss auf die Seillebensdauer. So ist der Öffnungswinkel der Rille im Zusammenhang mit Schrägzug von Bedeutung. Ein größerer Öffnungswinkel führt dazu, dass das Seil später auf die Rillenflanke trifft und bei Schrägzug somit weniger in die Rille hineinrollt. Weiter ist die geometrische Form der Rille, ob rund oder keilförmig, von Bedeutung. Eine keilförmige Rille wird die Seillebensdauer erheblich herabsetzen, wohingegen sich ein Faserseil der Form einer Rundrille gut anpassen kann. Zu der Rillenform wurde von Liebherr Components ein Patent [Lie12] zu Seilscheiben veröffentlicht, das eine Rillenform mit verschiedenen Radien im Rillengrund, also eine eher ellipsoide Form, beinhaltet (Abb. 65). Untersuchungen hinsichtlich der Lebensdauer zu dieser Rillenform sind nicht bekannt.

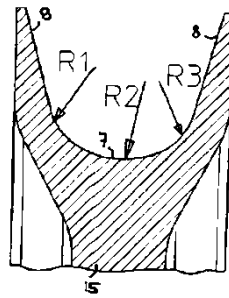


Abb. 65: Rillenform nach Liebherr [Lie12]

Kretschmer [Kre16] hat eine eigene Rillenform entwickelt, die einer Rundrille ähnelt (Abb. 66), wobei keine Angaben gemacht werden, in welcher Hinsicht diese sich geometrisch von einer Standardrundrille unterscheidet.

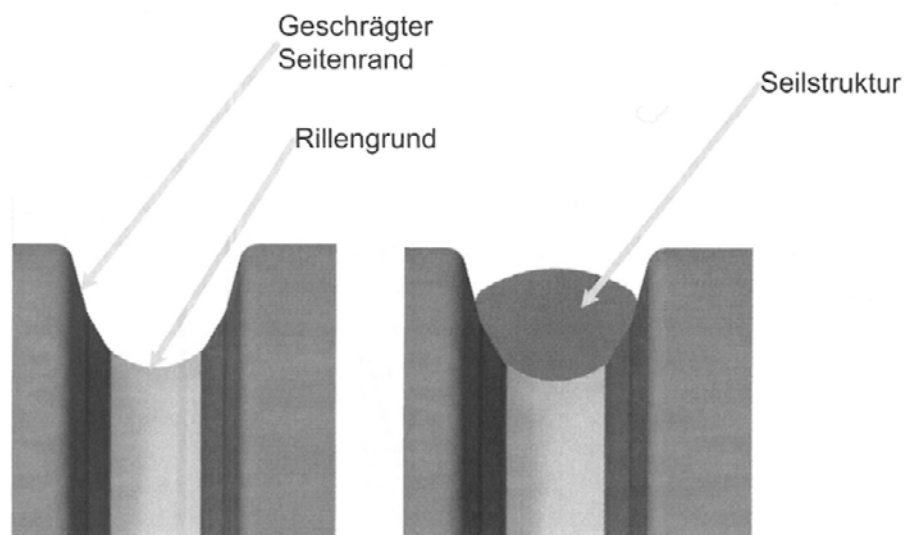


Abb. 66: Rillenform nach Kretschmer [Kre16]

Wie die oben beschriebenen und in Abb. 65 und Abb. 66 dargestellten Beispiele zeigen, ist eine Rundrille aufgrund der Form für Faserseile gut geeignet. Auch nach Ansicht des Autors ist es ausreichend, die Seilrille in Form einer Rundrille auszuführen.

Antrieb

Die **Seilgeschwindigkeit v** hat einen indirekten Einfluss auf die Seillebensdauer in laufenden Anwendungen. Beim Auflaufen des Seiles auf die Seilscheibe wird das Seil ovalisiert, dies erfordert bei hohen Geschwindigkeiten eine entsprechend hohe Verformungsneigung des Faserseiles. Kann sich das Seil nicht in eine entsprechende Lage verformen bzw. verdrehen, kann es zu einer ungleichmäßigen Belastung der Litzen kommen.

Die **Beschleunigung bzw. Verzögerung a** hat bei laufenden hochmodularen Faserseilen einen Einfluss hinsichtlich der Zugschwellbelastung des Tragmittels. In diesem Zusammenhang sind auch die Masse und die Massenträgheit des Lastaufnahmemittels und der Last selbst von Bedeutung. Eine hohe Masse der Last führt aufgrund der Massenträgheit beim Anheben zu einer verzögerten Bewegung der Last. Das Faserseil wirkt dabei wie eine Feder, die sich immer wieder zu- und wieder aufzieht. Dabei kommt es im Seilinneren zu einem Abgleiten benachbarter Litzen und somit zu einem Verschleiß aufgrund von Abrasion. Die beschriebenen Zusammenhänge gelten ebenso für Verzögerungsvorgänge.

Zu den beiden genannten Einflüssen (Geschwindigkeit und Beschleunigung) wurden von Wehr [Weh17] Untersuchungen an geflochtenen und gelegten Vectran-, Technora- und Dyneema-Seilen mit Durchmessern von 2 mm und 6 mm durchgeführt. In Abb. 67 sind die Ergebnisse der Untersuchungen für die 2 mm Seilmuster abgebildet.

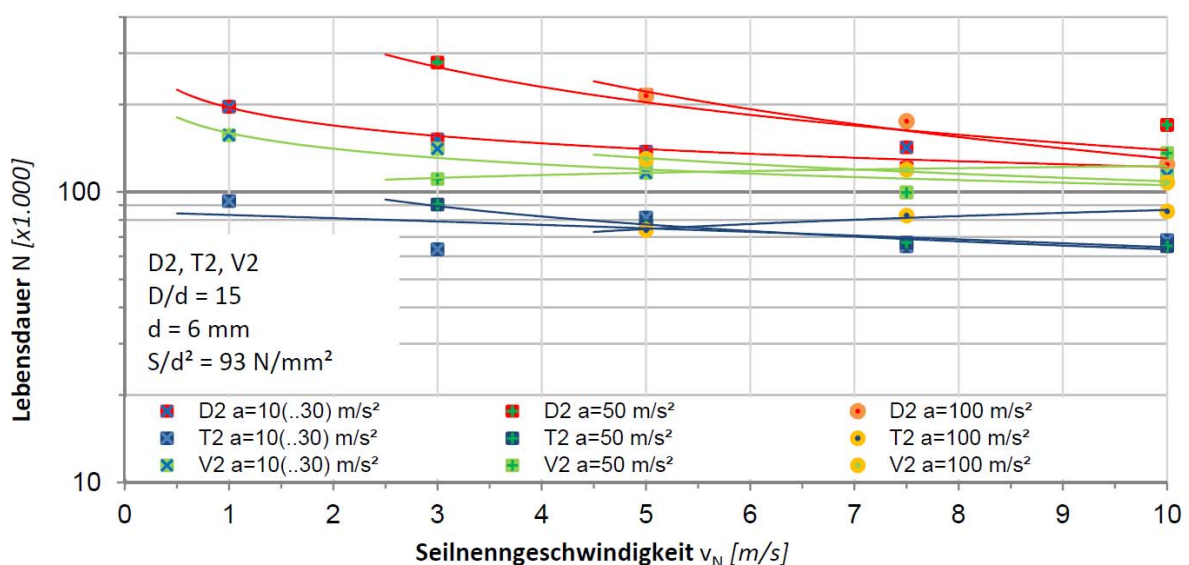


Abb. 67: Einfluss der Beschleunigung und der Geschwindigkeit auf die Seillebensdauer [Weh17]

Dabei konnte festgestellt werden, dass die Beschleunigung und die Geschwindigkeit für das geflochtene 2 mm Dyneema Seil einen Einfluss auf die Seillebensdauer haben. Das geflochtene Technora Seil mit demselben Seildurchmesser weist keinen Einfluss der Geschwindigkeit und Beschleunigung auf die Seillebensdauer auf. Die Seillebensdauern des geflochtenen 2 mm und des geflochtenen 6 mm Vectran-Seiles wiederum weisen keinen Einfluss aufgrund der Beschleunigung auf, sondern nur aufgrund der Geschwindigkeit. Bei der gelegten Kern-Mantel-Konstruktion mit einem Seildurchmesser von 6 mm wird die Seillebensdauer nicht durch die Geschwindigkeit und die Beschleunigung beeinflusst. Die Reduktion der Seillebensdauer ist dabei sehr unterschiedlich. Das 2 mm geflochtene Vectran-

Seil erreichte eine mittlere Restlebensdauer von 27% im Vergleich zu den ebenfalls von Wehr durchgeführten Referenzbiegeversuchen, das 6 mm gelegte Kern-Mantel-Seil aus Vectran hingegen hat eine mittlere Restlebensdauer von 92%.

Der **Ruck j** , die Ableitung der Beschleunigung bzw. Verzögerung a , gibt die Änderung der Geschwindigkeit wieder. Im normalen Betrieb können bei einem zu großen Ruck, wie bereits oben bei dem Einfluss der Beschleunigung bzw. Verzögerung beschrieben, zu einem erhöhten Verschleiß im Seilinneren aufgrund des mit einer Feder vergleichbaren Verhaltens kommen. Einen Sonderfall stellt der Not-Halt dar. Wird dieser plötzlich aktiviert, vor allem bei einer Hubbewegung, kann es aufgrund der Massenträgheit zu einer Weiterbewegung der Last kommen. Dies kann dazu führen, dass das Seil entspannt wird, im Extremfall bis zum Schlaffseil, und die Last in das Seil hineinfällt. Diese „Shock-Load“ kann zu einer Überbelastung und somit zu einem Seilriss führen.

3.1.2 Seilbasierte Faktoren

Der **Reibkoeffizient** eines laufenden hochmodularen Faserseiles hat bezogen auf die Seiloberfläche vor allem in Anwendungen mit Treibscheiben wie zum Beispiel Aufzügen einen Einfluss auf die Seillebensdauer. Im Seilinneren hat der Reibkoeffizient für Verschleißvorgänge zwischen den Litzen und zwischen den Fasern einen Einfluss. Michael **[Mic11]** hat Untersuchungen hinsichtlich der Treibfähigkeit durchgeführt, jedoch keine Aussagen zu der Seillebensdauer gemacht. Der Einfluss eines geringen Reibkoeffizienten zwischen Seiloberfläche und Treibscheibenrinne ist im erhöhten Verschleiß zu sehen, da die Treibscheibe leichter unter dem Seil durchrutschen kann. Im Seilinneren hat ein hoher Reibkoeffizient einen erhöhten abrasiven Verschleiß zur Folge der zwischen den einzelnen Fasern und den einzelnen Litzen auftreten kann.

Wie bereits in den Kapiteln 1.1.1 und 2.1.2 beschrieben, haben die unterschiedlichen **Faserwerkstoffe** einen Einfluss auf die Seillebensdauer. An dieser Stelle sei auf die beiden genannten Kapitel für weitere Informationen verwiesen.

Der **Seildurchmesser d** beeinflusst die Bruchlast des Faserseiles²⁸ und somit die spezifische Belastung des Seiles. Bei Drahtseilen kann ein optimaler Seildurchmesser berechnet werden, der für eine anliegende Belastung die höchste Lebensdauer ergeben wird. Es ist zu vermuten, dass es diesen Zusammenhang auch für hochmodulare Faserseile geben wird, da es sich um keine werkstoffspezifische Fragestellung handelt.

²⁸ Je größer der Durchmesser, desto mehr Material ist über den Querschnitt vorhanden

Die **Seilkonstruktion** gehört ebenfalls zu den Einflussfaktoren hinsichtlich der Seillebensdauer. In vom Autor durchgeführten Untersuchungen [Nov14] wurden geflochtene und gelegte Faserseile aus HMPE und LCP mit den gleichen Parametern im Biegeversuch getestet. Die gelegte Konstruktion aus LCP erreichte hierbei eine im Mittel um ca. 6,1-fach höhere Lebensdauer bis zum Bruch gegenüber der geflochtenen Konstruktion aus dem gleichen Werkstoff. Bei HMPE war die Lebensdauer der gelegten Variante ca. 3,4-fach höher als die Lebensdauer der geflochtenen Konstruktion, siehe dazu auch Kapitel 4.2.

Das **Coating der Fasern bzw. des Seiles** beeinflusst in einem hohen Grad die Seillebensdauer. Mit Hilfe des Coatings können unter anderem Eigenschaften der Grundfasern derart beeinflusst werden, dass negative Einflüsse wie UV-Belastung nicht mehr zu einer Verringerung der Seillebensdauer führen. Auf der anderen Seite kann das Coating die Seillebensdauer aber auch generell erhöhen da es eine Verminderung des Verschleißes bewirken kann. Beim Einsatz von Coatings muss jedoch immer berücksichtigt werden, dass diese Beschichtung im Laufe der Zeit selber verschleissen kann und es somit zum Ende der Seillebensdauer zu einer Beschleunigung des Verschleißes bzw. bei UV-Belastung zu einer erhöhten Degenerierung der Festigkeiten führen kann.

3.1.3 Umweltbasierte Faktoren

Die **chemische Beständigkeit** der hochmodularen Faserwerkstoffe kann als durchweg gut bezeichnet werden. Derombise [Der09] hat in einer Studie Technora Fasern unter verschiedensten Bedingungen getestet und konnte keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften feststellen. Ähnliche Untersuchungen wurden von den Faserherstellern durchgeführt und sind in den Produktdatenblättern (z.B. [Kur10]) zu finden.

Der Einfluss der **Meteorologie** beinhaltet die Gebiete Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung, insbesondere der UV-Strahlung. Die Lufttemperatur in der Umgebung kann derart einen Einfluss haben, dass das Faserseil ohne Belastung bereits eine hohe Temperatur hat und sich somit beim Lauf über die Scheibe durch Walkarbeit noch mehr aufheizen kann. Die Sonneneinstrahlung hat durch die UV-Strahlung einen negativen Einfluss auf die Fasern da die Festigkeit heruntergesetzt wird. Der Einfluss ist bei HMPE eher gering, bei Aramid und LCP ist dieser Einfluss hingegen groß.

Das Vorhandensein von **Wasser** bzw. der Lauf des Faserseiles in Wasser hat einen kühlenden Einfluss aber auch einen Einfluss im Sinne eines Schmiermittels. Die Lebensdauer kann dabei durch Wasser erheblich erhöht werden.

3.1.4 Fazit zu den Lebensdauerbeeinflussenden Faktoren

Erstmalig wurde mit diesem Kapitel eine systematische Zusammenfassung aller Einflussfaktoren auf die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile gegeben und der Wissensstand beschrieben.

Von den oben beschriebenen Faktoren haben die Seilzugkraft und das D/d -Verhältnis einen allgemeingültigen Einfluss auf die Seillebensdauer bei gleichbleibendem Seilwerkstoff und gleichbleibender Seilkonstruktion. Dies spiegelt sich auch in den in Kapitel 2.2 vorgestellten Lebensdauergleichungen und in der Art und Weise wie Biegeversuche durchgeführt werden (siehe Kapitel 3.2). Andere oben vorgestellte Einflüsse, wie zum Beispiel Schrägzug, r/d -Verhältnis etc., werden mittels Korrekturfaktoren für die berechnete bzw. im Versuch ermittelte Seillebensdauer berücksichtigt. Diese Vorgehensweise wird auch für Stahlseile, wie zum Beispiel bei der Formel nach Feyrer, angewendet [Fey15].

3.2 Durchführung von Biegeversuchen

Wie in [Fey15] beschrieben, werden Biegeversuche für Stahlseile und Faserseile unter sogenannten Laborbedingungen mit festgelegten Versuchsparametern, die eine Idealisierung darstellen, durchgeführt. Die Biegeversuche werden meist

- bei Einfachbiegung,
- mit Umgebungstemperatur und trockener Umgebung,
- mit einer Versuchsscheibe mit idealer Geometrie und
- ohne Schrägzug

durchgeführt.

Die im Biegeversuch hinsichtlich der Seillebensdauer hauptsächlich wirkenden Parameter Seilzugkraft und D/d -Verhältnis sind dabei auch die Einflussfaktoren, die in der realen Anwendung die Seillebensdauer maßgeblich beeinflussen.

Sollen die im Biegeversuch ermittelten Lebensdauern bzw. die mit Hilfe von Formeln berechnete oder abgeschätzte Lebensdauer auf reale Seiltriebe übertragen werden, müssen diese mit Minderungsfaktoren korrigiert werden. So können z.B. Gegenbiegung, Schrägzug, andere Umgebungsbedingungen, etc. berücksichtigt werden.

3.3 Das Bestimmtheitsmaß R^2

Für die Bewertung der Güte eines Ergebnisses der multiplen Regressionsrechnung wird das Bestimmtheitsmaß R^2 (auch Konfidenzintervall genannt) herangezogen [Sch09]. Diese Größe ist der Prozentanteil der Varianz des Regressionsergebnisses Y und liegt zwischen 0 bzw. 0 % und 1 bzw. 100 %. Ein Wert von 0 gibt keinen linearen Zusammenhang wieder während 1 einen vollen linearen Zusammenhang wieder gibt. Bei einem nicht linearen Regressionsmodell kann R^2 auch kleiner 0 oder größer 1 sein.

Das Bestimmtheitsmaß wird wie folgt berechnet:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Variation der Residuen}}{\text{Variation von } Y} \quad (7)$$

Das Residuum gibt die Abweichung von einem gewünschten Ergebnis an. Die Variation ist dabei die Schwankung dieses Wertes.

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1 Prüfstände

Die vom Autor durchgeführten Versuche wurden auf den am IFT vorhandenen Biegemaschinen und auf einem am IFT aufgebauten Regalbediengerät durchgeführt.

4.1.1 Biegemaschinen

Für die Biegeversuche wurden die am IFT vorhandenen Biegemaschinen SBM30²⁹ verwendet. Diese Biegemaschinen zeichnen sich durch eine fliegende Lagerung sowohl der Umlenkscheibe als auch der Prüfscheibe und durch einen Einfachhebel³⁰ aus (Abb. 68).



Abb. 68: Biegemaschine SBM30

Der Antrieb erfolgt durch einen Elektromotor, der mittels einer Schubstange die obenliegende Umlenkscheibe bewegt. Die Prüfscheibe, die keine eigene Lagerung aufweist, ist auf einer Nabe, die die Lagerung beinhaltet, montiert und über Laschen mit dem Gewichtshebel verbunden. Der Gewichtshebel besteht bei dieser Maschinenklasse aus einem Einfachhebel mit Gewichtsteller an einem Ende. Über das auf den Gewichtsteller aufgelegte Zusatzgewicht

²⁹ SBM30: Seilbiegemaschine mit einer maximalen Seilzugkraft von 30 kN

³⁰ Gewichtshebel ohne Zwischengelenk, funktioniert nach dem Hebelgesetz

und die Hebelübersetzung wird die benötigte Seilzugkraft eingestellt. Die Prüfmuster werden um die Umlenkscheibe und die Prüfscheibe gelegt und mittels Schraubklemmen auf der Umlenkscheibe fixiert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Prüfmuster nicht verrutscht und die Biegezone definiert belastet werden. Vor dem Versuchsstart werden die Biegezone auf dem Prüfseil markiert. Im vorliegenden Fall wurde eine Biegelänge von 25x Seilnennndurchmesser verwendet, da aufgrund des begrenzten Maschinenhubes keine Doppelbiegung³¹ verwendet werden konnte. Die Geschwindigkeit wurde in den Versuchen so gewählt, dass eine Temperatur auf der Seiloberfläche von 40 °C nicht überschritten wurde. Die Versuche wurden regelmäßig angehalten und der Seildurchmesser in den Biegezone gemessen. Die Versuche wurden bis zum Bruch des Seiles durchgeführt.

4.1.2 Regalbediengerät

Neben Biegeversuchen (siehe Kapitel 4.2) wurden praxisnahe Versuche (siehe Kapitel 4.3) auf einem innerhalb eines AiF-geförderten Forschungsprojektes³² [Ern10] am IFT aufgebauten Regalbediengerätes (RBG) durchgeführt. Das RBG besteht aus einem Mast an dem ein in Schienen geführter Gewichtswagen auf- und abfährt. Die Betätigung erfolgt hierbei durch das Tragmittel, also das hochmodulare Faserseil, das sowohl mit einem Spleiß als auch mit einer Gabelseilhülse an den Gewichtswagen befestigt werden kann. Das Seil läuft über zwei im Mastkopf eingebaute Umlenkscheiben und im rückwärtigen Teil des RBG wieder hinunter zu der dort angebrachten Seiltrommel, auf die das Prüfmuster einlagig aufgespult wird (Abb. 69). Auf der Seiltrommel wird das Prüfmuster mittels Seilklemmen befestigt und mindestens fünf Totwicklungen aufgebracht. Die Seilzugkraft wird über Zusatzgewichte aufgebracht, die in den Gewichtswagen positioniert werden. Der Antrieb erfolgt über einen Getriebemotor, der auf die Seiltrommel wirkt. Der Hub beträgt ca. 8.000 mm (entspricht ca. 500x Seilnennndurchmesser). Der Schrägzug zwischen der einlagig wickelnden Seiltrommel und der folgenden Seilscheibe beträgt maximal 1°. Die Versuche wurden regelmäßig angehalten, um den Seildurchmesser und die zusätzlich aufgespulte Seillänge zu messen.

Die praxisnahen Versuche auf dem RBG ermöglichen es, Versuche über die Laborbedingungen der Biegeversuche hinaus durchzuführen. Die Versuche auf dem RBG zeichnen sich im Vergleich zum Biegeversuch durch höhere Beschleunigungen, höhere Geschwindigkeiten, größere Biegelängen, Trommelwicklung und die durch die Schienenführung hervorgerufenen Schwingungen des Gewichtswagens aus.

³¹ Doppelbiegung bedeutet, dass die Biegezone während einer Kurbelumdrehung der Maschine komplett über die Scheibe fährt, also die Zustände Gerade – Gebogen – Gerade annimmt

³² AiF-Förderkennzeichen 15370 N1 – Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik

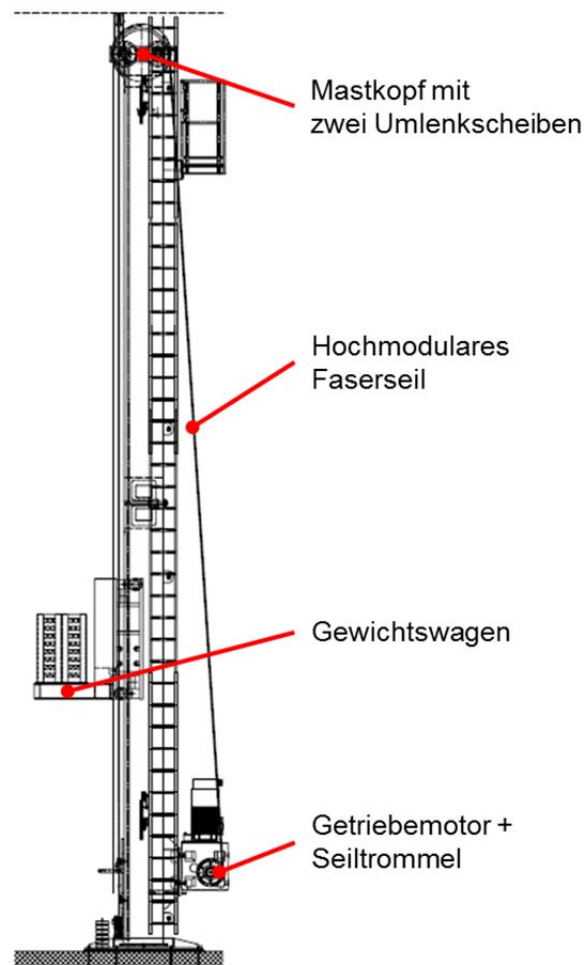


Abb. 69: Seitenansicht des am IFT aufgebauten Regalbediengerätes (Regalbediengerät aus [Dam08], Eintragungen durch Autor)

4.2 Einfachbiegeversuche

Die in dem vom Autor betreuten Forschungsprojekt „Entwicklung eines hochfesten Faserseiles für Regalbediengeräte“ [Nov14] durchgeführten Biegeversuche umfassten hinsichtlich der Parameter eine Variation des Faserwerkstoffes und der Seilkonstruktion, alle anderen Parameter wurden nicht variiert. Hintergrund ist die Zielsetzung des Forschungsprojektes, ein für laufende Anwendungen optimiertes hochmodulares Faserseil zu entwickeln. Das Projekt war in zwei Phasen aufgeteilt. In Phase 1 wurden vom Projektpartner Geo Glestein vier verschiedene Seilmuster hergestellt, zwei geflochtene und zwei gelegte (sog. Wire Rope Construction) mit Mantel jeweils mit LCP³³ und HMPE³⁴ als Kern-Werkstoff. In Phase 2 wurden nur noch Seilmuster in der Wire Rope Construction getestet, da sich diese als am besten

³³ Liquid Crystal Polymer (siehe Kapitel 1.1.1)

³⁴ Hochmodulares Polyethylen (siehe Kapitel 1.1.1)

geeignet erwiesen hat. In Tabelle 5 sind die Parameter der durchgeführten Biegeversuche abgebildet. Mit jedem Prüfmuster wurden drei Biegeversuche durchgeführt.

Tabelle 5: Parameter der im Forschungsprojekt durchgeführten Biegeversuche

Bezeichnung	Einheit	Wert
Seilnenndurchmesser d	mm	16
D/d-Verhältnis	-	20
r/d-Verhältnis	-	0,53
Seilzugkraft S	kN	20
Sicherheitsfaktor SF (LCP)	-	3,2
Sicherheitsfaktor SF (HMPE)	-	2,9

Die vom Seilhersteller ermittelte Bruchlast beträgt 63 kN für das Seilmuster aus LCP und 57 kN für das Seilmuster aus HMPE. Diese wurden als Basis für die Berechnung der Seilsicherheit herangezogen. Die ermittelten Bruchbiegewechselzahlen der LCP und HMPE Seilmuster aus Phase 2 sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Biegeversuche aus Phase 2 für das Prüfmuster in Wire Rope Construction aus LCP und HMPE

Seilwerkstoff	D/d-Verhältnis	Sicherheitsfaktor [-]	Biegewechsel bis Bruch
LCP	20	3,2	3.155.108
			2.569.929
			2.994.662
HMPE	20	2,9	352.648
			425.386
			399.493
WS 8	20	11,5 ³⁵	735.600 ³⁶

Somit konnte gezeigt werden, dass hochmodulare Faserseile eine weitaus höhere Lebensdauer beim Lauf über Scheiben aufweisen können. Im vorliegenden Fall konnte das Seilmuster aus LCP eine im Vergleich zu Drahtseilen um viermal höhere Lebensdauer bei gleichen Parametern erreichen.

³⁵ Bsp.: Casar Turboplast, 16 mm, 1960 N/mm², MBL 229,4 kN

³⁶ Berechnet mit Feyrer-Formel aus [Fey11]

4.3 Praxisnahe Dauerversuche auf Regalbediengerät

Im Rahmen des am IFT durchgeführten und vom Autor betreuten ZIM-Forschungsprojektes wurden praxisnahe Versuche auf einem Regalbediengerät durchgeführt. Diese Versuche hatten zum Ziel den Einfluss auf die Seillebensdauer durch Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge und dem Spulen auf eine einlagige Seiltrommel zu ermitteln. Die Versuche wurden mit denselben Parametern durchgeführt, die bereits bei den Biegeversuchen angewendet wurden. In Tabelle 7 sind die verwendeten Parameter aufgeführt.

Tabelle 7: Parameter der im ZIM-Forschungsprojekt durchgeführten Biegeversuche

Bezeichnung	Einheit	Wert
Seilnenndurchmesser d	mm	16
D/d-Verhältnis	-	20
Seilzugkraft S	kN	20
Sicherheitsfaktor SF	-	3,2
r/d-Verhältnis	-	0,53
Seilgeschwindigkeit v	m/s	1
Beschleunigung/ Verzögerung a	m/s ²	0,8
Hubhöhe h	m	8

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der praxisnahen Versuche des Prüfmusters der Seilkonstruktion Wire Rope Construction in Kombination mit dem Werkstoff LCP aus Phase 2 auf dem Regalbediengerät aufgeführt. Die Ergebnisse sind als Hubspiele bis Bruch angegeben, wobei das Seil pro Hubspiel vier Biegewechsel erfährt.

Tabelle 8: Ergebnisse der praxisnahen Dauerversuche für das Prüfmuster in Wire Rope Construction aus LCP aus Phase 2

D/d-Verhältnis	Sicherheitsfaktor [-]	Hubspiele bis Bruch
20	3,2	125.940
		139.420
		119.670

In Tabelle 9 sind die mittleren Biegewechselzahl aus dem Biegeversuch des Prüfmusters aus LCP in Wire Rope Construction mit der mittleren Hubspielzahl aus dem praxisnahen Dauerversuch desselben Prüfmusters gegenübergestellt. Weiter wurde der Quotient der

beiden Ergebnisse berechnet und angegeben. Dieser Quotient gibt die prozentuale Restlebensdauer des getesteten Faserseiles im praxisnahen Dauerversuch im Vergleich zu den durchgeführten Biegeversuchen an.

Tabelle 9: Quotient der mittleren Biegewechselzahl Biegeversuch und mittlere Hubspielzahl RBG

D/d-Verhältnis	Sicherheitsfaktor [-]	Mittlere Biegewechselzahl bis Bruch im Biegeversuch	Mittlere Hubspielzahl bis Bruch im praxisnahen Dauerversuch	Quotient Biegeversuch/ Praxisnaher Dauerversuch
20	3,2	2.906.566	128.343	0,044

Wie zu erkennen ist, konnte die gute Lebensdauer aus den Biegeversuchen (siehe Tabelle 6) nicht auf die praxisnahen Versuche auf dem RBG übertragen werden und nur eine Restlebensdauer von ca. 4,4 % erreicht werden. Die Gründe sind nach Ansicht des Autors vor allem in der Lebensdauererminderung durch Verdrehung des Seiles aufgrund von Schrägzug zu sehen. Eine vergleichbare Lebensdauerreduktion kann auch bei Drahtseilen festgestellt werden [Sch05]. Die Versuchsmuster wiesen bereits nach einer geringen Anzahl an Hubspielen (ca. 3% der Seillebensdauer bis Bruch) eine erkennbare Verdrehung auf (Abb. 70). Diese Erkenntnis führte zu der Idee einer neuartigen Spulvorrichtung die in Kapitel 6.4 vorgestellt wird.



Abb. 70: Verdrehtes Seil während eines RBG-Versuches

5. Formulierung der Ansätze zur Lebensdauerabschätzung und Auswertung

In Kapitel 2.2 wurden erste Ansätze zur Berechnung der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile diskutiert, die in der Vergangenheit aufgestellt wurden. Wie bereits an genannter Stelle beschrieben ist es nach Ansicht des Autors nur schwer möglich einen Berechnungsansatz, der Allgemeingültigkeit aufweist, aufzustellen. Dies ist vor allem hinsichtlich der Vielzahl an unterschiedlichsten Hauptgruppen an Faserwerkstoffen, z.B. HMPE, mit einer Vielzahl an Untergruppen, wie Dyneema SK75, SK78, DM20, die sich in ihren Eigenschaften unterscheiden in Kombination mit verschiedensten teils anwendungsspezifischen Coatings schwierig.

Im Unterschied zu der von Feyrer am IFT entwickelten Lebensdauerberechnungsformel für Drahtseile **[Fey11]**, wird die hier vorgestellte Methode einen Ansatz wählen, bei dem nicht mit Hilfe einer umfangreichen Versuchsreihe über Jahrzehnte Ergebnisse erzielt und statistisch ausgewertet werden. Für die Aufstellung der Lebensdauerformel von Feyrer wurden über 80 Jahre Biegeversuche mit Standardkonstruktionen, wie zum Beispiel Warrington und Filler, mit unterschiedlichen Seilzugkräften, D/d-Verhältnissen, Seildurchmessern, Nennfestigkeiten usw. durchgeführt. Die so gewonnene Datenbasis wurde statistisch ausgewertet, um die Lebensdauer auch für Drahtseile anderer Seilhersteller und abgewandelter Seilkonstruktionen berechnen zu können. Dies ist vor allem möglich, da es im Bereich der Drahtseile normativ festgelegte Seilkonstruktionen gibt **[DIN08]**. In diesem Normenwerk ist dabei definiert, welche Drahtzahl eine bestimmte Seilkonstruktion haben sollte und wie der innere Aufbau weitestgehend sein sollte. Auf diese Weise sind die Standardkonstruktionen in einem weiten Bereich definiert. Haben jedoch die zu berechnenden Drahtseile eine andere Konstruktion als die von Feyrer herangezogenen Standardkonstruktionen, z.B. 9 oder 10 Litzen statt der standardmäßig verwendeten 6 oder 8 Litzen, können Abweichungen zwischen der im Biegeversuch bestimmten Seillebensdauer und der mit der Berechnungsformel von Feyrer berechneten Seillebensdauer auftreten.

Im Gegensatz zu den Drahtseilen sind im Bereich der hochmodularen Faserseile keine vergleichbaren normativen Festlegungen verfügbar. Den verschiedenen Faserseilherstellern ist es somit möglich ein Faserseil herzustellen, das sich von den Konstruktionen anderer Hersteller in einer Vielzahl von Punkten wie Coating, Faserwerkstoff, usw. unterscheiden kann. Diese Unterschiede sind dabei nur schwer festzustellen, insbesondere beim Coating, das sich wie oben erwähnt von Anwendungsfeld zu Anwendungsfeld unterscheiden kann und, bei sonst gleicher Konstruktion und gleichem Werkstoff, einen signifikanten Unterschied in der Lebensdauer ausmachen kann.

Da es sich, wie in Kapitel 2 gezeigt, um ein hochaktuelles Thema handelt, ist die Aufstellung einer vereinfachten Abschätzungsmethode für laufende hochmodulare Faserseile nötig. Die neuartige Methode soll es dabei ermöglichen mit einem minimalen Versuchsaufwand, vor allem hinsichtlich der Durchführung von zeitintensiven Biegeversuchen, die Seillebensdauer einer spezifischen Konstruktion und eines spezifischen Werkstoffes zu ermöglichen. Anstelle der Durchführung einer Versuchsreihe, die aufgrund ihres Umfangs ggf. Jahre dauern würde, soll es die zu entwickelnde Methode somit ermöglichen, mit einem ersten Abschätzungsansatz die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile, mit der Einschränkung eines größeren Konfidenzintervalles der Ergebnisse (siehe dazu auch Kapitel 3.3) zu bestimmen.

Die Verwendung eines weiter gefassten Konfidenzintervalles ist dabei von untergeordneter Bedeutung, da eine genaue Kenntnis der Seillebensdauer eines bestimmten hochmodularen Faserseiles nicht zwingend notwendig ist. Seile im Betrieb müssen generell regelmäßig inspiziert und bei Erreichung der Ablegereife ausgetauscht werden. Bei der Festlegung der Inspektionsintervalle kann mit der Berechnungsmethode, wie sie hier vorgestellt wird eine erwartbare Lebensdauer abgeschätzt und zur Planung der Intervalle herangezogen werden. Daher besteht keine Notwendigkeit, die Seillebensdauer mit einer sehr hohen Genauigkeit und der damit einhergehenden Komplexität zu berechnen. Die hier erarbeitete neue Vorgehensweise soll als erster Schritt der Bestimmung der Lebensdauer von hochmodularen Faserseilen eine Abschätzung ermöglichen und dadurch einen ersten wissenschaftlichen Weg eröffnen.

5.1 Vorgehensweise zur Entwicklung der neuartigen Methode (3-Punkt-Methode)

Die verwendete Vorgehensweise beinhaltet die Identifizierung der Lebensdauerbeeinflussenden Faktoren, die auf die Seillebensdauer sowohl in der realen Anwendung als auch im Biegeversuch wirken, und damit die Formulierung verschiedener Ansätze zur Lebensdauerabschätzung. Es wird sowohl eine Auswertung für die neue Methode, die eine Berechnung einzelner Lebensdauerpunkte wie in Kapitel 5.2 beschrieben beinhaltet, und eine Auswertung die eine klassische Berechnung mit einfachen Regressionskoeffizienten beinhaltet wie sie auch von Feyrer [Fey15] durchgeführt wurde vorgenommen. Für die erste Auswertung wird eine Auswertesoftware programmiert, mit der eine Vielzahl an Daten effektiv ausgewertet werden kann. Für die einzelnen betrachteten Seilwerkstoffe und -konstruktionen wird der jeweils geeignetste Ansatz ausgewählt. Abschließend werden Minderungsfaktoren angegeben, mit denen die in der Lebensdauerabschätzung gefundenen bzw. die in Versuchen ermittelten Ergebnisse korrigiert

werden können. Dies ist nötig, da, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, die Biegeversuche unter Laborbedingungen durchgeführt werden, die in der Regel nicht den realen Anwendungsfall abdecken.

5.2 Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes

Wie oben beschrieben soll eine Methode entwickelt werden, die es erlaubt mit geringem Versuchsaufwand erste Abschätzungen der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile zu treffen. Dazu werden die im Biegeversuch hauptsächlich wirkenden Einflussfaktoren D/d -Verhältnis, Seilzugkraft und Seildurchmesser in den aufzustellenden Ansätzen berücksichtigt (siehe dazu auch Kapitel 5.3). Diese Faktoren wurden zum Beispiel auch von Feyrer unter anderem für Drahtseile [Fey11] und auch für Faserseile (siehe Kapitel 2.2.1) berücksichtigt. Wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt, hat Vogel mit seinen eher einfachen Ansätzen, bestehend aus einem Parameter und zwei Regressionskoeffizienten, bereits sehr gute Ergebnisse erzielt.

Von Drahtseilen und hochmodularen Faserseilen ist darüber hinaus bekannt, dass deren Lebensdauergeraden in den üblichen Anwendungsbereichen nahezu parallel verlaufen (Abb. 71).

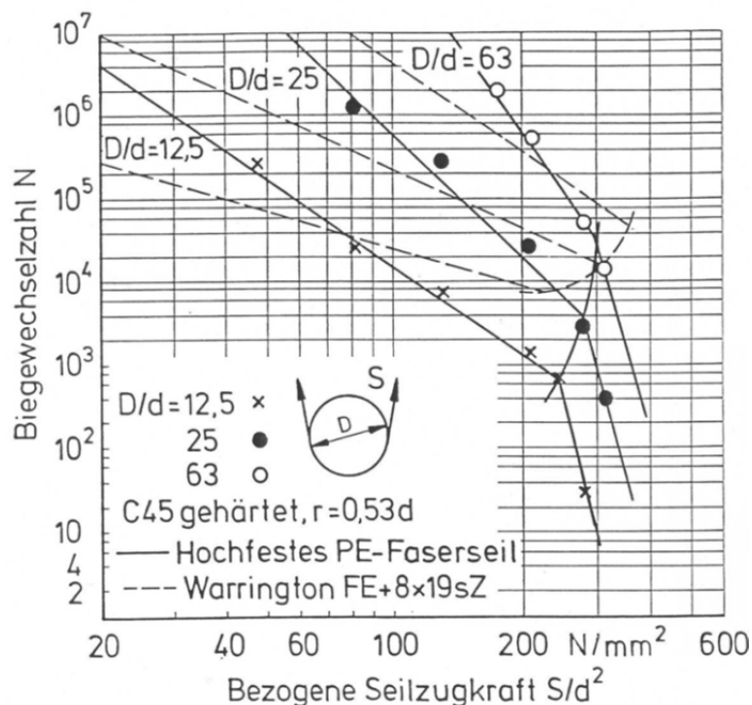


Abb. 71: Lebensdauergeraden eines Drahtseiles und eines hochmodularen Faserseiles [Fey91]

Dazu sollen grundsätzlich Ergebnisse aus drei durchzuführenden Biegeversuchen verwendet werden, die mit zwei verschiedenen D/d -Verhältnissen und zwei bis drei verschiedenen Seilzugkräften bzw. Safety Factors durchgeführt wurden (siehe Tabelle 10 und Abb. 72). Diese Herangehensweise der Versuchsplanung orientiert sich dabei an der fraktionellen faktoriellen Versuchsplanung aus dem Bereich des Design of Experiments (DoE) [Sie10]. Diese beiden Parameter wurden gewählt, da diese die Seillebensdauer in der realen Anwendung maßgeblich bestimmen und darüber hinaus auch im Standardbiegeversuch die hauptsächlichen Parameter sind (siehe auch Kapitel 3.2).

Tabelle 10: Parameterkombinationen der durchzuführenden Biegeversuche

Versuchs-Nr.	1	2	3
D/d -Verhältnis	D/d_1	D/d_1	D/d_2
Safety Factor	SF1	SF2	SF2 oder SF3

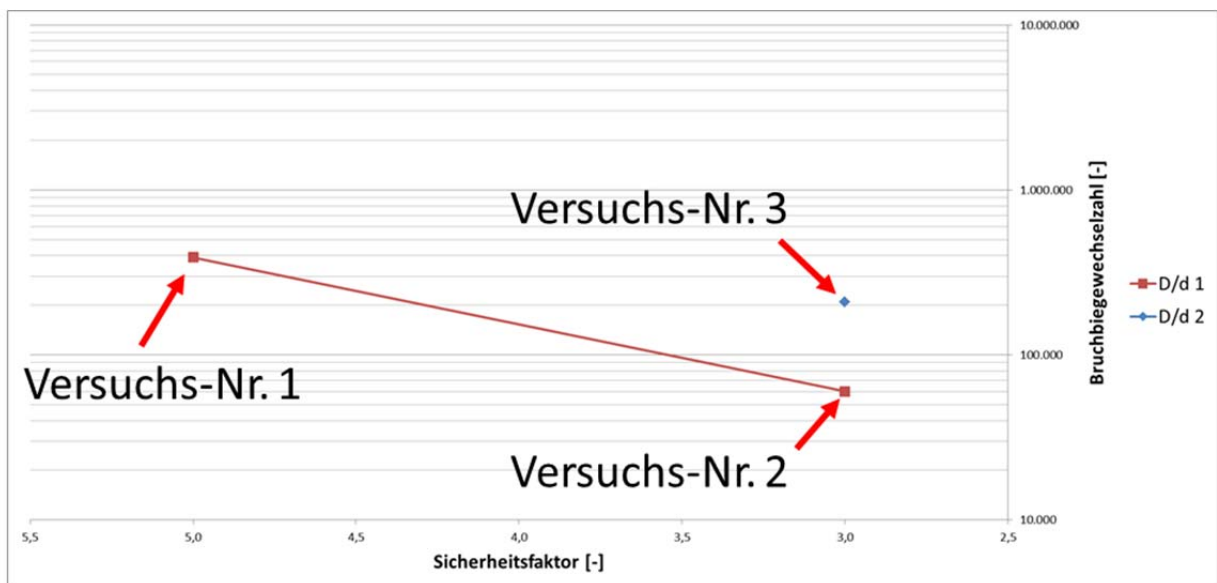


Abb. 72: Ausgangssituation der Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes

Mit diesen drei Lebensdauerpunkten soll es die neuartige Methodik ermöglichen, einen vierten Lebensdauerpunkt zu berechnen (siehe Abb. 73).

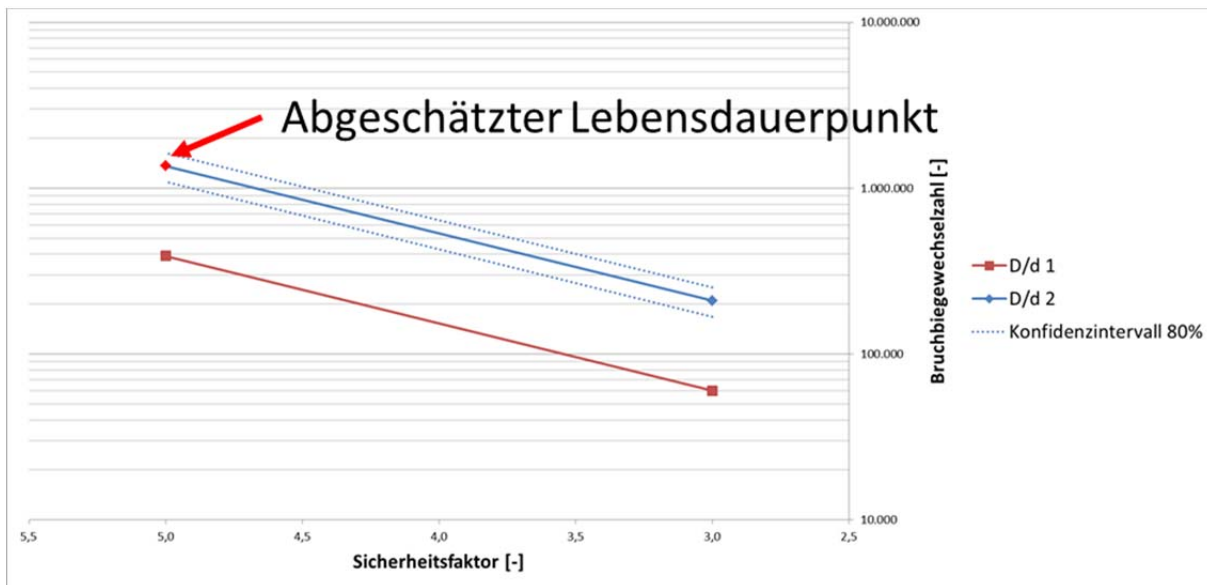


Abb. 73: Ergebnis der Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes

Somit sind für die neuartige Methode drei Lebensdauerpunkte nötig, daher wird diese Methode 3-Punkt-Methode genannt. Theoretisch können diese drei Lebensdauerpunkte in drei einzelnen Biegeversuchen gewonnen werden können. Der Autor empfiehlt jedoch mindestens zwei Biegeversuche pro Punkt durchzuführen, um statistische Einflüsse ausschließen zu können.

Im Falle einer signifikanten Abweichung zweier Ergebnisse aus einem Biegeversuch mit denselben Parametern sollte ein dritter Biegeversuch durchgeführt werden. Vorgeschlagen wird einen dritten Versuch durchzuführen, wenn die Abweichung mehr als 25 % der höheren Biegewechselzahl beträgt. Der Wert von 25 % wurde gewählt, da ein Konfidenzintervall von 80 %³⁷ vorgesehen wurde, also eine Abweichung von 20 %, das mindestens mit der neuartigen Methodik erreicht werden sollte. Ein geringerer Wert für die Abweichung als 25 % wird als nicht sinnvoll angesehen, da ansonsten der Bereich der normalen Streuung der Seile erreicht werden könnte. Dafür wurde auf Erkenntnisse von Feyrer für die Festlegung zurückgegriffen. Bei Drahtseilen gibt Feyrer für Seile der Konstruktion Filler eine Standardabweichung zwischen 19 % und 28 % für die Bruchbiegewechselzahl an [Fey15].

³⁷ Dieser Wert für das Konfidenzintervall wurde auch, wie auf Seite 83 beschrieben, von Vorgängern des Autors genutzt und basiert auf Empfehlungen von Prof. Feyrer

- *Beispiel:*

Lebensdauer Versuch 1.1: 50.000 Biegewechsel

Lebensdauer Versuch 1.2: 70.000 Biegewechsel

25 % von 70.000 Biegewechseln sind 17.500 Biegewechsel

→ *Ein weiterer dritter Biegeversuch muss durchgeführt werden*

In einem ersten Schritt wurden die Lebensdauerbeeinflussenden Faktoren im Biegeversuch identifiziert. Diese sind im Einzelnen:

- D/d-Verhältnis
- Seilzugkraft bzw. Safety Factor
- Seildurchmesser

Für die Berechnung des D/d-Verhältnisses wurde vereinfachend, wie bei Drahtseilen, der Nennseildurchmesser herangezogen.

Um eine Vergleichbarkeit der Lebensdauerergebnisse herzustellen, wurde vom Autor nicht die Seilzugkraft selbst, oder wie bei Drahtseilen die durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2 , herangezogen, sondern der Sicherheitsfaktor, oder Safety Factor, der sich ergibt, wenn man die Mindestbruchlast (MBL), oder wie bei Faserseilen meist üblich, die Wirkliche Bruchlast durch die wirkende Seilzugkraft dividiert.

Da Faserseile bei Belastung eine relativ starke Durchmesserabnahme aufweisen, wird nicht der Nenndurchmesser für die neue Methodik herangezogen, sondern ein relativer Seildurchmesser. Für die Berechnung des relativen Seildurchmessers soll zu Beginn der ohnehin durchzuführenden Biegeversuche jeweils der Seildurchmesser gemessen und durch den Nenn-Seildurchmesser dividiert werden. Wie in Abb. 74 am Beispiel der Messwerte der Seildurchmesser aus den Biegeversuchen von Feyrer und Vogel ersichtlich, bestehen lineare Zusammenhänge zwischen dem Seildurchmesser, dem D/d-Verhältnis und dem Safety Factor.

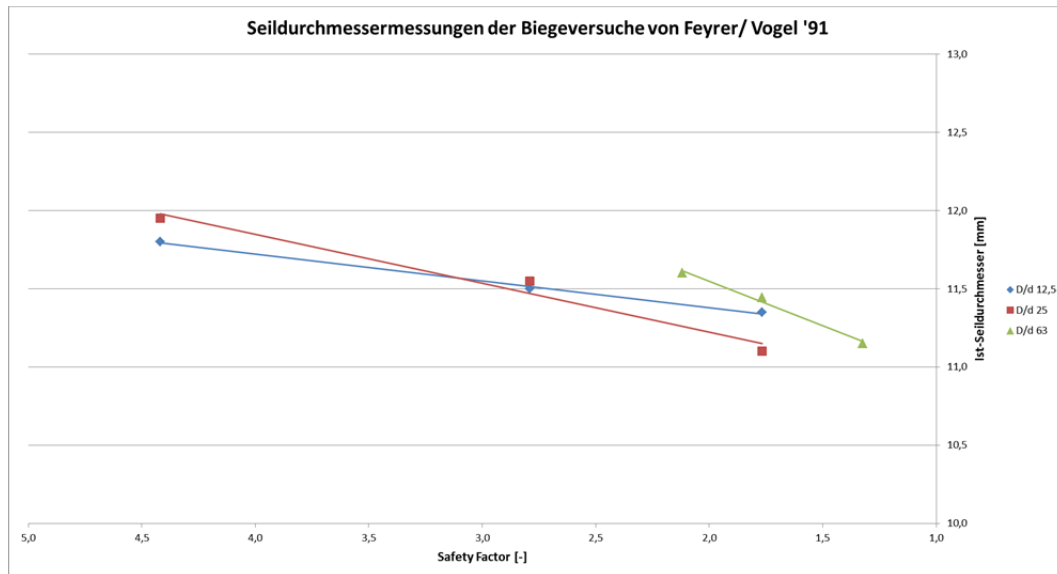


Abb. 74: Verlauf der Ist-Seildurchmesser bei verschiedenen D/d-Verhältnissen und Safety Factors

Die oben genannten drei Faktoren werden im Folgenden zu verschiedenen Ansätzen kombiniert und anschließend ausgewertet und analysiert.

Für die Bewertung der Ansätze wurde vom Autor festgelegt, dass nur Ergebnisse mit einem Konfidenzintervall bzw. Bestimmtheitsmaß (siehe dazu auch Kapitel 3.3) von mindestens 80% berücksichtigt werden sollen. Diese Vorgehensweise wurde zum Beispiel auch von Ernst [Ern12] und Weber [Web13] basierend auf Feyrer [Fey15] herangezogen.

5.3 Formulierung der Ansätze zur Lebensdauerabschätzung

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben bestehen die aufzustellenden Ansätze aus der Kombination dreier Faktoren aus den durchzuführenden Biegeversuchen. Analog zu der Lebensdauerformel von Feyrer [Fey15] wird ein logarithmischer Ansatz verwendet und mit einer linearen Mehrfachregression ausgewertet [Sta71]. Zu Beginn wurden mehrere Ansätze aufgestellt, aus denen nach Vorbetrachtungen zehn Ansätze ausgewählt und näher analysiert und ausgewertet wurden. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, basieren die formulierten Ansätze auf den im Biegeversuch maßgeblichen Einflüssen D/d-Verhältnis, Seilzugkraft und Seildurchmesser.

Die Verwendung dieser drei im Biegeversuch wirkenden Faktoren stellt eine Approximation dar, da die tatsächlich wirkenden physikalischen Faktoren bei hochmodularen Faserseilen nach dem heutigen Stand der Forschung (siehe Kapitel 2 und Kapitel 3) nicht näher spezifiziert werden können. Bei Drahtseilen ist bekannt, dass beim Lauf des Seiles über die Scheibe auf

die Drähte verschiedene Spannungen (primäre und sekundäre Biegespannungen, Sekundäre Zugspannungen, Ovalisierungsspannungen, Torsionsspannungen) und Pressungen (zwischen den Drähten, Litzen und der Scheibe) wirken, die jedoch, mit Ausnahme der primären Biegespannung, nicht näher quantifiziert werden können **[Fey15]**. Daher werden in der Lebensdauerformel nach Feyrer nicht die obengenannten Spannungen und Pressungen angewendet, sondern es werden aus dem Biegeversuch bekannte Parameter verwendet. Generell ist anzunehmen, dass in hochmodularen Faserseilen ähnliche Spannungen und Pressungen wie in Drahtseilen wirken, jedoch ist hier eine Berechnung noch weniger möglich, da die Größe eines Filamentes³⁸ weit geringer ist als ein Draht.

Für die Auswertung der Ansätze wurden die in Kapitel 5.4 aufgeführten Ergebnisse herangezogen. Die in Tabelle 11 aufgeführten Ansätze wurden sowohl mittels einer Auswertung für die neuartige 3-Punkt-Methode als auch in einer klassischen, an Feyrer orientierten, Auswertung untersucht (Erklärungen dazu siehe Kapitel 5.6.1 und Kapitel 5.6.2).

³⁸ Ein Filament ist gleichbedeutend mit einer Faser

Tabelle 11: Aufgestellte Ansätze zur Lebensdauerabschätzung

Ansatz 3	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$	(8)
Ansatz 4	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \frac{1}{\lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]}$	(9)
Ansatz 5	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$	(10)
Ansatz 6	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \frac{1}{\lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]}$	(11)
Ansatz 8	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\frac{\left(D/d\right)}{SF}\right] + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$	(12)
Ansatz 9	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\left(D/d\right) \times SF\right] + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$	(13)
Ansatz 10	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left(\frac{SF}{D/d}\right) + b_2 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)}\right]$	(14)
Ansatz 11	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\frac{\left(D/d\right)}{SF}\right] + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$	(15)
Ansatz 12	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\left(D/d\right) \times SF\right] + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$	(16)
Ansatz 13	$lgN = b_0 + b_1 \times \lg\left[\frac{SF}{\left(D/d\right)}\right] + b_2 \times \lg\left[SF \times \left(d_{ist}/d_{Nenn}\right)\right]$	(17)

5.4 Verwendete Versuchsergebnisse Dritter

Um eine möglichst breite Datenbasis für die Auswertung und Analyse der aufgestellten Ansätze zur Verfügung zu haben, wurden Versuchsergebnisse Dritter aus Veröffentlichungen, unter anderem mit Ergebnissen von Versuchen, die am Institut für Fördertechnik und Logistik durchgeführt wurden, herangezogen. Bei diesen Versuchsergebnissen handelt es sich um Ergebnisse aus Untersuchungen, die bereits in Kapitel 2.2 vorgestellt wurden. Bei allen drei Datensätzen wurde darauf geachtet, dass nur Ergebnisse aus dem Zeitfestigkeitsbereich verwendet wurden und keine aus dem Kurzzeitfestigkeitsbereich, die also über dem Donandtpunkt liegen.

5.4.1 Lebensdaueruntersuchungen Feyrer 1991

Die von Feyrer [Fey91] in seinen Untersuchungen mit gelegten Dyneema SK 60 Seilen ermittelten Lebensdauern konnten direkt aus der Veröffentlichung übernommen werden, siehe Tabelle 12. Von den Autoren wurden darüber hinaus bereits alle Ergebnisse markiert, die über dem Donandtpunkt liegen. Diese Lebensdauerpunkte wurden, wie oben beschrieben, nicht für die eigenen Analysen übernommen.

Tabelle 12: Verwendete Ergebnisse von Feyrer 1991 [Fey91]

Seil- bezeichnung	Seil- konstruktion	Seil- werkstoff	Seil- Ø [mm]	D/d	Seilzug- kraft [kN]	Safety Factor SF	Seil- lebens- dauer	d _{ist} [mm]
Feyrer '91	12er Geflecht mit Mantel	Dyneema SK60	12	12,5	7,0	7,6	280.670	11,80
					12,0	4,4	24.148	11,80
					19,0	2,8	6.400	12,00
					30,0	1,8	1.132	11,35
				25	12,0	4,4	1.300.720	11,95
					19,0	2,8	265.430	11,55
					30,0	1,8	23.215	12,10
				63	25,0	2,1	2.021.190	11,60
					30,0	1,8	539.385	11,45
					40,0	1,3	56.083	11,15

5.4.2 Lebensdaueruntersuchungen Heinze 2013

Um die Möglichkeit zu haben neuere Fasertypen auszuwerten und zu analysieren wurden Ergebnisse aus den Untersuchungen von Heinze [Hei13] herangezogen. In diesem Fall mussten die Ergebnisse allerdings aus Diagrammen interpoliert werden, da keine tabellarische Auflistung veröffentlicht wurde. Auch in diesem Falle wurde darauf geachtet, nicht den Donandtpunkt für die einzelnen Fasertypen zu überschreiten. Die Seildurchmesser wurden ebenfalls nicht angegeben und vom Autor analytisch mit einer Berechnungsformel aus [Mic11] ermittelt. Es wurden Ergebnisse für Dyneema SK 75 (Tabelle 13), Vectran T 97 (Tabelle 14)

und Technora T221 (Tabelle 15) jeweils in einer Kern-Mantel-Konstruktion mit geflochtenem Kern ermittelt.

Tabelle 13: Verwendete Ergebnisse von Heinze für Dyneema SK 75 (nach [Hei13])

Seil-bezeichnung	Seil-konstruktion	Seil-werk-stoff	Seil-Ø [mm]	D/d	Seilzug-kraft [kN]	Safety Factor SF	Seil-lebens-dauer	d _{lst} [mm]
Heinze '13	12er Geflecht mit Mantel	Dyneema SK75	6	12,5	1,6	16,6	56.670	5,44
					1,9	13,9	42.860	5,40
					2,5	10,9	27.500	5,34
					3,0	9,0	18.640	5,29
					3,5	7,7	13.640	5,26
					4,0	6,8	11.360	5,23
					4,1	6,6	10.100	5,23
					4,5	6,1	8.500	5,21
					5,0	5,4	6.600	5,18
					6,0	4,5	5.000	5,14
					11,8	2,3	1.480	5,00
					14,2	1,9	950	4,96
				18	2,5	10,8	66.000	5,34
					3,0	9,0	45.000	5,29
					4,3	6,3	26.150	5,21
					5,0	5,4	18.260	5,18
					5,1	5,3	18.180	5,18
					7,7	3,5	7.250	5,09
					14,0	1,9	2.690	4,96
				25	2,1	12,7	181.818	5,37
					2,6	10,2	118.181	5,32
					3,1	8,6	80.000	5,28
					5,1	5,3	33.333	5,18
					7,7	3,5	14.545	5,09
					9,7	2,8	10.454	5,04
					14,1	1,9	4.250	4,96

Tabelle 14: Verwendete Ergebnisse von Heinze für Vectran T97 (nach [Hei13])

Seil-bezeichnung	Seil-konstruktion	Seil-werkstoff	Seil-Ø [mm]	D/d	Seilzug-kraft [kN]	Safety Factor SF	Seil-lebens-dauer	d _{lst} [mm]
Heinze '13	12er Geflecht mit Mantel	Vectran T97	6	12,5	1,0	31,7	133.333	5,55
					1,6	19,5	80.000	5,44
					2,0	15,7	54.000	5,39
					2,4	13,2	52.000	5,35
					3,0	10,4	43.333	5,30
					3,5	8,9	35.000	5,26
				18	1,6	19,9	400.000	5,44
					2,4	13,0	300.000	5,35
					3,4	9,0	208.333	5,26
				25	2,4	13,2	1.133.333	5,35
					2,6	12,0	1.666.668	5,33
					3,0	10,3	950.000	5,29
					4,6	6,7	833.333	5,20

Tabelle 15: Verwendete Ergebnisse von Heinze für Technora T221 (nach [Hei13])

Seil-bezeichnung	Seil-konstruktion	Seil-werkstoff	Seil-Ø [mm]	D/d	Seilzug-kraft [kN]	Safety Factor SF	Seil-lebens-dauer	d _{lst} [mm]
Heinze '13	12er Geflecht mit Mantel	Technora T221	6	12,5	1,2	27,6	163.934	5,50
					1,6	21,0	60.890	5,44
					2,0	16,2	39.344	5,38
					4,6	7,1	6.792	5,20
					7,3	4,5	2.254	5,10
					10,0	3,3	1.066	5,03
				18	4,1	8,0	81.967	5,22
					5,1	6,5	44.262	5,18
					5,6	5,9	27.672	5,16
					12,3	2,7	2.254	4,99
				25	2,9	11,4	860.656	5,30
					3,5	9,3	426.230	5,26
					5,2	6,4	110.656	5,17
					7,8	4,2	26.639	5,09
					11,7	2,8	5.192	5,00

5.4.3 Lebensdaueruntersuchungen Gerz 2016

Die von Gerz durchgeführten Untersuchungen [Ger15] wurden mit geflochtenen Faserseilen aus Dyneema SK 75 durchgeführt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Verwendete Ergebnisse von Gerz ([Ger15])

Seil-bezeichnung	Seil-konstruktion	Seil-werkstoff	Seil-Ø [mm]	D/d	Seilzug-kraft [kN]	Safety Factor SF	Seil-lebens-dauer	d _{lst} [mm]
Gerz '16	offenes 12er Geflecht	Dyneema SK78	2,5	26	0,58	10,0	386.633	2,25
					1,16	5,0	76.996	2,28
					1,74	3,3	22.494	2,26
				20	0,58	10,0	131.015	2,34
					1,16	5,0	38.301	2,25
					1,74	3,3	14.177	2,24
				15	0,58	10,0	78.685	2,28
					1,16	5,0	17.440	2,25
					1,74	3,3	4.634	2,30

5.5 Programmierung einer Auswertesoftware in NI Labview

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wird eine Auswertung für die neuartige 3-Punkt-Methode und eine herkömmliche Auswertung, die sich an Feyrer orientiert, der formulierten Ansätze durchgeführt. Für die Verifikation und Auswertung der 3-Punkt-Methode mit den umfangreichen Datentabellen, wurde in der Programmierungsumgebung Labview von National Instruments eine Software programmiert. Diese Software erlaubt es, eine Vielzahl an Regressions-Ergebnissen vollautomatisch zu berechnen. Diese Vorgehensweise wird ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit notwendig, um die 3-Punkt-Methode verifizieren zu

können. In einer späteren Anwendung muss der Nutzer diese aufwändige Auswertung nicht mehr vornehmen.

Im Frontpanel³⁹ des Programms werden die beiden D/d-Verhältnisse eingetragen mit denen die Berechnung erfolgen soll und aus einer Auswahlliste kann der zu verwendende Ansatz gewählt werden. Nach der erfolgten Berechnung werden auf der linken Seite des Fensters die Ergebnisse dargestellt, die in einem weiteren Schritt analysiert werden.

Das Blockdiagramm des Programms umfasst den Programmablauf. Hier werden die einzelnen Schritte zur Datenverarbeitung der lokalen Auswertung programmiert, die beim Start des Programms abgearbeitet werden. So kann zum Beispiel eine lineare Mehrfachregressionsrechnung implementiert werden, die für den kompletten eingelesenen Datensatz die Regressionskoeffizienten berechnet und ausgibt.

Für die Auswertung der 3-Punkt-Methode werden zuerst 3er-Ergebnisblöcke mit Kombinationen aus zwei kleinen D/d's und einem größeren D/d mit verschiedenen Safety Factors analog zu der oben beschriebenen neuen Methodik zusammengestellt. Für diese 3er-Blöcke (siehe Abb. 75) werden Regressionskoeffizienten berechnet, mit denen in einem anschließenden Schritt für eine gegebene Parameterkombination aus Safety Factor und D/d-Verhältnis ein vierter zusätzlicher Punkt für den jeweiligen 3er-Block berechnet wird. Somit besteht dann ein Block aus vier Ergebnissen: drei Ergebnisse aus Biegeversuchen und ein Ergebnis aus der Berechnung (4er-Block) (siehe Abb. 75). In einem weiteren Schritt werden Blöcke aus vier Ergebnissen aus Biegeversuchen gebildet, mit denen das Bestimmtheitsmaß des berechneten Ergebnisses aus der Regression berechnet wird. Die Ergebnisse für das Bestimmtheitsmaß werden abschließend automatisch nach Microsoft Excel zur weiteren Auswertung exportiert, z.B. zur Erstellung von Diagrammen wie in Abb. 77.

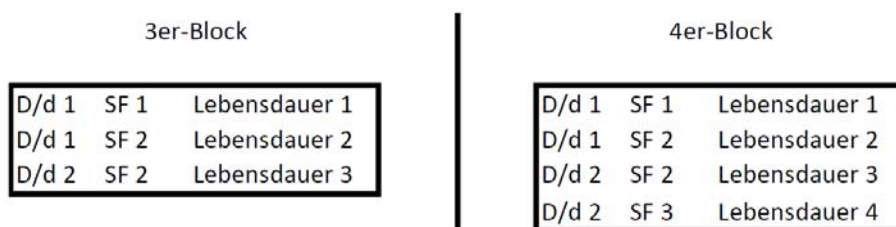


Abb. 75: Beispiele für 3er- und 4er-Blöcke

³⁹ Eingabeoberfläche

Im Folgenden ist das Ablaufdiagramm, nach dem die Auswertesoftware arbeitet, abgebildet (Abb. 76).

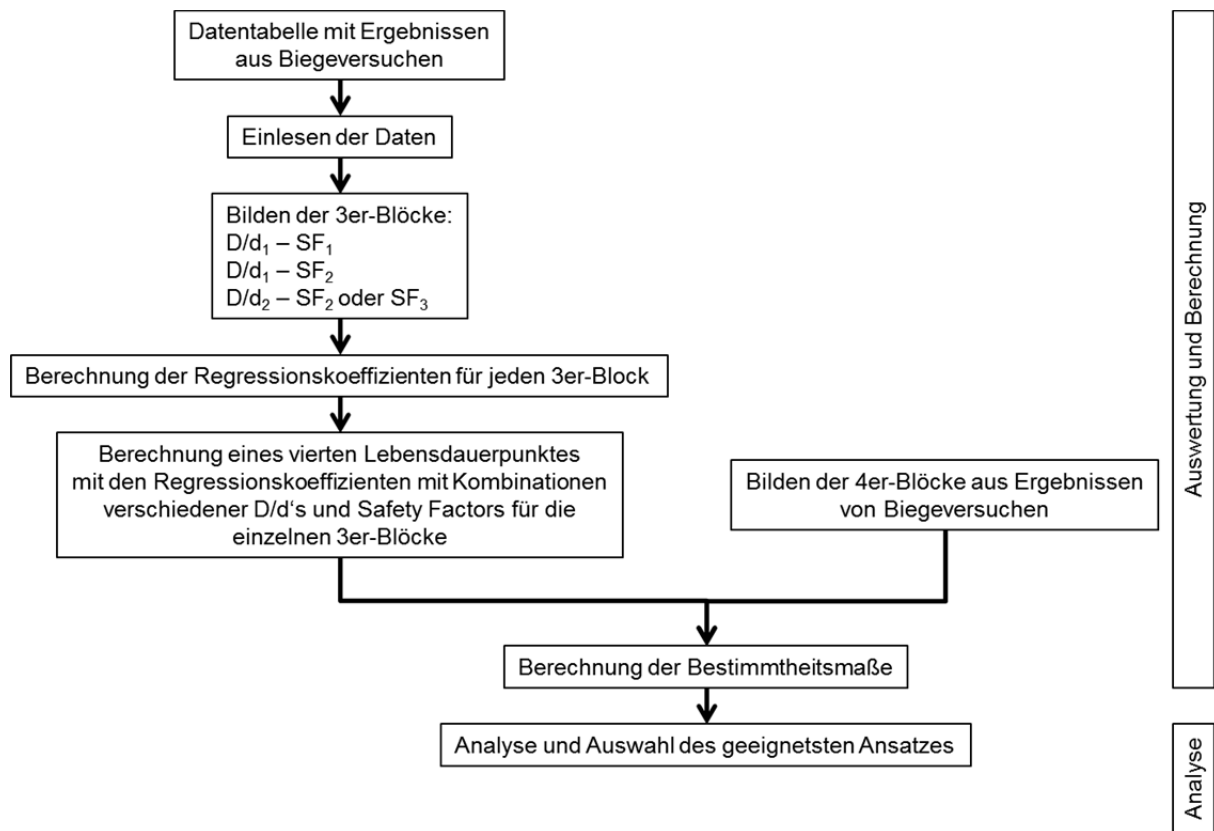


Abb. 76: Ablaufdiagramm der Auswertung

5.6 Auswertung der formulierten Ansätze

Wie bereits mehrfach beschrieben, werden eine zwei verschiedene Auswertungen durchgeführt. Die Auswertung der 3-Punkt-Methode beinhaltet die neuartige Methode zur Bestimmung der Lebensdauer aus drei durchgeführten Biegeversuchen. Die zweite, herkömmliche Auswertung orientiert sich an der „klassischen“ Auswertung, wie sie auch von Feyrer für dessen Lebensdauerformel verwendet wurde.

5.6.1 Auswertung der 3-Punkt-Methode

Für die Auswertung der 3-Punkt-Methode (siehe Kapitel 5.1) wurde das in Kapitel 5.5 beschriebene Auswerteprogramm verwendet. Für jeden Ansatz wurden Auswertungen hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes mit der oben beschriebenen Methodik durchgeführt. In Abb. 77 ist ein Beispiel für eine Auswertung des Datensatzes von Gerz (siehe Kapitel 5.4.3) abgebildet.

Datensatz: Gerz
 D/d: 15/ 20
 Seilwerkstoff: Dyneema SK78
 Ansatz: 11

		Prognose												
		D/d			15			20			26			
Versuch	15/ 15/ 20	SF	10	5	3,3	10	5	3,3	10	5	3,3	10	5	3,3
		10 5 10												
		10 5 5												
		10 5 3,3												
		10 3,3 10												
		10 3,3 5												
		10 3,3 3,3												
		5 3,3 10												
		5 3,3 5												
		5 3,3 3,3												

Bestimmtheitsmaß außerhalb Bereich

Bestimmtheitsmaß $0 < R^2 < 0,499$

Bestimmtheitsmaß $0,5 < R^2 < 0,799$

Bestimmtheitsmaß $0,8 < R^2 < 1$

Keine Daten

Werte wurden im Versuch abgeprüft

Abb. 77: Ergebnistabelle einer lokalen Auswertung am Beispiel der Ergebnisse von Gerz, Erklärung: farbige Rahmen markieren Referenzen im Text unten

Auf der linken Seite sind die für die Abschätzung und im Biegeversuch verwendeten D/d-Verhältnisse aufgetragen, zusammen mit den Safety Factors (SF) aus den Biegeversuchen. Im oberen Bereich sind die für die Abschätzung (Prognose) verwendeten D/d-Verhältnisse und die dazugehörigen Safety Factors aufgetragen. Mit diesen Kombinationen wurde untersucht, mit welcher Prognosegenauigkeit (also Bestimmtheitsmaßen) ein Lebensdauerpunkt berechnet werden kann. Die berechneten Bestimmtheitsmaße wurden in drei Kategorien, unter 50 % Prognosegenauigkeit (Orange), zwischen 50 % und 80 % Prognosegenauigkeit (Gelb) und darüber (Grün), eingeteilt. Für die Auswertung und Analyse wurden nur die Ergebnisse herangezogen, die eine Prognosegenauigkeit von 80 % und mehr (Grün) aufwiesen. Da die Berechnung der Bestimmtheitsmaße automatisch erfolgte, wurden auch für bereits in den drei durchzuführenden Biegeversuchen ermittelte Lebensdauerpunkte die Bestimmtheitsmaße berechnet. Diese wurden nicht für die weitere Auswertung und Analyse berücksichtigt und sind in Abb. 77 mit einer Diagonalen Linie durchgestrichen.

Beispielhaft sei hier die erste Zeile der Ergebnisdarstellung erklärt. Die Abschätzung wurde in dieser Zeile für die Safety Factor 10 und 5 für ein D/d-Verhältnis von 15 in Kombination mit einem Safety Factor von 10 für das D/d-Verhältnis von 20 berechnet. Die Abschätzung wurde für alle drei in den Biegeversuchen von Gerz verwendeten D/d-Verhältnissen von 15, 20 und 26 und allen drei verwendeten Safety Factors von 10, 5 und 3,3 durchgeführt. Für die ersten beiden Safety Factors 10 und 5 für ein D/d-Verhältnis von 15 wurde mit diesem Ansatz keine Lösung gefunden (Orangefarbener Rahmen in Abb. 77). Dies bedeutet, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 nicht zwischen 0 und 1 liegt (siehe auch Kapitel 3.3). Dies ist mathematisch darauf zurückzuführen, dass die Lebensdauerpunkte in diesem Bereich nicht einer logarithmischen Verteilung entsprechen, den dieser spezifische Ansatz darstellt. Erst mit einem Safety Factor von 3,3 für ein D/d-Verhältnis von 15 konnte eine Lebensdauer mit einem Bestimmtheitsmaß von 80% und mehr bestimmt werden (Gelber Rahmen in Abb. 77). Für ein D/d-Verhältnis von 20 konnte für keinen der Safety Factors eine Lösung für diesen Ansatz berechnet werden (Blauer Rahmen in Abb. 77). Bei einem D/d-Verhältnis von 26 konnte für einen Safety Factor von 10 ein Lebensdauerpunkt berechnet werden, allerdings bei einer Prognosegenauigkeit von unter 50% (Roter Rahmen in Abb. 77). Für die beiden anderen Safety Factors dieses D/d-Verhältnisses konnten keine Lösungen gefunden werden (Grüner Rahmen in Abb. 77).

Für die Auswertung und Analyse welcher Ansatz für welchen Seiltyp, also vor allem die Kombination die Seilkonstruktion und dem Seilwerkstoff, am geeignetsten ist, wurden die Bestimmtheitsmaße der niedrigen Sicherheitsfaktoren herangezogen. Im Beispiel in Abb. 77 sind dies die letzten drei Zeilen mit den Kombinationen der Sicherheitsfaktoren 5 und 3,3 für das D/d-Verhältnis von 15 mit den Sicherheitsfaktoren 10, 5 und 3,3 für das größere D/d-Verhältnis von 20 (Lila Rahmen in Abb. 77).

In Abb. 78 ist der Ergebnisplot für das in Abb. 77 abgebildete Beispiel für die Daten von Gerz abgebildet. Hier sei angemerkt, dass in dem Ergebnisplot nur die Ergebnisse der niedrigen Safety Factors dargestellt sind, auf deren Basis die Analyse und Bewertung der Ansätze erfolgte. Der Ergebnisplot gibt einen Überblick über die Zusammenhänge der Ergebnisse (Bestimmtheitsmaße) in Abhängigkeit der Safety Factor der Versuche und den Safety Factor der Abschätzungen.

- Beispiel für den in Abb. 78 eingetragenen Punkt:

Die Safety Factors 5; 3,3 (beide mit $D/d = 15$) und 3,3 ($D/d = 20$) aus Biegeversuch, ergeben ein Bestimmtheitsmaß von 80 % und mehr mit der neuartigen Abschätzungsmethode bei einem Safety Factor von 3,3 und einem D/d von 26

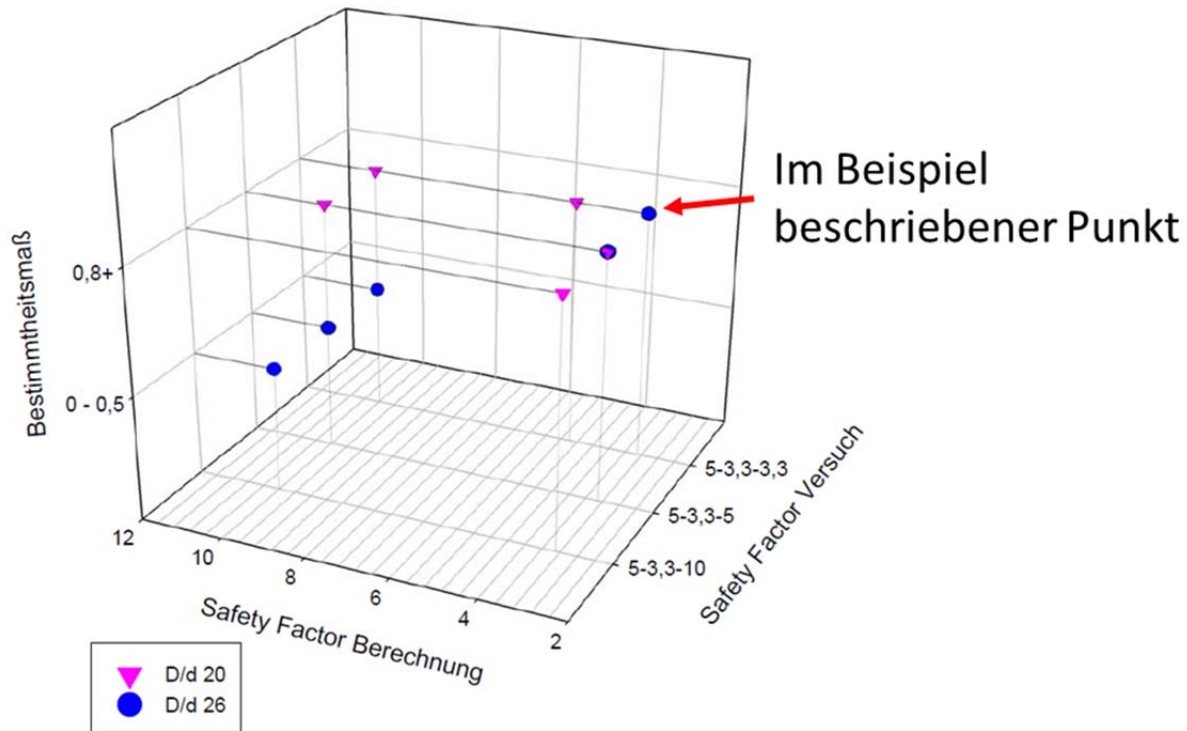


Abb. 78: Ergebnisplot für das Beispiel aus **Abb. 77**

Die Auswertung der in Tabelle 11 aufgeführten Ansätze erfolgte mit dem in Kapitel 5.5 beschriebenen Programm. In Tabelle 17 sind für die verschiedenen Datensätze die am besten geeigneten Ansätze aufgeführt. Mit diesen Ansätzen wurden für die höchste Kategorie der Bestimmtheitsmaße von, 80% Prognosegenauigkeit und mehr, die meisten Ergebnisse erzielt.

Tabelle 17: Aufstellung der am besten geeigneten Ansätze der lokalen Auswertung

Seilwerkstoff	Seilkonstruktion	Datensatz	Ansatz
Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantel Konstruktion mit geschlagenem Kern	Feyrer 1991	6
Dyneema SK 75	Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern	Heinze 2013 Dyneema	6
Dyneema SK 78	Offenes 12er Geflecht	Gerz 2015	11
Technora T221	Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern	Heinze 2013 Technora	6
Vectran T97	Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern	Heinze 2013 Vectran	13

In Anhang A1 sind die Ergebnisdarstellungen und Ergebnisplots für die am besten geeigneten Ansätze der jeweiligen Datensätze aufgeführt.

Da es für jeden Ansatz eine Vielzahl an Regressionsfaktoren gibt (für das Beispiel in Abb. 77 sind dies allein 81 Regressionssätze) und Bestimmtheitsmaße (für das Beispiel in Abb. 77 sind dies allein 81 Bestimmtheitsmaße) werden diese hier nicht angegeben. In Anhang A2 sind für das Beispiel aus Abb. 77 für diesen einzelnen Ansatz die Bestimmtheitsmaße aufgeführt.

In Kapitel 5.7 werden die Grenzen der Methode und der oben aufgeführten Ansätze diskutiert.

Zur Überprüfung der Richtigkeit der durchgeführten automatischen Berechnung der Bestimmtheitsmaße der aufgestellten neuartigen Ansätze wurde mit Daten des Datensatzes Feyrer 1991 eine manuelle Nachrechnung des Ansatzes 3 (Formel (8)) und des Ansatzes 4 (Formel (9)) durchgeführt. Zur Aufwandsminimierung wurden mit Ansatz 3 zwei verschiedene Lebensdauerpunkte, mit Ansatz 4 ein einzelner Lebensdauerpunkt berechnet. Es wurden die Bestimmtheitsmaße der automatischen Berechnung mit der in Labview programmierten Software mit der Handrechnung, unter Zuhilfenahme des Computeralgebrasystems wxMaxima, mit denselben Parametern miteinander verglichen. Für den Ansatz 3 ergab sich eine Differenz von 0,094 bzw. 0,058 und für den einzelnen Lebensdauerpunkt bei Ansatz 4 eine Differenz von 0,171. Diese Differenzen können auf unterschiedliche Rundung während

der Berechnung und bei Unterschieden bei der Matrizenmultiplikation der verwendeten Programme zurückgeführt werden. Die geringen Abweichungen zeigen somit eine Gültigkeit der durchgeführten automatischen Auswertung der Ansätze.

5.6.2 Herkömmliche Auswertung mit großer Datenbasis

Zusätzlich zu der zuvor beschriebenen Auswertung der 3-Punkt-Methode der aufgestellten Ansätze wurde eine herkömmliche Auswertung (siehe Kapitel 5.1) durchgeführt. Damit sollte untersucht werden, in wie weit mit den im Vergleich zu Feyrer **[Fey91]** und Heinze **[Hei13]** relativ einfach aufgebauten Ansätzen der neuartigen Methode aus Kapitel 5.3 größere Datensätze (mindestens neun Lebensdauerpunkte) auch ausgewertet werden können. Diese herkömmliche Auswertung wird in einer Art durchgeführt, die der Herangehensweise von z.B. Feyrer, folgt und alle Ergebnisse eines Datensatzes für die Regression heranzieht. Auch für diese herkömmliche Auswertung wird der jeweils passendste Ansatz (Tabelle 11) benannt und die Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße aufgeführt.

Dazu wurden für jeweils einen Datensatz die Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße für alle Ansätze berechnet. Die Ansätze mit den höchsten Bestimmtheitsmaßen R^2 für die einzelnen Datensätze und die dazugehörigen Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Aufstellung der am besten geeigneten Ansätze der herkömmlichen Auswertung

Seilwerkstoff	Seilkonstruktion	Datensatz	Ansatz	R²	b₀	b₁	b₂
Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantel Konstruktion mit geschlagenem Kern	Feyrer 1991	11	0,971	-2,3675	8,1413	4,0529
Dyneema SK 75	Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern	Heinze 2013 Dyneema	8	0,998	-0,4755	4,3872	2,3052
Dyneema SK 78	Offenes 12er Geflecht	Gerz 2015	8	0,997	-1,0237	5,2117	2,7916
Technora T221	Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern	Heinze 2013 Technora	4	0,977	1,7272	4,1163	-1,9678
Vectran T97	Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern	Heinze 2013 Vectran	5	0,996	-1,4377	4,7360	0,8992

Somit können mit diesen Ansätzen Prognosegenauigkeiten von 97,1% und mehr erreicht werden.

Abschließend wurde eine herkömmliche Auswertung der Ansätze aus Tabelle 17 durchgeführt, die in der Auswertung der 3-Punkt-Methode als am besten geeignet bestimmt wurden. Wenn man dazu in der Auswertung der 3-Punkt-Methode (Kapitel 5.6.1) den Datensatz Feyrer 1991

betrachtet, dann ist der Ansatz 6 (Tabelle 17) am besten geeignet und nicht Ansatz 11, der in der herkömmlichen Auswertung als am besten geeignet gefunden wurde. Daher wurden die Ansätze, die sich in der Auswertung der 3-Punkt-Methode als am besten geeignet herausgestellt haben, in der herkömmlichen Auswertung weiter analysiert und untersucht. In Tabelle 19 sind die Bestimmtheitsmaße R^2 und die Regressionskoeffizienten der herkömmlichen Auswertung für die einzelnen Ansätze aufgeführt.

Tabelle 19: Bestimmtheitsmaße und Regressionskoeffizienten für die einzelnen Datensätze und Ansätze der Auswertung der 3-Punkt-Methode bei herkömmlicher Auswertung

Datensatz	Ansatz	R^2	b_0	b_1	b_2
Feyrer 1991	6	0,874	0,9307	3,6062	-0,2872
Heinze 2013 Dyneema	6	0,911	2,3164	2,0915	-0,3562
Gerz 2015	11	0,985	-0,5379	5,1204	2,8191
Heinze 2013 Technora	6	0,961	1,2485	3,9731	-1,1488
Heinze 2013 Vectran	13	0,996	-0,9972	5,4444	-4,7360

Somit können selbst mit den in der Auswertung der 3-Punkt-Methode als am besten geeignetsten Ansätzen (siehe Tabelle 17) gute Ergebnisse von 87,4% und mehr in der herkömmlichen Auswertung erreicht werden. Damit konnte durch die herkömmliche Auswertung der am besten geeigneten Ansätze aus der lokalen Auswertung gezeigt werden, dass die Ansätze aus der Auswertung der 3-Punkt-Methode in einer herkömmlichen Auswertung verwendbar sind.

5.7 Diskussion der neuartigen Methode und der Grenzen und Limitierungen

Bei der durchgeführten Analyse der verschiedenen Ansätze und den Ergebnissen für die einzelnen Datensätze konnte festgestellt werden, dass es grundsätzlich möglich ist mit der in Kapitel 5.2 vorgestellten neuartigen Methode eine erste Abschätzung der Lebensdauer eines hochmodularen Faserseiles für einzelne Punkte durchzuführen.

Die nachfolgenden Beobachtungen wurden auf Basis der ermittelten Ergebnistabellen für die Auswertung der 3-Punkt-Methode mit 969 Ergebnissen, wie beispielhaft in Abb. 77 abgebildet, durch deren Analyse und Bewertung herausgearbeitet.

Datensatz Feyrer 1991 – Dyneema SK 60 – Ansatz 6

- Für das kleinere D/d-Verhältnis sollten die verwendeten Safety Factors 1 und 2 nicht mehr als das Doppelte auseinander liegen, da sonst keine sicheren Ergebnisse erzielt werden.
- Die Verwendung des gleichen Safety Factors 2 für das größere D/d-Verhältnis ergibt für die Berechnung keine Vorteile. Es kann also ein unabhängiger Safety Factor 3 gewählt werden.
- Für größere, auch nicht im Biegeversuch geprüfte⁴⁰, D/d-Verhältnisse können gute Vorhersagen gemacht werden.
- Es können prinzipiell auch Prognosen zu Punkten gemacht werden, die außerhalb der gewählten Safety Factor liegen, auch wenn dies vom Autor nicht empfohlen wird, da der Unsicherheitsbereich wächst.

Datensatz Heinze 2013 – Dyneema SK 75 – Ansatz 6

- Die Verwendung kleiner Safety Factors ergibt gute Vorhersagen.
- Die Safety Factors können auch mehr als das Doppelte auseinander liegen. Trotzdem können sichere Ergebnisse erzielt werden.
- Für größere D/d-Verhältnisse, die nicht im Biegeversuch geprüft wurden⁴⁰, ist es eher schwierig eine Prognose zu erzielen.
- Die Verwendung des gleichen Safety Factors 2 für das größere D/d-Verhältnis ergibt für die Berechnung keine Vorteile. Es kann also ein unabhängiges SF 3 gewählt werden.
- Gerade für das kleinere D/d-Verhältnis ist es schwierig Vorhersagen für Safety Factors zu machen, die außerhalb des geprüften Bereiches liegen.

Datensatz Gerz 2015 – Dyneema SK 78 – Ansatz 11

- Für das kleinere D/d-Verhältnis sollten die verwendeten Safety Factors 1 und 2 nicht mehr als das Doppelte auseinander liegen, da sonst keine sicheren Ergebnisse erzielt werden.

⁴⁰ Für die Auswertung der 3-Punkt-Methode wurden immer nur die beiden kleinsten D/d-Verhältnisse eines Datensatzes zur Evaluation, zur Einsparung von Biegeversuchszeiten, herangezogen. Alle verwendeten Datensätze hatten drei D/d-Verhältnisse beinhaltet, so dass für das größte D/d-Verhältnis angenommen werden konnte, dass dieses in den durchzuführenden Biegeversuchen nicht getestet wurde.

- Die Verwendung des gleichen Safety Factors 2 für das größere D/d-Verhältnis im Versuch ergibt für die Berechnung einen Vorteil. Es sollte also kein unabhängiger Safety Factor 3 gewählt werden.
- Die Verwendung eines unabhängigen Safety Factor 3 für den zu berechnenden Lebensdauerpunkt ergibt jedoch keine Nachteile.
- Es können prinzipiell auch Prognosen zu Punkten gemacht werden, die außerhalb der gewählten Safety Factor liegen, auch wenn dies vom Autor nicht empfohlen wird, da der Unsicherheitsbereich wächst.
- Für größere, auch nicht im Biegeversuch geprüfte, D/d-Verhältnisse können gute Vorhersagen gemacht werden.

Datensatz Heinze 2013 – Technora T221 – Ansatz 6

- Die verwendeten Safety Factors 1 und 2 für das kleinere D/d-Verhältnis sollten nicht mehr als das Doppelte auseinander liegen, da sonst keine sicheren Ergebnisse erzielt werden.
- Die Verwendung kleiner Safety Factors ergibt gute Vorhersagen.
- Es können prinzipiell auch Prognosen zu Punkten gemacht werden, die außerhalb der gewählten Safety Factor liegen, auch wenn dies vom Autor nicht empfohlen wird, da der Unsicherheitsbereich wächst.
- Für größere, auch nicht im Biegeversuch geprüfte, D/d-Verhältnisse können gute Vorhersagen gemacht werden.

Datensatz Heinze 2013 – Vectran T97 – Ansatz 13

- Der Werkstoff Vectran ist hinsichtlich der Prognosen als eher schwierig zu betrachten und es kann nur eine geringe Anzahl an Vorhersagen gemacht werden⁴¹
- Ist jedoch eine Vorhersage möglich, dann kann diese mit einer guten Genauigkeit durchgeführt werden
- Für größere, auch nicht im Biegeversuch geprüfte, D/d-Verhältnisse können gute Vorhersagen gemacht werden.

Weiter konnte allgemein festgestellt werden, dass eine hohe Anzahl an Lösungen nicht unbedingt ein Maß für die Güte eines Ansatzes ist. So wurde für verschiedene Datensätze und Ansätze zwar eine große Anzahl an Lösungen gefunden, von denen jedoch nur eine geringe Lösungsanzahl ein Bestimmtheitsmaß von 80 % und mehr ergaben.

⁴¹ Dies bedeutet, dass eine große Anzahl an Berechnungen ein Bestimmtheitsmaß von kleiner 0 oder größer 1 ergaben

5.8 Einflussfaktoren für Lebensdauerabschätzungen

Im Folgenden werden Einflussfaktoren aufgeführt, die bei einer Seiltriebanalyse angewendet werden können bzw. sollten. Die Faktoren sind in Kapitel 3.1 bereits besprochen worden. Die in Kapitel 6 aufgeführten Gestaltungsempfehlungen für Seiltriebe mit laufenden hochmodularen Faserseilen basieren ebenfalls auf diesen Faktoren. Diese Aufstellung der Einflussfaktoren wird erstmalig für hochmodulare Faserseile durchgeführt und kann für die Analyse eines Seiltriebes wie in Kapitel 5.9 beschrieben herangezogen werden.

Auch wenn diese Einflussfaktoren teilweise auf Untersuchungen mit nur einem Seilwerkstoff und/ oder einer Seilkonstruktion basieren, können diese Faktoren in einem allerersten Schritt als Anhaltswerte für andere Seilwerkstoffe herangezogen werden. Für eine genaue Abschätzung der Seillebensdauer in einem bestimmten Seiltrieb sollten die Faktoren für den jeweiligen Seilwerkstoff bzw. für die jeweilige Seilkonstruktion ermittelt werden.

Bei den Einflussfaktoren muss in die Seilkraftfaktoren, die die Seilzugkraft erhöhen wie der Wirkungsgrad der Seilscheibenlagerung, und Lebensdauerfaktoren die die im Biegeversuch ermittelte bzw. berechnete Seillebensdauer korrigieren, wie z.B. das r/d -Verhältnis unterschieden werden.

Für die Seilkraftfaktoren gilt:

$$S_{korr} = S_0 \times f_{Si} \quad (18)$$

Mit:

S_{korr} : durch Seilkraftfaktoren korrigierte Seilzugkraft S_0

S_0 : durch Gewichtskraft der Last auf das Seil wirkende Seilzugkraft

f_{Si} : Seilkraftfaktoren zur Korrektur der Seilzugkraft S_0

Für die Lebensdauerfaktoren gilt:

$$N_{korr} = N_0 \times f_{Ni} \quad (19)$$

Mit:

N_{korr} : durch Lebensdauerfaktoren korrigierte Seillebensdauer N_0

N_0 : im Biegeversuch bzw. durch Berechnung ermittelte Seillebensdauer

f_{Ni} : Lebensdauerfaktoren zur Korrektur der Seillebensdauer N_0

5.8.1 Seilkraftfaktoren

Die Erhöhung der Seilkraft durch die **Reibung der Lastführung**, falls vorhanden, wird durch den Seilkraftfaktor f_{s1} berücksichtigt wie sie auch in [Weh05] für Drahtseile aufgeführt sind (Tabelle 20). Bei stark außermittiger Seilaufhängung sind höhere Werte anzunehmen.

Tabelle 20: Seilkraftfaktor f_{s1} für die Reibung der Lastführung [Weh05]

Art der Führung	Seilkraftfaktor f_{s1}
Rollenführung	1,05
Gleitführung	1,10

Einen Einfluss der **Anzahl der überrollten Scheiben** muss hinsichtlich des Wirkungsgrades der Seilscheibenlagerung berücksichtigt werden [Kle16]. Dazu können die in DIN 15020-Teil1 [DIN74] aufgeführten Werte für den Wirkungsgrad η herangezogen werden (Tabelle 21).

Für den Seilkraftfaktor für den Wirkungsgrad f_{s2} gilt:

$$f_{s2} = \frac{1}{\eta} \quad (20)$$

Tabelle 21: Wirkungsgrad für Seilscheibenlagerung [DIN74]

Anzahl der überrollten Seilscheiben	Seilkraftfaktor f_{s1} für Gleitlagerung	Seilkraftfaktor f_{s1} für Wälzlagerung
2	0,98	0,99
3	0,96	0,98
4	0,94	0,97
5	0,92	0,96
6	0,91	0,95
7	0,89	0,94
8	0,87	0,93
9	0,85	0,92
10	0,84	0,91

Im Falle der Verwendung von **parallelen Seilen** wie zum Beispiel bei Hallenkränen können für den Seilkraftfaktor f_{S3} die Werte für Drahtseile aus **[Weh05]** herangezogen werden (Tabelle 22).

Tabelle 22: Seilkraftfaktor f_{S3} für parallele Seile
[Weh05]

Art der parallelen Seile	Seilkraftfaktor f_{S3}
Getrennte Seilrollen mit Ausgleichsrolle	1,00
Getrennte Seilrollen ohne Wippe	1,10
Gemeinsame Seilrolle, zwei Seile, ohne Wippe	1,15
Gemeinsame Seilrolle, mehrere Seile	1,25

Für den **Donandtpunkt** werden keine Faktoren angegeben, da dieser im Betrieb nicht überschritten werden darf. Ein Überschreiten des Donandtpunktes hat zur Folge, dass nach wenigen Biegewechsel bzw. Hubspielen ein Gewaltbruch des Seiles erfolgen kann. Im Folgenden (Tabelle 23) werden als Anhaltspunkt Grenzsicherheitsfaktoren SF_{Grenz} für verschiedene Seilwerkstoffe, Seilkonstruktionen und D/d-Verhältnisse aufgeführt, die in der Literatur **[Fey91]**, **[Gru12]** und **[Hei13]** gefunden wurden. Die aufgeführten Werte sollten vorbehaltlich einer genaueren Prüfung benutzt werden. In einzelnen Fällen kann der Donandtpunkt einen abweichenden Wert annehmen. Vor allem die Werte von Feyrer und Vogel **[Fey91]** sind als eher zu niedrig anzusehen, da die für die Bruchkraftprüfung verwendete Endverbindung mit Pressklemmen und Seilklemmen ausgeführt wurde. Die in der Bruchkraftprüfung erreichte Bruchkraft von 53 kN ist für ein 12 mm hochmodulares Faserseil aus HMPE eher niedrig und sollte nach DIN EN ISO 2307 **[DIN11-1]** höher ausfallen, womit die unten aufgeführten Grenzsicherheitsfaktoren höher liegen. Wie in Kapitel 4.2 ersichtlich, können mit Vectran im Gegensatz zu den aufgeführten Werten in Tabelle 23 auch mit geringeren Sicherheitsfaktoren gute Lebensdauern im Zeitfestigkeitsbereich erzielt werden.

Tabelle 23: Grenzsicherheitsfaktoren SF_{Grenz}

Quelle	Seilwerkstoff	Seil- konstruktion	D/d- Verhältnis	Grenzsicherheits- faktor SF _{Grenz}
[Fey91]	Dyneema SK 60/ Polyester	Kern-Mantel- Konstruktion mit geschlagenem Kern	12,5	1,5
			25	1,3
			63	1,2
[Gru12]	Dyneema SK 75	Offenes 12er Geflecht	18,4	5,2
[Hei13]	Dyneema SK 75	Kern-Mantel- Konstruktion mit geflochtenem Kern	12,5	1,9
			18	1,7
			26	1,6
	Technora T221		12,5	3,0
			18	2,3
			26	2,1
	Vectran T97		12,5	8,6
			18	6,9
			26	6,3

5.8.2 Lebensdauerfaktoren

Hinsichtlich des **Einfluss des Rillenradius** können die Ergebnisse von Heinze **[Hei11]** herangezogen werden, die mit geflochtenen Technora-Seilen ermittelt wurden (Tabelle 24).

Tabelle 24: Minderungsfaktoren f_{N1} für r/d-Verhältnis (nach [Hei11])

r/d-Verhältnis	Minderungsfaktor f_{N1}
0,41	0,63
0,46	1,21
0,51	1,09
0,53	1,01
0,6	0,89
1,7	0,75

Für den **Einfluss der Gegenbiegung** können für die Faktoren die Ergebnisse von Franck **[Fra16]** herangezogen werden. Hinsichtlich des Achsabstandes kann hier für Vectran-Seile ein allgemeiner, von der Seilkonstruktion unabhängiger Minderungsfaktor f_{N2} von 0,32 für die gelegte Kern-Mantel-Konstruktion und 0,27 für die geflochtene Konstruktion angenommen werden. Dieser Minderungsfaktor für Vectran liegt im Bereich der Untersuchungen von Heinze **[Hei11]**, so dass dessen Werte für Gegenbiegung bei unterschiedlichen Seilzugkräften prinzipiell auch für verschiedene Achsabstände herangezogen werden können.

Tabelle 25: Minderungsfaktoren f_{N2} für Gegenbiegung (nach [Fra16] und [Hei11])

Quelle	Seilwerkstoff	Seil-konstruktion	Minderungsfaktor f_{N2}
[Fra16]	Vectran HT	Offenes 12er Geflecht	0,27
		Kern-Mantel-Konstruktion mit gelegtem Kern	0,32
[Hei13]	Dyneema SK 75	Kern-Mantel-Konstruktion mit geflochtenem Kern	0,87
	Technora T221		0,31
	Vectran T97		0,36

Hinsichtlich des Einflusses der **Biegelänge** können die Ergebnisse der Untersuchungen von Franck **[Fra16]** herangezogen werden.

$$f_{N3} = \frac{10^{[a_0 + a_1 \times \log(L/d)]}}{N_a} \quad (21)$$

Mit:

f_{N3} : Faktor für Biegelänge

N_a : Bezugsgröße für Seilkonstruktion (aus Tabelle 26)

a_0, a_1 : Koeffizienten (aus Tabelle 26)

L/d : Biegelänge bezogen auf Seildurchmesser d (z.B. 30d)

Tabelle 26: Koeffizienten und Parameter zur Berechnung des Faktors f_{N3}

Bezeichnung	Offenes 12er-Geflecht	Kern-Mantel- Konstruktion mit gelegtem Kern
N_a	28.851	34.249
a_0	4,83	4,859
a_1	-0,1944	-0,2386

Lässt man Formel (21) für die bezogene Biegelänge L/d gegen unendlich laufen, nimmt f_{N3} ab einem Wert für L/d von 5800 einen konstanten Wert an. Ab dieser Biegelänge kann ein konstanter Wert für f_{N3} von 0,27 für die Kern-Mantel-Konstruktion und 0,43 für das offene 12er-Geflecht angenommen werden. Dieses Verhalten ist auch von Drahtseilen bekannt **[Kue17]**.

5.9 Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes

Die Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes zur Berechnung der Lebensdauer eines laufenden hochmodularen Faserseiles kann von den laufenden Drahtseilen, wie sie in **[Weh05]** und **[Vog12]** beschrieben wird, übernommen werden (Abb. 79). Wie bei Drahtseilen, hängt die Seillebensdauer von hochmodularen Faserseilen, wie in Kapitel 3.1.2 und Kapitel 5.3 beschrieben, grundsätzlich von dem D/d -Verhältnis und der Seilzugkraft ab. Da ebenfalls die Lebensdauergeraden bei doppeltlogarithmischer Auftragung einen ähnlichen Verlauf aufweisen (siehe dazu auch Abb. 71 in Kapitel 5.2), kann davon ausgegangen werden, dass diese Vorgehensweise auch für hochmodulare Faserseile angewendet werden kann.

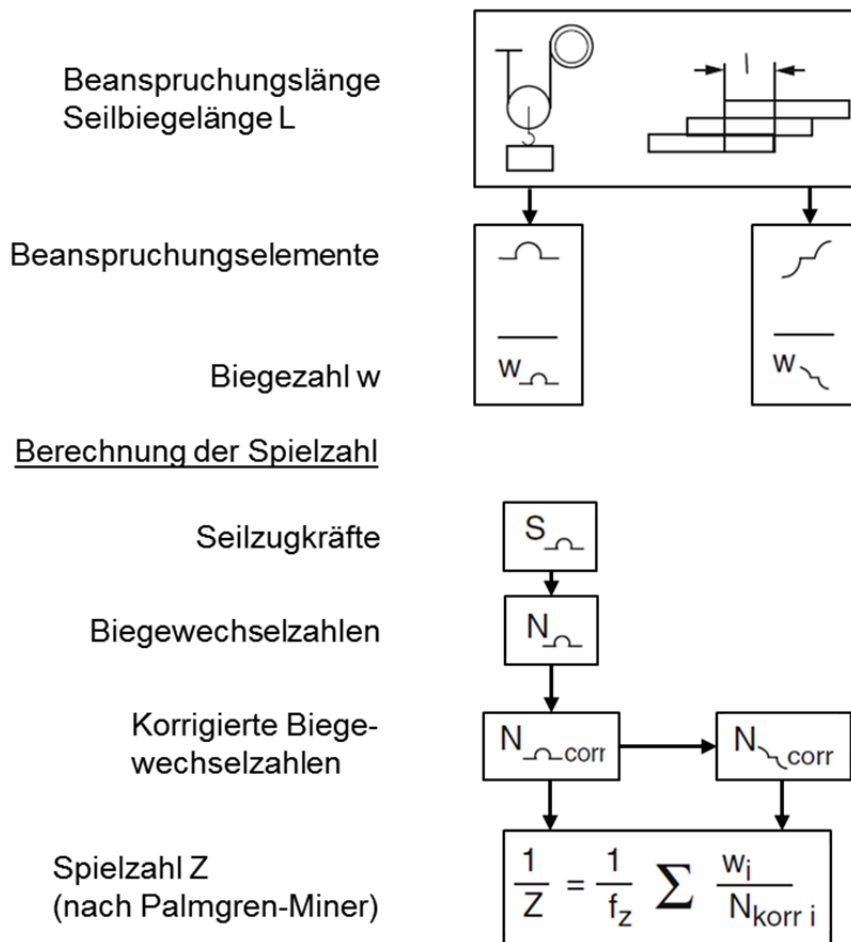
Analyse des Seiltriebes

Abb. 79: Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes (in Anlehnung an [Weh05])

Die Analyse beginnt mit dem Zusammenstellen der wichtigsten Informationen zum Faserseil und zum Seiltrieb. Die Informationen sollten alle wichtigen Daten wie z.B. Konstruktion, Werkstoff und Seildurchmesser beinhalten. Beim Seiltrieb sind dies z.B. D/d-Verhältnisse, Abstände der Seilscheiben zueinander und die Seilzugkraft. Hier ist es hilfreich eine Technische Zeichnung vorliegen zu haben.

Nach dem Sammeln aller Informationen wird die Biegelänge L, die durch Biegewechsel höchstbeanspruchte Seillänge, und die Beanspruchungsfolge und -elemente, also die Arten der Biegung, bestimmt, wie es in [Weh05] beschrieben ist.

Anschließend werden die Seilzugkräfte unter Berücksichtigung zusätzlicher Widerstände, wie zum Beispiel der Reibung der Lastführung, wenn vorhanden, oder dem Scheibenwirkungsgrad, wie in Kapitel 5.8.1 beschrieben berechnet.

Als nächstes werden die Biegewechselzahlen für das einzusetzende hochmodulare Faserseil für die gegebenen Seilzugkräfte bestimmt. Dies erfolgt entweder durch experimentelle Versuche auf Biegemaschinen oder unter Verwendung einer Abschätzungsformel, wie sie zum Beispiel in Kapitel 5.2 vorgestellt wird.

Die Biegewechselzahlen müssen im Folgenden hinsichtlich der wirkenden Einflüsse wie zum Beispiel Gegenbiegung, Biegelänge usw. korrigiert werden. Hierzu können die in Kapitel 5.8.2 aufgeführten Werte herangezogen werden. Mit diesen korrigierten Biegewechselzahlen kann abschließend die zu erwartende Spielzahl Z unter Verwendung der Methodik von Palmgren-Miner **[Fey15]**, **[Pal24]**, **[Min45]** berechnet werden.

Da hochmodulare Faserseile in laufenden Anwendungen wie Krane oder Aufzüge erst seit kurzem eingesetzt werden und noch nicht alle Einflussfaktoren quantifiziert sind, ist es momentan nicht möglich eine vergleichende Rechnung durchzuführen.

6. Gestaltungsempfehlungen für Seiltriebe mit laufenden hochmodularen Faserseilen

Wie in Kapitel 3 dargestellt, haben die Komponenten eines Seiltriebs Einfluss auf die erreichbare Seillebensdauer. Im Folgenden sollen Empfehlungen gegeben werden, wie ein Seiltrieb aufgebaut sein sollte, um eine möglichst optimale Seillebensdauer für laufende hochmodulare Faserseile zu erreichen.

6.1 Seilscheiben

Das Hauptaugenmerk bei der Seilscheibe liegt auf der Ausgestaltung der Rille.

Die Oberfläche der Rille sollte möglichst glatt sein und eine Rauigkeit R_a von 1,6 aufweisen. Bei einer zu großen Rauigkeit kann es, insbesondere bei Schrägzug und einem großen Unterschied zwischen Leerlast und Vollast, zu einer Schädigung der Seiloberfläche kommen, die die Seillebensdauer signifikant reduziert.

Die in Kapitel 1.2 vorgestellten Anwendungen benutzen sowohl Stahl- als auch Kunststoffseilscheiben. Wichtig ist hierbei die oben genannte Rillenrauigkeit zu erreichen. Zum Seilscheibenwerkstoff, bzw. dem Rillenmaterial, kann keine Aussage getroffen werden ob Stahl oder Kunststoff besser ist.

Weiter ist es von Vorteil den Rillenöffnungswinkel möglichst groß zu wählen. Ein Öffnungswinkel von 60° sollte dabei nicht unterschritten werden. Bei größerem Öffnungswinkel erfährt das Faserseil weniger Verdrehung wenn es auf die Rillenflanke aufläuft und weniger Abrasion durch weniger Gleitweg, da es tiefer in der Rille auf die Flanke trifft (siehe Abb. 80 und Abb. 81).

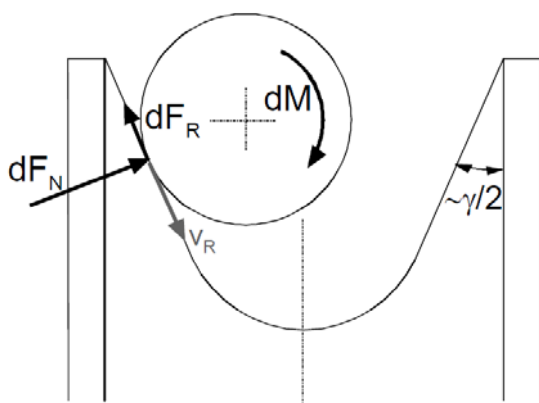


Abb. 80: Wirkende Kräfte und Momente bei Schrägzug [Sch05]

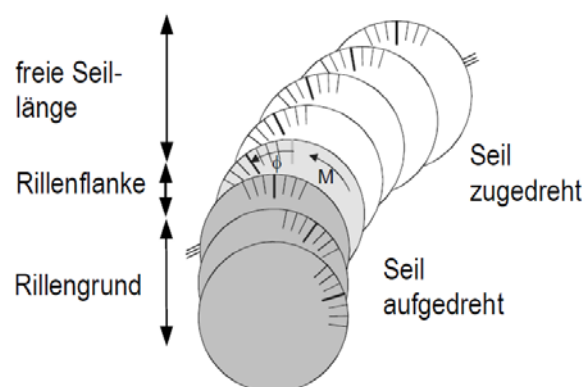


Abb. 81: Seilverdrehung beim Auflaufen auf die Rillenflanke unter Schrägzug [Sch05]

Der Rillenradius bzw. das Verhältnis von Rillenradius zu Seilnenndurchmesser r/d sollte kleiner gewählt werden als bei einem Drahtseil. Ein Wert von 0,51 sollte angestrebt werden, so dass das Faserseil besser gestützt wird und nicht zu stark ovalisiert (Abb. 82). Dadurch werden hohe Querpressungen vermieden, die vor allem bei geflochtenen Konstruktionen einen starken Lebensdauermindernden Faktor darstellen.

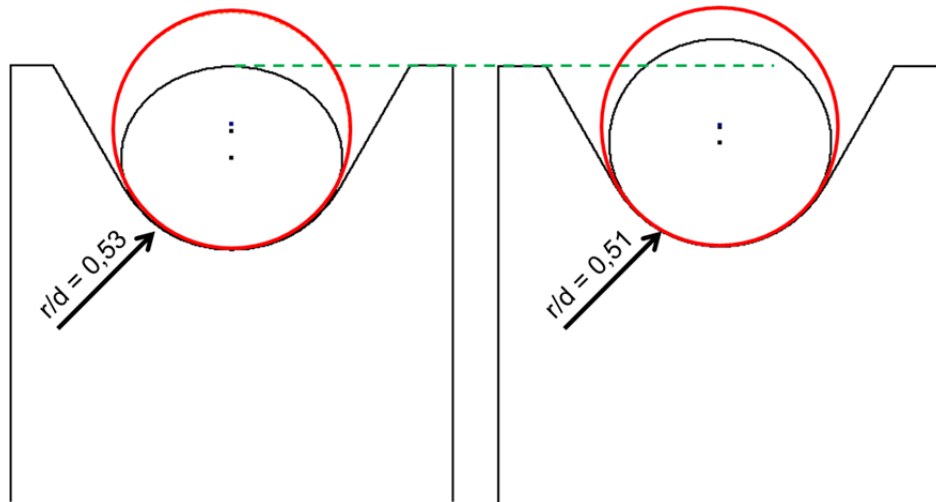


Abb. 82: Qualitative Darstellung der Ovalisierung eines Faserseiles bei unterschiedlichen r/d -Verhältnissen, links: $r/d = 0,53$, rechts: $r/d = 0,51$ (Rot, Seilquerschnitt unbelastet)

6.2 Seiltrommel

Bei der Seiltrommel ist zu unterscheiden zwischen einlagiger und mehrlagiger Wicklung.

Für die einlagige Wicklung hochmodularer Faserseile kann wie für Drahtseile eine spiralförmige Rillung benutzt werden. Die Rillenform und die Ausgestaltung orientieren sich an den Empfehlungen für Seilscheiben wie oben beschrieben.

Um eine stabile Wickelpyramide zu erreichen müssen bei den mehrlagigen Seiltrommeln, bei der Verwendung einer Systemrillung entweder Faserseile mit einer hohen Quersteifigkeit eingesetzt oder, wenn das Spulbild auch ungleichmäßig sein kann, Faserseile mit einer niedrigeren Quersteifigkeit eingesetzt werden. Bei der Verwendung einer Chevron-Winde wie von DeepTek oder einem Spillwinden-System wie von Rolls-Royce (siehe auch Kapitel 2.5.2) kann das Seil ebenfalls eine eher niedrige Quersteifigkeit aufweisen.

6.3 Positionierung der Seilscheiben zueinander bzw. der Seiltrommel zur ersten Seilscheibe (Schrägzug)

Wie bei Drahtseilen sollte auch bei hochmodularen Faserseilen Schrägzug vermieden werden. Der Effekt von Schrägzug kann durch die bei der Verwendung von Seilscheiben mit einem größeren Öffnungswinkel und durch einen möglichst großen Abstand zwischen der Seiltrommel und der ersten Seilscheibe minimiert werden.

Um den Schrägzug zu minimieren kann bei der Positionierung der ersten Seilscheibe nach der Seiltrommel kann vor allem bei einlagig bewickelter Seiltrommel die Kenntnis über den meist benutzten Spulbereich ausgenutzt werden. In Abb. 83 ist ein Beispiel abgebildet, in dem das Seil vor allem im Bereich 2 gespult wird. Die erste Seilscheibe ist so positioniert, dass für diesen Bereich der Schrägzug minimiert wird.

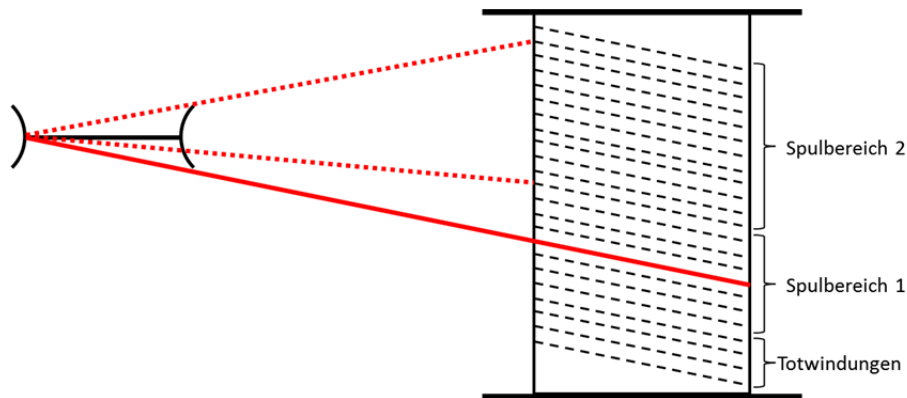


Abb. 83: Verschiedene Spulbereiche bei einer einlagigen Seiltrommel

Vor allem für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln besteht die Möglichkeit der Verwendung einer Spulhilfe wie bereits in Kapitel 2.5.2 vorgestellt wurden. Problematisch bleibt dabei das Auflaufen des Seiles auf die erste Seilscheibe nach der Seiltrommel. Eine Möglichkeit diesen Schrägzug zu minimieren kann darin bestehen, diese erste Seilscheibe vertikal gelenkig auszuführen so dass diese mitschwenkt, wenn sich die Kreuzgewindespindel entlang der Trommel bewegt (Abb. 84 und Abb. 85). Ein solcher Aufbau kann vor allem dann verwendet werden, wenn noch eine Spillwinde eingesetzt wird, die die Seilzugkraft vor der Seiltrommel verringert und somit auch die Anforderungen an die (Schwenk-)Lagerung der Seilscheibe verringert.



Abb. 84: Vertikal gelenkig gelagerte Seilscheibe der Schleppwinde aus **Abb. 85**



Abb. 85: Spulhilfe mit Kreuzgewindespindel einer Schleppwinde

Eine weitere Möglichkeit, die durch Schrägzug eingebrachte Seilverdrehung gelegter hochmodularer Faserseile zu minimieren ist, wie bei Drahtseilen üblich die Spulrichtung der Schlagrichtung des hochmodularen Faserseiles anzupassen (Abb. 86). Bei Drahtseilen werden rechtsgeschlagene Seile auf linksgängige Trommeln und linksgeschlagene Seile auf rechtsgängige Trommel aufgespult. Diese Vorgehensweise führt zu einem Zudrehen des Seiles welches einem Aufdrehen des Seiles durch Schrägzug entgegenwirkt.

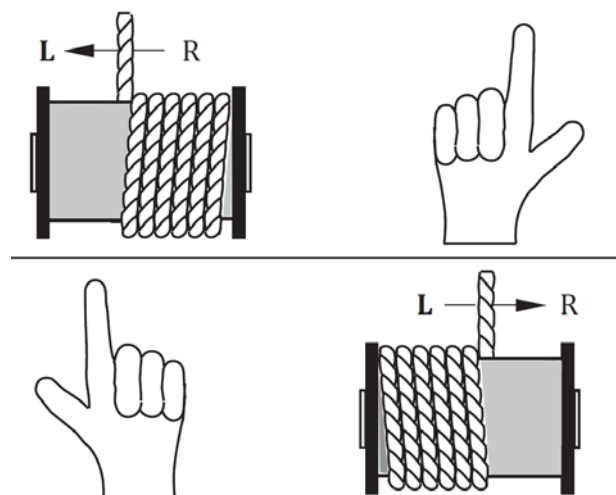


Abb. 86: Spulrichtung in Abhängigkeit der Schlagrichtung des Faserseiles [ISO13]

6.4 Entwicklung einer Spulvorrichtung zum Ausgleich der Verdrehung von hochmodularen Faserseilen

Bei den im Rahmen des in Kapitel 4 beschriebenen Forschungsprojektes durchgeführten praxisnahen Versuchen auf dem Regalbediengerät wurde als stark lebensdauerbeeinflussender Faktor die Verdrehung des Faserseiles durch Schrägzug identifiziert (siehe dazu auch Kapitel 4.3). Da ein Seiltrieb ohne Schrägzug konstruktiv nicht zu realisieren ist, wäre es von Vorteil eine Möglichkeit zu haben, die in einem Seil vorhandene Verdrehung herauszudrehen bzw. eine Verdrehung des Seiles erst gar nicht zuzulassen. Daher wurde unter anderem vom Autor eine neuartige Spulvorrichtung entwickelt, die hauptsächlich aus einer Erfassungseinheit für die Verdrehung und einer Spulvorrichtung, die unabhängig von der Seiltrommel verfahren und gesteuert werden kann, besteht (Abb. 87).

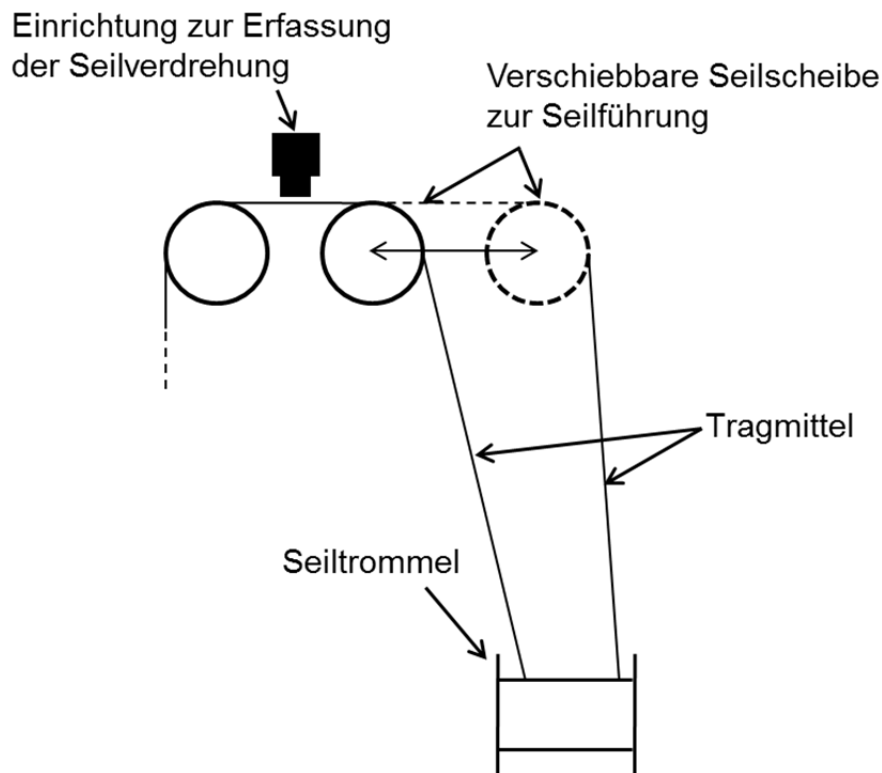


Abb. 87: Prinzipdarstellung der neuartigen Spulvorrichtung

Die Erfassungseinheit besteht hierbei aus einem optischen System, das die Verdrehung des Faserseiles erfasst und den Betrag und die Richtung an die Regelungseinheit weiterleitet. Die Regelung steuert nun die Spulvorrichtung, die im Unterschied zu einer Standardspulvorrichtung einen unabhängigen Antrieb hat. Je nach Verdrehung des Seiles wird dieses nun auf die rechte oder linke Flanke der Trommelrinne oder, bei mehrlagiger Wicklung, auf die Flanke des benachbarten linken oder rechten Seilstranges geleitet. Bei ausreichender Pressung auf den Untergrund, die Rillenflanke oder den benachbarten Seilstrang, rollt das

Faserseil, wie in Abb. 88 dargestellt in den Rillengrund hinunter. Der Betrag der dabei in das Faserseil eingebrachten Verdrehung kann durch die Höhe des Kontaktpunktes auf der Flanke beeinflusst werden. Die Regelung sorgt nun dafür, dass der der vorliegenden Verdrehung entsprechende Kontaktpunkt auf der Flanke angefahren wird.

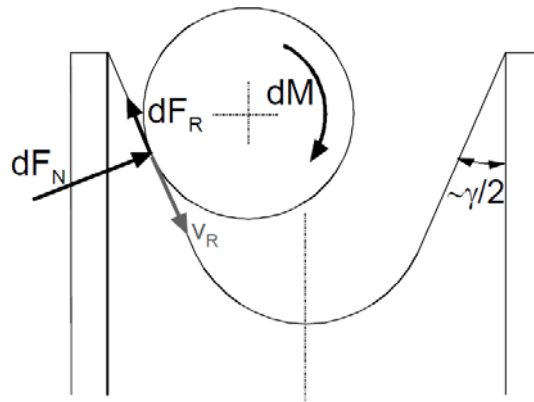


Abb. 88: Wirkende Kräfte und Momente bei Schrägzug [Sch05]

Wie in Kapitel 4.3 gezeigt, bewirkt eine durch Schrägzug hervorgerufene Seilverdrehung einen starken Lebensdauerabfall auf ca. 5% der Lebensdauer, die im Biegeversuch ohne Schrägzug bei gleichem D/d -Verhältnis und gleichem Safety Factor erreicht wird. Mit der hier beschriebenen Spulvorrichtung kann die Restlebensdauer beträchtlich erhöht und hochmodulare Faserseile somit wirtschaftlich und ressourceneffizient eingesetzt werden.

6.5 Anpassung Geschwindigkeit und Beschleunigung an Last

Zur Erhöhung der Seillebensdauer könnten auch die Hubgeschwindigkeit und vor allem die Beschleunigung an die Last angepasst werden. So ist denkbar bei geringen Lasten eine höhere Beschleunigung und bei hohen Lasten eine geringere Beschleunigung vorzusehen, um den aus der Massenträgheit resultierenden Zugschwellanteil zu minimieren. Dadurch wird die innere Abrasion zwischen den Fasern und den Litzen herabgesetzt. Durch die Verwendung einer geringeren Beschleunigung und einer höheren Beschleunigung können die Zeitverluste weitestgehend ausgeglichen werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile, die einen immer größer werdenden Marktanteil haben. Hochmodulare Faserseile werden nicht nur in Hebezeugen wie Mobilkränen oder Offshore-Kranen eingesetzt sondern auch zunehmend in Anwendungen der Personenfördertechnik wie Aufzügen. Im Folgenden wird die Arbeit unter Berücksichtigung der wichtigsten Punkte zusammengefasst und in das Arbeitsgebiet der Seilforschung eingeordnet. Darauf aufbauend werden Hinweise darauf gegeben, in welchen Bereichen noch Forschungs- und auch Normungsbedarf besteht.

7.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Beitrag hinsichtlich der Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile zu erarbeiten. Hochmodulare Faserseile sollen in Zukunft sowohl in stehenden Anwendungen, wie zum Beispiel Abspannseile eines Kranes, als auch in laufenden Anwendungen, wie zum Beispiel Hubseile in Kranen eingesetzt werden. Für den erfolgreichen und insbesondere sicheren Einsatz hochmodularer Faserseile ist es dabei wichtig, die Lebensdauer abschätzen zu können, um einen Seiltausch planbar durchzuführen, bevor ein Sicherheitskritischer Zustand auftritt.

Die Idee zu der Arbeit entstand sowohl durch ein Forschungsprojekt, dessen Ziel es war ein hochmodulares Faserseil für laufende Anwendungen zu entwickeln als auch durch die tägliche Arbeit am IFT und der Mitarbeit des Autors in Normungsgremien. Hier wurde jeweils ein Mangel an Möglichkeiten festgestellt, die Lebensdauer eines hochmodularen Faserseiles abschätzen zu können, ohne dass eine Vielzahl an zum größtenteils lang laufenden Biegeversuchen (halbes Jahr und länger) durchzuführen. Hochmodulare Faserseile zeichnen sich im Vergleich zu Drahtseilen durch überragende Eigenschaften hinsichtlich der Festigkeit bei nahezu gleicher Dehnung aus und weisen dabei ein um bis zu 8-fach geringeres Eigengewicht auf. Die Arbeit gibt daher zu Beginn einen Überblick über die Eigenschaften, technischen Daten und Herstellprozesse der wichtigsten Faserwerkstoffe und es wird auf Anwendungen eingegangen, in denen bereits hochmodulare Faserseile eingesetzt werden um den Bedarf einer Methode zur Abschätzung der Lebensdauer hochmodularer Faserseile aufzuzeigen.

Seile können allgemein in die Hauptgruppen stehende und laufend unterteilt werden, wobei zu den stehenden Seilen zum Beispiel Abspannseile für Schrägseilbrücken oder sogenannte Mooring Lines gehören. Die laufenden Seile umfassen Anwendungen, bei denen das Seil um eine Scheibe gebogen wird und dabei einer kombinierten Biege- und Zugspannung

unterworfen ist. Für den speziellen Anwendungsbereich der Mooring Lines gibt es bereits eine Anzahl an Untersuchungen wohingegen es für allgemeine Anwendungsbereiche für stehende Seile, wie z.B. allgemeinen Abspannseilen, nur eine geringe Anzahl an durchgeführten Untersuchungen gibt. Einführend in den Themenkomplex der laufenden hochmodularen Faserseile werden bereits vorhandene Berechnungsansätze zur Bestimmung der Lebensdauer vorgestellt und deren Anwendbarkeit eingeordnet. In diesem Abschnitt werden dabei folgende vier Berechnungsansätze für laufende hochmodulare Faserseile erläutert:

1. Die Lebensdauergleichung von Feyrer und Vogel unter Verwendung der Lebensdauergleichung für Drahtseile von Feyrer. Es wurden für ein Kern-Mantel-Seil aus Dyneema SK60 sehr gute Ergebnisse erzielt, jedoch wurden bei Anwendung der Formel durch den Autor bei anderen Materialien und Seilkonstruktionen keine guten Ergebnisse erzielt.
2. Die Lebensdauergleichungen von Vogel, der sowohl einen Kraftbezogenen Ansatz als auch einen Massebezogenen Ansatz aufgestellt hat. Vogel hat die Ansätze auf geflochtene Seile aus SK60 und SK75 angewendet und Bestimmtheitsmaße zwischen 0,935 und 0,992 erzielt. Für andere Werkstoffe werden keine Angaben aufgeführt.
3. Die Firma DSM, Hersteller von Dyneema, stellte einen Ansatz basierend auf der Lebensdauergleichung für Drahtseile von Feyrer, erweitert durch mehrere Terme auf. Es wurden keine Angaben zur den damit erzielbaren Ergebnissen gefunden.
4. Die Lebensdauergleichung von Heinze kann für alle drei verbreiteten Faserwerkstoffe HMPE, LCP und Aramid angewendet werden und hat somit eine gewisse Allgemeingültigkeit. Jedoch ist die Anwendung der Formel als eher aufwendig zu bezeichnen, da mit Ersatzdurchmessern gerechnet wird und eine Vielzahl an Regressionskoeffizienten zu bestimmen sind.

Neben den verschiedenen Berechnungsansätzen werden auch Untersuchungen vorgestellt, die sich zwar mit laufenden hochmodularen Faserseilen beschäftigt, jedoch kein Formelwerk aufgestellt haben. Im Weiteren wird ein Überblick über Untersuchungen zu der Abergreifereerkennung, der Optimierung von Seiltrieben und zu Spulvorrichtungen und Seiltrommeln für hochmodulare Faserseile gegeben.

Laufende Seile sind im Betrieb den unterschiedlichsten Einflüssen unterworfen, die die Lebensdauer im Allgemeinen heruntersetzen. Diese theoretischen Grundlagen hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile werden vom Autor in Maschinenbasierte Faktoren wie Seilscheiben, Beschleunigung usw., Seilbasierte Faktoren wie die Seilkonstruktion oder das Coating, und Umweltbasierte Faktoren wie die

Umgebungstemperatur aufgeteilt. Abschließend wird für die theoretischen Grundlagen auf die Durchführung von Biegeversuchen eingegangen, insbesondere auf die vorherrschenden Laborbedingungen, sowie auf eine Definition des Bestimmtheitsmaßes R^2 .

Die vom Autor durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden in Kapitel 4 vorgestellt. Dabei wird zuerst auf die verwendeten Prüfstände eingegangen. Es wurden zum einen Biegemaschinen des IFTs die eine Höchstseilzugkraft von 30 kN aufweisen genutzt. Daneben wurden praxisnahe Versuche auf einem Regalbediengeräteheber durchgeführt, der in einem früheren AiF-geförderten Forschungsprojekt aufgebaut wurde. In dem vom Autor durchgeführten Forschungsprojekt konnte in den praxisnahen Versuchen ein starker Einbruch der Seillebensdauer im Vergleich zu den Biegeversuchen festgestellt werden, der nach Ansicht des Autors vorrangig aus der Seilverdrehung resultiert. Dies führte zu der Entwicklung einer neuartigen Verdrehvorrichtung, auf die in Kapitel 6.3 im Detail eingegangen wird.

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit einer neuartigen Methode zur Bestimmung der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile (3-Punkt-Methode). Das Ziel der Entwicklung der neuartigen Methode ist, dass mit einem möglichst geringen Aufwand an Biegeversuchen die Lebensdauer eines beliebigen hochmodularen Faserseiles für verschiedene Parameter abgeschätzt werden kann. Um die Ansätze verwenden zu können, müssen dazu zuerst Biegeversuche durchgeführt werden. Diese müssen für jeden neuen Seiltyp neu durchgeführt werden, da zum Beispiel die Verwendung eines anderen Coatings bei ansonsten gleichen Konstruktions- und Werkstoffparametern die Seillebensdauer erheblich variieren kann. In einem ersten Schritt wurden die Haupteinflussfaktoren für die Lebensdauer laufender Seile identifiziert:

1. D/d-Verhältnis
2. Seilzugkraft
3. Seildurchmesser

Die vom Autor aufgestellten Ansätze beinhalten diese drei folgenden Haupteinflussfaktoren auf die Lebensdauer. Das D/d-Verhältnis wird ohne Änderung übernommen. Die Seilzugkraft wird in Form des Sicherheitsfaktors bzw. englisch Safety Factor verwendet und der Seildurchmesser wird als relative Angabe herangezogen. Dazu wird zu Beginn der durchzuführenden Biegeversuche, nach dem Aufbringen der Seilzugkraft, der Ist-Seildurchmesser gemessen und in Relation zum Nenndurchmesser gesetzt. Die Biegeversuche müssen mit zwei verschiedenen D/d-Verhältnissen in Kombination mit zwei verschiedenen Safety Factors durchgeführt werden. Dadurch ergibt sich eine theoretische

Mindestzahl an Biegeversuchen von drei, wobei empfohlen wird, jeden Biegeversuch mindestens zweimal durchzuführen, um Ausreißer zu detektieren.

Zur Auswertung der aufgestellten Ansätze werden Versuchsergebnisse Dritter aus der Literatur herangezogen, die in Kapitel 5.4 aufgeführt sind. Diese Datensätze umfassen verschiedene Seilwerkstoffe und Seilkonstruktionen die bei unterschiedlichsten Seilzugkräften bzw. Safety Factors und D/d-Verhältnissen geprüft wurden.

Für die eigentliche Auswertung werden zwei Vorgehensweisen verfolgt. Zuerst wird eine Auswertung der 3-Punkt-Methode durchgeführt, die eben der vom Autor vorgeschlagenen neuartigen Methode folgt. Um die umfassende Auswertung der Ansätze zu erleichtern, wurde mit dem Programm National Instruments Labview eine Auswerteprogramm erstellt. Es wird für die unterschiedlichen Datensätze der jeweils passendste Ansatz benannt, der eine große Anzahl an Ergebnissen bei guter Prognosegenauigkeit erlaubt. Aufgrund der Vielzahl an Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße, in Anhang A2 sind für einen relativ kleinen Datensatz, der in Kapitel 5.6 beispielhaft besprochen wird und für den sich 81 Kombinationsmöglichkeiten pro Ansatz ergeben, die Bestimmtheitsmaße aufgeführt. Die Bestimmtheitsmaße werden anhand dreier Kategorien (0 - 50 %; 50 % - 80 %; 80 % - 100 %) angegeben. In einem zweiten Schritt wird eine herkömmliche Auswertung durchgeführt, die der Herangehensweise von z.B. Feyrer, folgt und alle Ergebnisse eines Datensatzes für die Regression heranzieht. Auch für diese herkömmliche Auswertung wird der jeweils passendste Ansatz benannt und die Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße aufgeführt. Selbst bei der Verwendung der relativ einfach gehaltenen Ansätze ergeben sich bei der herkömmlichen Auswertung unter Verwendung vieler Ergebnisse (neun Lebensdauerpunkte und mehr (siehe Kapitel 5.4), nicht nur drei Ergebnisse wie bei der neuartigen Methode) Bestimmtheitsmaße von mindestens 97,1 %. Verwendet man die in der Auswertung der 3-Punkt-Methode als am besten geeignet gefundene Ansätze in der herkömmlichen Auswertung ergeben sich noch immer Bestimmtheitsmaße von mindestens 87,4 %. Somit können selbst mit einem relativ einfachen Ansatz sichere Vorhersagen gemacht werden.

Anschließend daran werden die Grenzen und Limitierungen der neuartigen Methode diskutiert. Folgende Feststellungen wurden getroffen:

1. Eine Bestimmung der Lebensdauer eines laufenden hochmodularen Faserseiles mit der neuartigen Methode ist grundsätzlich möglich
2. Eine Limitierung hinsichtlich der Prognosegenauigkeit muss bei der Verwendung weit auseinander liegender Safety Factors getroffen werden

3. Es sollten darüber hinaus keine Prognosen für Punkte, die weit außerhalb der Ausgangsparameter liegen getroffen werden
4. Faserseile aus dem Werkstoff Vectran scheinen eher schwer abzuschätzen
5. Eine hohe Anzahl an Ergebnissen ist kein Maß für die Güte eines Ansatzes. So wurde für verschiedene Datensätze und Ansätze zwar eine große Anzahl an Lösungen gefunden, von denen jedoch nur eine geringe Lösungsanzahl ein Bestimmtheitsmaß von 80 % und mehr ergaben.

Um eine vollumfängliche Lebensdauerabschätzung bei einer Seiltriebanalyse durchführen zu können müssen die Lebensdauerermindernden Einflussfaktoren auf die Seillebensdauer bekannt sein und eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes verfolgt werden. Diese beiden Punkte werden in Kapitel 5.8 und 5.9 behandelt.

Für die optimale Ausnutzung der im Vergleich zu Drahtseilen höheren Lebensdauer der laufenden hochmodularen Faserseile ist es notwendig den Seiltrieb anzupassen. Dieser Themenkomplex wird in Kapitel 6 besprochen.

Die vorliegende Arbeit leistet somit einen Beitrag für die Seilforschung hinsichtlich laufender hochmodularer Faserseile. Mit der vorgestellten neuartigen Methode zur Abschätzung der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile wird erstmalig die Möglichkeit gegeben die Seillebensdauer mit einem vertretbaren Aufwand abzuschätzen. Die Bestimmung der Seillebensdauer kann anschließend zur Festlegung der Inspektionsintervalle während des Betriebs herangezogen werden (siehe auch Kapitel III - Zusammenfassung).

7.2 Ausblick

Hochmodulare Faserseile werden in Zukunft eine immer größer werdende Rolle, sei es in stehenden Anwendungen wie Abspannseile oder in laufenden Anwendungen wie Hubseilen, spielen. Um diese wirtschaftlich und sicher einsetzen zu können sind sowohl in der Forschung als auch in der Normung weitere Anstrengungen nötig.

Hinsichtlich der Forschung ist es vor allem notwendig die Einflussfaktoren, die aus dem Seiltrieb resultieren, wie Gegenbiegung, Rillenform und –radius oder Schrägzug, eingehender zu erforschen. Am wichtigsten ist es nach Ansicht des Autors jedoch, hinsichtlich der Ablegereife und vor allem deren Erkennung weitere Forschung zu betreiben. Nur wenn die Mechanismen bekannt sind, wie ein Seil über die Lebensdauer verschleißt und dabei an Bruchkraft verliert können hochmodulare Faserseile auch in Sicherheitskritischen Anwendungen wie der Personenfördertechnik eingesetzt werden. Dabei sind sowohl

zerstörungsfreie Prüfmethoden weiter zu erforschen als auch zerstörende Methoden, bei denen z.B. die verbleibende Restbruchkraft, und somit der verbleibende Sicherheitsfaktor, über die Lebensdauer eines laufenden Seiles ermittelt wird.

Auch bei der Normung sind noch weitere Anstrengungen zu unternehmen, um hochmodulare Faserseile einzusetzen. So wurde bei der vom Autor durchgeführten Literaturrecherche festgestellt, dass kein einheitliches umfängliches Bezeichnungssystem verfügbar ist. In DIN EN ISO 10325 wird zwar für Faserseile aus HMPE eine Bezeichnungsmethode angegeben, jedoch umfasst diese nur die Seilgröße, die Seilkonstruktion, nur drei verschiedene Typen zur Auswahl, und den Werkstoff. In Anlehnung an dieses Bezeichnungssystem der DIN EN ISO 10325 und in Anlehnung an DIN EN 12385-2 sollte ein System erarbeitet werden, das eine einfache Klassifizierung erlaubt. Neben diesem einfachen Bezeichnungssystem ist es weiter nötig, Mindestangaben für ein Seilzertifikat festzulegen, wie es auch in ISO 2408 aufgeführt wird.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag hinsichtlich der Abschätzung der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile leisten. Die in dieser Arbeit vorgestellte neuartige Methode zur Abschätzung der Lebensdauer ist weiter zu erforschen und insbesondere für weitere Seilwerkstoffe und Seilkonstruktionen zu erweitern. Weitere Validierungen sind notwendig um die Verwendung zu belegen und abzusichern. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Kombination allein der Seilkonstruktionen, Seilwerkstoffen, Coatings usw. konnte nur ein Teilbereich der Faserseile mit dieser Arbeit abgedeckt werden und sollte in Zukunft weiter bearbeitet werden.

V. Literaturverzeichnis

- [Abr13]** Abraham, C.: Research of the Effects on durability of Fibre Ropes in the Application of the Cable Robot IPAnema. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2013.
- [Atk16]** Atkinson, N.: Incredible Stories from Space. Page Street Publishing. Salem, USA, 2016.
- [Bee90]** Beers D. E.: Vectran® fiber for ropes and cables. In: MTS Conference 1990 Proceedings, S. 662 - 669.
- [Bex04]** Bexco: Bexco Deep Rope Manual. Hamme, Belgien, 2004.
- [Bit80]** Bitting K.: Cyclic tests of new and aged Nylon and Polyester Line. In: 12th OTC Conference 1980 Proceedings, S. 509 - 516. Konferenz 5. – 8. Mai 1980, Houston, Texas, USA.
- [Boe15]** Boesten, J.: Latest on deepwater installation with HMPE rope. Vortrag OSV & Subsea Vessels North America, 18. März 2015, Houston, Texas, USA.
- [Bos96]** Bosman, R.: On the origin of heat build-up in Polyester ropes. In: Oceans '96 MTS/ IEEE Conference Proceedings, S. 332 - 338. Konferenz 23. – 26. September 1996. Broward County Convention Center, Fort Lauderdale, Florida, USA.
- [Bub16]** Bubeck, W.: Konstruktion eines Drallfängers für Faserseile. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2016.
- [Bun09]** Bunsell, A. R.: Handbook of tensile properties of textile and technical fibres. CRC Press Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 2009.
- [Cor15]** Cortland: Ultrasonic Non-destructive Structural Health Monitoring of Synthetic Ropes. IMCA Meeting 2015, 14. Mai 2015. Amsterdam, 2015.

- [Cra83]** Crawford, H.: Cyclic testing of continuously wetted synthetic fiber. In: 15th OTC Conference 1983 Proceedings, S. 455 - 466. Konferenz 2. – 5. Mai 1983, Houston, Texas, USA.
- [Cra12]** Crawford, A.: Winch Drum assembly and method for spooling a line. Europäisches Patent EP 2 125 598 B1, 2012.
- [Dav06]** Davies, P.: Tension/ Torsion behavior of deepwater synthetic Mooring Lines. In: OTC Conference 2006 Proceedings, S. 1 - 8. Konferenz 1. – 4. Mai 2006. Houston, Texas, USA.
- [Dav11]** Davies, P.: Mechanical behaviour of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations. In: Ocean Engineering, 38. Jahrgang, 2011, Nr. 12 p. 2208 - 2214.
- [Dam08]** Dambach Lagersysteme: Bedienungsanleitung Heber – Faserseilprüfstand. Dambach Lagersysteme. Bischweier, 2008.
- [Der09]** Derombise, G.: Degradation of Technora aramid fibres in alkaline and neutral environments. In: Polymer Degradation and Stability, 94. Jahrgang, 2009, Nr. 10 p. 1615 - 1620.
- [Die05]** Dietz, P.: Die Trommelgestaltung bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit Kunststoffseilen. IMW Institutsmitteilung Nr. 30, S. 27 – 32. Clausthal, 2005.
- [DIN74]** DIN: DIN 15020 Teil 1: 1974 – Grundsätze für Seiltriebe – Berechnung und Ausführung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 1974.
- [DIN99]** DIN: DIN EN 12562: 1999 - Textilien – Para-Aramid-Filamentgarne – Prüfverfahren. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 1999.
- [DIN00]** DIN: DIN EN 12224: 2000 – Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Bestimmung der Witterungsbeständigkeit. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2000.
- [DIN05]** DIN: DIN EN ISO 1969: 2005 - Faserseile – Polyethylen – 3- und 4-litzige Seile. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2005.

- [DIN08]** DIN: DIN EN 12385-4: 2008 – Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit – Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2008.
- [DIN10-1]** DIN: DIN EN ISO 10325: 2010 - Faserseile - Hochmodulares Polyethylen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2010.
- [DIN10-2]** DIN: DIN EN ISO 10547: 2010 – Polyester-Faserseile - Doppelgeflechtausführung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2010.
- [DIN10-3]** DIN: DIN EN ISO 10554: 2010 – Polyamid-Faserseile – Doppelgeflechtausführung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2010.
- [DIN10-4]** DIN: DIN EN ISO 10556: 2010 – Faserseile aus Polyester/ Polyolefin-Doppelfaserseile. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2010.
- [DIN11-1]** DIN: DIN EN ISO 2307: 2011 - Faserseile – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2011.
- [DIN11-2]** DIN: DIN EN ISO 9554: 2011 - Faserseile – Allgemeine Festlegungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2011.
- [DIN12-1]** DIN: DIN EN ISO 1140: 2012 - Faserseile – Polyamid – 3-, 4-, 8- und 12-litzige Seile. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2012.
- [DIN12-2]** DIN: DIN EN ISO 1141: 2012 - Faserseile – Polyester – 3-, 4-, 8- und 12-litzige Seile. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2012.
- [DIN12-3]** DIN: DIN EN ISO 1346: 2012 - Faserseile – Polypropylen-Splitfilm, Monofilament und Multifilament (PP2) und hochfestes Polypropylen-Multifilament (PP3) – 3-, 4-, 8- und 12-litzige Seile. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2012.

- [DIN13-1]** DIN: DIN 83307: 2013 – Schiffe und Meerestechnik – Rund- und spiralgeflochtene Chemiefaser-Seile. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2013.
- [DIN13-2]** DIN: DIN 83319: 2013 – Faserseile – Spleiße – Begriffe, sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2013.
- [DIN13-3]** DIN: DIN ISO 4309: 2013 – Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 2013.
- [Dry16]** Drydock: Macgregor announce new fibre-rope crane system.
<http://www.drydockmagazine.com>, abgerufen am 28.12.2016.
- [DSM12]** DSM: Dyneema Max Technology. Produktblatt DSM Dyneema. EL Urmond, The Netherlands, 2012.
- [Ern06]** Ernst, B.: Einsatzmöglichkeiten von Stahl- und Faserseilen bei Verankerungen von Offshoreplattformen. Diplomarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart, 2006.
- [Ern10]** Ernst, B.: Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik. AiF Abschlussbericht. Stuttgart, 2010.
- [Ern12]** Ernst, B.: Zum Einfluss von Verdrehungen auf die Eigenschaften zugschwellbelasteter Drahtseile. Dissertation. Stuttgart, 2012.
- [Fey91]** Feyrer, K.: Hochfestes Faserseil beim Lauf über Seilrollen. Draht, 42. Jahrgang, 1991, Nr. 11, S. 814 – 818.
- [Fey15]** Feyrer, K.: Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability – 2nd Edition. Springer. Berlin, 2015.
- [Fey11]** Feyrer, K.: Die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Größeneinfluss. Lift-Report, 37. Jahrgang, 2011, Nr. 1, S. 12 – 18.
- [Fin11]** Finckh-Jung, A.: Intelligent fiber ropes with new high tensile terminations. IFAC 2011, 29. – 30. November 2011. Antwerpen, 2011.

- [Fra16]** Franck, B.: Biegeversuche an Faserseilen. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2016.
- [Geo13]** Geo Gleistein: Nie wieder Kriech!. Pressemitteilung Gleistein Ropes Bremen, 2013.
- [Geo14]** Geo Gleistein: GeoMarine Katalog. Gleistein Ropes Bremen, 2014.
- [Ger15]** Gerz, B.: Experimentelle Untersuchungen an hochfesten Faserseilen für parallele Seilkinematiken der Fördertechnik. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2015.
- [Gru12]** Gruber, M.: Recherche und experimentelle Untersuchung von Seilen und deren Verschleiß für den Anwendungsfall parallele Seilroboter. Diplomarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2012.
- [Hae95]** Haeberle, B.: Pressung zwischen Drahtseil und Seilscheibe. Dissertation. Stuttgart, 1995.
- [Hea98]** Hearle, J. W. S.: Atlas of Fibre Fracture and Damage to Textiles. CRC Press Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 1998.
- [Hea01]** Hearle, J. W. S.: High-performance fibres. CRC Press Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 2001.
- [Hei11]** Heinze, T.: Dimensionieren je nach Einsatzfall. Hebezeuge Fördermittel, 51. Jahrgang, 2011, Nr. 6 p. 366 - 369.
- [Hei12]** Heinze, T.: Zum Verformungsverhalten von Faserseilen. Hebezeuge Fördermittel, 52. Jahrgang, 2012, Nr. 7-8, S. 400 – 402.
- [Hei13]** Heinze, T.: Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus hochfesten Polymerfasern. Dissertation. Chemnitz, 2013.
- [Hei14]** Heinze, T.: Treibscheibenaufzüge mit Faserseil. Lift-Report, 40. Jahrgang, 2014, Nr. 1, S. 10 – 16.

- [Him57]** Himmelfarb, D.: The Technology of cordage Fibres and Rope. Leonhard Hill Limited. London, 1957.
- [Hob91]** Hobbs, R. E.: Bending fatigue in high-strength fibre ropes. In: International Journal of Fatigue, 13. Jahrgang, 1991, Nr. 2 p. 174 – 180.
- [Hop97]** Hoppe, L. F. E.: Performance improvement of Dyneema in ropes. Oceans '97 MTS/ IEEE Conference Proceedings 1997, S. 314 - 318.
- [Hun15]** Huntley, E.: Non-Destructive Test methods for high-performance synthetic rope. OIPEEC-Konferenz 2015. Stuttgart, 2015.
- [ISO13]** ISO: ISO 16625: 2013 – Cranes and hoists – Selection of wire ropes, drums and sheaves. ISO. Genf, 2013.
- [Kle16]** Kleinert, R.: Evaluierung neuer Konzepte für Biegeversuche mit hochmodularen, laufenden Faserseilen. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2016.
- [Kre16]** Kretschmer, A.: Einflussfaktoren auf die Lebensdauer laufender Faserseile. Dissertation. Chemnitz, 2016.
- [Kur10]** Kuraray: Vectran® – Grasp the world of tomorrow. Produktblatt Kuraray America, Inc.. Fort Mill, South Carolina, USA, 2010.
- [Kur11]** Kuraray: General considerations for the processing of Vectran® Yarns. Produktblatt Kuraray America, Inc.. Fort Mill, South Carolina, USA, 2011.
- [Kue08]** Kühner, K.: Experimentelle Erprobung und Inbetriebnahme eines Seilroboters. Studienarbeit Universität Stuttgart. Stuttgart, 2008.
- [Kue17]** Kühner, K.: Beitrag zur Beurteilung der Schädigung von Seilbahnseilen durch Drehung und Verdrehung im Betrieb. Dissertation. Stuttgart, 2017.
- [Kyo15]** Kyosev, Y.: Braiding Technology for Textiles. Elsevier Ltd. Cambridge, 2015.
- [Leb00]** Lebus: Warum man an Lebus nicht vorbeikommt... . Produktinformation Lebus Germany. Finning, 2000.

- [Leb09]** Lebus: The original parallel groove spooling system. Produktinformation Lebus Germany. Finning, 2009.
- [Lie12]** Liebherr: Patent DE 202011001845 U1 – Seiltrommel und Seilrolle für Faserseiltriebe. München, 2012.
- [Lie15]** Liebherr: Datenblatt Raupenkran LR 1600/2. Liebherr-Werk Ehingen. Ehingen, 2015.
- [Lan15]** Lankhorst: LankoDeep AHC Soft Rope System. Pressemitteilung Lankhorst Euronete, Porto 2015.
- [Lif14]** Lift Report: Textile Aufzugsseile: stahlfeste Leichtigkeit. Lift-Report, 40. Jahrgang, 2014, Nr. 5, S. 75 – 76.
- [Loh11-1]** Lohrengel, A.: Untersuchungen mehrlagig bewickelter Seiltrommeln mit Faserseilen. IMW Institutsmitteilung Nr. 36, S. 11 – 20. Clausthal, 2011.
- [Loh11-2]** Lohrengel, A.: Sicherer Einsatz von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen und/ oder Seilen großer Durchmesser. Technical Report Series TU Clausthal Fac3-11-03, S. 1 – 23. Clausthal, 2011.
- [Loh13-1]** Lohrengel, A.: Auswirkung veränderter Seileigenschaften auf das Beanspruchungsverhalten mehrlagig bewickelter Windentrommeln bei der Substitution von Draht- durch Hochfestfaserseile. IMW Institutsmitteilung Nr. 38, S. 57 – 60. Clausthal, 2013.
- [Loh13-2]** Lohrengel, A.: Potentiale sowie Auswirkungen von Hochfestfaserseilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln im Bergbau-, Offshore- als auch Kranbereich. Technical Report Series TU Clausthal Fac3-13-02, S. 1 – 15. Clausthal, 2013.
- [Mam09]** Mammitzsch, J.: Anwendungsspezifische Beschichtungen für Faserseile im Maschinenbau. In: 12. Chemnitzer Textiltechnik Tagung Proceedings, S. 199 - 205. Konferenz 30. September/ 1. Oktober 2009, Chemnitz, 2009.

- [Mam12]** Mammitzsch, J.: Witterungsbeständigkeit von Seilen aus hochfesten Polymerfasern. In: 5. Fachkolloquium InnoZug Proceedings, S. 13 - 24. Konferenz 7./ 8. Mai 2012. Chemnitz, 2012.
- [McK04]** McKenna, H. A.: Handbook of fibre rope technology. CRC Press Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 2004.
- [Mic11]** Michael, M.: Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen. Dissertation. Chemnitz, 2011.
- [Min45]** Miner, M. A.: Cumulative damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics Trans ASNE 67 1945, 159 – 164.
- [Nov14]** Novak, G.: Entwicklung eines hochfesten Faserseiles für Regalbediengeräte. ZIM-Abschlussbericht. Stuttgart, 2014.
- [Nov15]** Novak, G.: Use of high-modulus fibre ropes in rope drives. OIPEEC-Konferenz 2015. Stuttgart, 2015.
- [Nut10]** Nuttall, A.: Service life of synthetic fibre ropes in deep water lifting operations. Presentation at: The 15th North Sea Offshore Cranes & Lifting Conference. April 27 - 29 2010. Aberdeen Exhibition & Conference Centre. Aberdeen, UK.
- [OEn16]** Offshore Engineer: MacGregor releases fiber-rope retrofit option. www.oedigital.com, abgerufen am 27.12.2016.
- [Off07-1]** Offshore: Fiber rope system scores heavily over wire for deepwater installations. www.offshore-mag.com, abgerufen am 28.12.2016.
- [Off07-2]** Offshore: New traction control unit extends life of fiber rope. www.offshore-mag.com, abgerufen am 28.12.2016.
- [Pal24]** Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure VDI 68 1624, 339 – 341.
- [Pat03]** Patterson, M.: ISIS Elevator. Elevator World, Februar 2008, S. 52 - 55.

- [Pau08]** Paul, H.: Spleißbuch: Das Standardwerk für fachmännisches Spleißen. Geo. Gleistein & Sohn. Bremen, 2008.
- [Pig79]** Pigliacampi, J. J.: Performance bases for the use of aramid fiber in marine applications. IEEE Conference Proceedings 1979, S. 440 - 449.
- [Phi13]** Phillystran: Technical Bulletin SocketFast Blue A-20. Phillystran. Montgomeryville, 2013.
- [Pot09]** Pott, A.: Paralleler Seilroboter zur Handhabung in allen Größen. Stuttgart, 2009.
- [Rei14]** Reimann, N.: Untersuchung des Drehverhaltens textiler Torsionselemente. In: 6. Fachkolloquium InnoZug 2014 Proceedings. S. 104 – 110. Konferenz 23./ 24. September 2014, Chemnitz 2014.
- [Rid08]** Ridge, I.: Torsional characterization of ropes used offshore. Journal Strain Analysis, 43. Jahrgang, 2008, Nr. 2, S. 121 - 139.
- [Rie86]** Riewald, P.: Performance Analysis of an Aramid Mooring Line. In: 18th OTC Conference 1986 Proceedings, S. 305 - 316. Konferenz 5. – 8. Mai 1986. Houston, Texas, USA.
- [Rol10]** Rolls-Royce: Fact sheet: Cable traction control unit – CTCU. 2010, Hareid.
- [Sam13]** Samson Ropes: Samson Technical Bulletin – Inspection & Retirement Pocket Guide. Ferndale, 2013.
- [Sam16]** Samson Ropes: K-100 is pulling its weight for the U.S. Navy. Ferndale, 2016.
- [Sch05]** Schönherr, S.: Einfluss der seitlichen Seilablenkung auf die Lebensdauer von Drahtseilen beim Lauf über Seilscheibe. Dissertation. Stuttgart, 2005.
- [Sch09]** Schönherr, S.: Regressionsanalyse. Interner Vortrag. Stuttgart, 2009.
- [Sch14-1]** Schulze, M.: Auswirkungen von Faserseilen auf die Bewicklung von Seiltrommeln. In: 6. Fachkolloquium InnoZug 2014 Proceedings. S. 69 – 76. Konferenz 23./ 24. September 2014, Chemnitz 2014.

- [Sch14-2]** Schmieder, A.: Schadensanalyse hochfester Faserseile. Logistics Journal, 2012.
- [Sch16]** Schlarmann, R.: Operation of mobile cranes using synthetic rope. IFAC 2016, 31. Mai – 01. Juni 2016. Bremen, 2016.
- [Sha76]** Sharp, D. M.: Rope in the Marine Environment. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 190. Jahrgang, 1976, Nr. 5 p. 45 – 57.
- [Sha04]** Sharples, M.: Post Mortem Failure Assessment of MODUs during Hurricane Ivan. Bureau of Safety and Environmental Enforcement Report. Houston, Texas, USA, 2004.
- [Shi94]** Shin, H.: Laboratory tests on synthetic fiber ropes. In: 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 1994 Proceedings, S. 441 - 448. Konferenz 27. Februar– 3. März 1994. Houston, Texas, USA.
- [Sie10]** Siebertz, K.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE). Springer. Berlin, 2010.
- [Slo03]** Sloan, F.: Improving bend-over-sheave fatigue in fiber ropes. In: Oceans '03 Conference Proceedings, S. 1054 - 1057. Konferenz 22. – 26. September 2003. San Diego, Kalifornien, USA.
- [Sme10]** Smeets, P.: New developments on ropes with Dyneema for running wire applications. In: 4. Fachkolloquium InnoZug 2010 Proceedings. S. 3 – 15. Konferenz 22./ 23. September 2010, Chemnitz 2010.
- [Sme12]** Smeets, P.: Latest developments in high performance fiber ropes with Dyneema®. In: Stuttgarter Seiltage 2012 Proceedings, S. 1 - 12. Konferenz 12./ 13. März 2012. Maritim Hotel, Stuttgart, 2012.
- [Soe15]** Söhnchen, R.: Securing safety of ropes with a visual rope inspection system. OIPEEC-Konferenz 2015. Stuttgart, 2015.
- [Sta71]** Stange, K.: Angewandte Statistik – 2. Teil – Mehrdimensionale Probleme. Springer, Berlin, 1971.

- [Teu12]** Teufelberger: Platinum. Produktdatenblatt Teufelberger. Wels, 2012
- [Teu16]** Teufelberger: soLite – Das hochfeste Faserseil für Krane. Produktdatenblatt Teufelberger. Wels, 2016
- [Tor10]** Torben, S.: Field pilot of deep water installation in two-fall using fiber rope. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010 Proceedings, S. 1 - 10. Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute. Rio de Janeiro, Brasilien, 2010.
- [Van90]** van Leeuwen J.: Bending fatigue of Twaron Aramid ropes. In: MTS Conference 1990 Proceedings, S. 670 - 676.
- [VDI90]** VDI: VDI 2500: 1990 - Faserseile – Beschreibung, Auswahl, Bemessung. VDI Gesellschaft. Düsseldorf, 1990.
- [Ven08]** Vennemann, O.: Extending the Use of Conventional Construction Technology for the Installation of Subsea Production Facilities in Deep Water. In: OTC Conference 2008 Proceedings. Houston, Texas USA.
- [Ver11]** Verreet, R.: A new wand innovative wire rope bending fatigue machine. OIPEEC-Konferenz 2011. Stuttgart, 2011.
- [Vog98]** Vogel, W.: Dauerbiegeversuche an gedrehten und geflochtenen Faserseilen aus hochfesten Polyethylenfasern. Technische Textilien, 41. Jahrgang, 1998, Nr. 3, S. 126 – 128.
- [Vog02-1]** Vogel, W.: Einfluss der Schlaglänge auf die Lebensdauer laufender hochfester Faserseile, Euroseil, 121. Jahrgang, 2002, Nr. 3, S. 57 – 58.
- [Vog02-2]** Vogel, W.: Atlasseile beim Lauf über Scheiben, Euroseil, 121. Jahrgang, 2002, Nr. 4, S. 64 – 65.
- [Vog12]** Vogel, W.: Ansätze zur Lebensdauerberechnung laufender Stahl- und Faserseile. In: 5. Fachkolloquium InnoZug 2012 Proceedings. S. 1 – 6. Konferenz 7./ 8. Mai 2012, Chemnitz 2012.

- [Web13]** Weber, T.: Beitrag zur Untersuchung des Lebensdauerverhaltens von Drahtseilen unter einer kombinierten Beanspruchung aus Zug, Biegung und Torsion. Dissertation. Stuttgart, 2013.
- [Weh97]** Wehking, K.-H.: Endurance of high-strength fibre ropes running over pulleys. OIPEEC Round Table Reading 1997. Reading 1997.
- [Weh00]** Wehking, K.-H.: Lebensdauer und Ablegereife von Aramidfaserseilen in Treibscheibenaufzügen der Schindler AG. Interner Forschungsbericht. Ebikon, 2000.
- [Weh05]** Wehking, K.-H. et al., Laufende Seile - Bemessung und Überwachung. Expert Verlag Renningen, 2005
- [Weh16]** Wehking, K.-H.: Auslegung von Seiltrieben – Lebensdauerreduktion durch Gegenbiegung. Lift-Report, 42. Jahrgang, 2016, Nr. 1, S. 4 – 14.
- [Weh17]** Wehr, M.: Beitrag zur Untersuchung von hochfesten synthetischen Faser-seilen unter hochdynamischer Beanspruchung. Dissertation. Stuttgart, 2017.
- [Wei08]** Weiskopf, U.: Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung. Dissertation. Stuttgart, 2008.
- [Wen16]** Weng, D.: Untersuchung von Bruchenden hochmodularer Faserseile. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2016.
- [Win15]** Winter, S.: From 4 mm to 50 mm rope diameter – Scaling up a new termination for high-modulus fibre ropes. OIPEEC-Konferenz 2015. Stuttgart, 2015.
- [Wol15]** Wolf, A.: Mikroskopieren und Klassifizieren von Bruchenden hochmodularer Faserseile. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart, 2015.

VI. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Molekülstruktur eines niederfesten Faserwerkstoffes [McK04]	1
Abb. 2: Ideale Molekülstruktur eines hochmodularen Faserseiles [McK04]	2
Abb. 3: Herstellprozess von HMPE [Bun09]	3
Abb. 4: Strukturformel von Kevlar® mit zwei Benzolringen [Hea01]	5
Abb. 5: Strukturformel von Technora® [Hea01]	5
Abb. 6: Strukturformel von Vectra® [Hea01]	6
Abb. 7: Strukturformel von PBO [McK04]	6
Abb. 8: 8-litziges geflochtenes Faserseil [McK04]	7
Abb. 9: Verseilprinzip für Einfachgeflechte [Kyo15]	8
Abb. 10: Verseilprinzip Einfachgeflecht in der Draufsicht [McK04]	8
Abb. 11: 12-litziges Einfachgeflecht [McK04]	8
Abb. 12: Doppelgeflecht [McK04]	9
Abb. 13: Faserseil in geschlagene Konstruktion mit drei Litzen [McK04]	9
Abb. 14: Faserseil in gelegter Konstruktion [McK04]	10
Abb. 15.: Aufbau eines Parallellitzenseiles [DIN10-1]	11
Abb. 16: Aufbau eines Parallelfaserseiles [Bex04]	11
Abb. 17: Prinzipskizze einer Kern-Mantel-Konstruktion [Geo14]	11
Abb. 18: Geflochtenes Faserseil mit Mantel	11
Abb. 19: Faserseil in geflochtener Konstruktion mit Mantel [McK04]	12
Abb. 20: Prinzipdarstellung der Platinum-Technologie von Teufelberger (Rot und Blau Verbindungsfäden) [Teu12]	12
Abb. 21: Aufbau eines IPA-Seilroboters [Kue08]	14
Abb. 22: K-100 auf Manitowoc Kran [Sam16]	15
Abb. 23: soLite auf Liebherr Kran [Teu16]	15
Abb. 24: FRDS von Rolls-Royce (Ziffer 4: CTCU) [Tor10]	16
Abb. 25: Spillwinde von MacGregor [Dry16]	17
Abb. 26: Chevron-Winde Soft Rope Systems [Boe15]	18
Abb. 27: Beispiel für den Aufbau einer Multi-Component Mooring Line aus Drahtseil und Faserseil [Sha04]	22
Abb. 28: Faserfraktur HMPE [Hea98]	24
Abb. 29: Faserfraktur Aramid [Hea98]	25
Abb. 30: Computertomografie-Aufnahme eines Faserseiles [Sch14-2]	26
Abb. 31: Längsschnitt einer Computertomografie-Aufnahme [Sch14-2]	26
Abb. 32: Bruchende LCP (Gerades Bruchende) [Wol15]	26
Abb. 33: Bruchende HMPE (Einzelne lange Faserbruchenden) [Wol15]	26

Abb. 34: Augspleiß [Pau08].....	27
Abb. 35: Kunststoffverguss.....	28
Abb. 36: HIKE-Endverbindung für ein 4 mm Faserseil [Win15].....	28
Abb. 37: Drehmomentkennlinie eines drehungsfreien Drahtseiles in 35x7 Konstruktion [Web13].....	30
Abb. 38: Drehmomentkurve des geflochtenen Seilmusters [Rei14]	30
Abb. 39: Drehmomentkurve nach Ridge [Rid08]	31
Abb. 40: Drehmomentkennlinie der gelegten Konstruktion	32
Abb. 41: Drehmomentkennlinie der geflochtenen Konstruktion	33
Abb. 42: Diagramm der Seildrehmomente aus Abb. 41 zusammen mit dem Dichtungsreibmoment des entwickelten Drallfängers [Bub16].....	34
Abb. 43: Atlasseil links in Längsansicht, rechts im Querschnitt.....	36
Abb. 44: Vergleich der Versuchsergebnisse von Vogel mit den Berechnungsergebnissen mit der Formel von Feyrer (Das Konfidenzintervall von 80% ist blau gestrichelt eingezeichnet).....	38
Abb. 45: Vergleich der Lebensdauergleichungen von Feyrer, Vogel und Heinze an einem Berechnungsbeispiel.....	42
Abb. 46: Auszug aus Pocket Guide für AmSteel Blue von Samson Ropes (oben Seilzustand außen, unten Seilzustand im Innern) [Sam13]	44
Abb. 47: SoLite mit roter Zwischenschicht [Teu16]	45
Abb. 48: Fibre Rope Deployment System von Rolls-Royce Marine [Rol10].....	48
Abb. 49: Spillwinde mit hochmodularem Faserseil [Boe15]	49
Abb. 50: Iso- Ansicht der DeepTek Winde [Cra12].....	49
Abb. 51: Querschnitt der DeepTek Winde [Cra12]	49
Abb. 52: Systemrillung Lebus [Leb09].....	50
Abb. 53: Auflaufwinkel Kompensator mit Scheibe [Leb00].....	51
Abb. 54: Kreuzgewindespindel [Leb00]	51
Abb. 55: Liebherr Raupenkran LR 1600/2 als Beispiel für die Maschinenbasierten Lebensdauereinflüsse (Raupenkran aus [Lie15], Eintragungen durch Autor)	53
Abb. 56: Lebensdauerbeeinflussendes Faktorenkollektiv für laufende hochmodulare Faserseile	54
Abb. 57: Definition Gleichsinnige Biegung/ Gegensinnige Biegung [DIN74].....	55
Abb. 58: Einfluss der Gegenbiegung auf die Seillebensdauer [Hei11]	56
Abb. 59: Versuchsaufbau der Gegenbiegungsversuche von Franck [Fra16].....	56
Abb. 60: Ergebnisse der Gegenbiegungsversuche von Franck (nach [Fra16]).....	57
Abb. 61: Ergebnisse der Biegeversuche mit unterschiedlichen Biegelängen von Franck (nach [Fra16])	58

Abb. 62: Umschlingungswinkel um Seilscheibe (nach [Fey15])	58
Abb. 63: Längenbezogene Anpresskraft eines Seiles beim Lauf über eine Seilscheibe [Hae95]	59
Abb. 64: Einfluss des Rillenradius auf die Seillebensdauer [Hei11]	62
Abb. 65: Rillenform nach Liebherr [Lie12]	63
Abb. 66: Rillenform nach Kretschmer [Kre16]	63
Abb. 67: Einfluss der Beschleunigung und der Geschwindigkeit auf die Seillebensdauer [Weh17]	64
Abb. 68: Biegemaschine SBM30	69
Abb. 69: Seitenansicht des am IFT aufgebauten Regalbediengerätes (Regalbediengerät aus [Dam08], Eintragungen durch Autor)	71
Abb. 70: Verdrehtes Seil während eines RBG-Versuches	74
Abb. 71: Lebensdauergeraden eines Drahtseiles und eines hochmodularen Faserseiles [Fey91]	77
Abb. 72: Ausgangssituation der Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes	78
Abb. 73: Ergebnis der Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes	79
Abb. 74: Verlauf der Ist-Seildurchmesser bei verschiedenen D/d-Verhältnissen und Safety Factors	81
Abb. 75: Beispiele für 3er- und 4er-Blöcke	87
Abb. 76: Ablaufdiagramm der Auswertung	88
Abb. 77: Ergebnistabelle einer lokalen Auswertung am Beispiel der Ergebnisse von Gerz, Erklärung: farbige Rahmen markieren Referenzen im Text unten	89
Abb. 78: Ergebnisplot für das Beispiel aus Abb. 77	91
Abb. 79: Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes (in Anlehnung an [Weh05])	104
Abb. 80: Wirkende Kräfte und Momente bei Schrägzug [Sch05]	107
Abb. 81: Seilverdrehung beim Auflaufen auf die Rillenflanke unter Schrägzug [Sch05]	107
Abb. 82: Qualitative Darstellung der Ovalisierung eines Faserseiles bei unterschiedlichen r/d-Verhältnissen, links: $r/d = 0,53$, rechts: $r/d = 0,51$ (Rot, Seilquerschnitt unbelastet)	108
Abb. 83: Verschiedene Spulbereiche bei einer einlagigen Seiltrommel	109
Abb. 84: Vertikal gelenkig gelagerte Seilscheibe der Schleppwinde aus Abb. 85	110
Abb. 85: Spulhilfe mit Kreuzgewindespindel einer Schleppwinde	110
Abb. 86: Spulrichtung in Abhängigkeit der Schlagrichtung des Faserseiles [ISO13]	110
Abb. 87: Prinzipdarstellung der neuartigen Spulvorrichtung	111
Abb. 88: Wirkende Kräfte und Momente bei Schrägzug [Sch05]	112

VII. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Standardwerte der mechanischen Eigenschaften verschiedener hochmodularer Faserwerkstoffe und Stahl [McK04]	2
Tabelle 2: Regressionskoeffizienten für Lebensdauergleichung von Feyrer	37
Tabelle 3: Regressionskoeffizienten für die Formel von Vogel	39
Tabelle 4: Regressionskoeffizienten für die Formel von Heinze für geflochtene Faserseile mit Mantel	41
Tabelle 5: Parameter der im ZIM-Forschungsprojekt durchgeführten Biegeversuche	72
Tabelle 6: Ergebnisse der Biegeversuche aus Phase 2 für das Prüfmuster in Wire Rope Construction aus LCP und HMPE	72
Tabelle 7: Parameter der im ZIM-Forschungsprojekt durchgeführten Biegeversuche	73
Tabelle 8: Ergebnisse der praxisnahen Dauerversuche für das Prüfmuster in Wire Rope Construction aus LCP aus Phase 2	73
Tabelle 9: Quotient der mittleren Biegewechselzahl Biegeversuch und mittlere Hubspielzahl RBG	74
Tabelle 10: Parameterkombinationen der durchzuführenden Biegeversuche	78
Tabelle 11: Aufgestellte Ansätze zur Lebensdauerabschätzung	83
Tabelle 12: Verwendete Ergebnisse von Feyrer 1991 [Fey91]	84
Tabelle 13: Verwendete Ergebnisse von Heinze für Dyneema SK 75 (nach [Hei13])	85
Tabelle 14: Verwendete Ergebnisse von Heinze für Vectran T97 (nach [Hei13])	85
Tabelle 15: Verwendete Ergebnisse von Heinze für Technora T221 (nach [Hei13])	86
Tabelle 16: Verwendete Ergebnisse von Gerz ([Ger15])	86
Tabelle 17: Aufstellung der am besten geeigneten Ansätze der lokalen Auswertung	92
Tabelle 18: Aufstellung der am besten geeigneten Ansätze der herkömmlichen Auswertung	94
Tabelle 19: Bestimmtheitsmaße und Regressionskoeffizienten für die einzelnen Datensätze und Ansätze der Auswertung der 3-Punkt-Methode bei herkömmlicher Auswertung	95
Tabelle 20: Seilkraftfaktor f_{S1} für die Reibung der Lastführung [Weh05]	99
Tabelle 21: Wirkungsgrad für Seilscheibenlagerung [DIN74]	99
Tabelle 22: Seilkraftfaktor f_{S3} für parallele Seile [Weh05]	100
Tabelle 23: Grenzsicherheitsfaktoren SF_{Grenz}	101
Tabelle 24: Minderungsfaktoren f_{N1} für r/d-Verhältnis (nach [Hei11])	101
Tabelle 25: Minderungsfaktoren f_{N2} für Gegenbiegung (nach [Fra16] und [Hei11])	102
Tabelle 26: Koeffizienten und Parameter zur Berechnung des Faktors f_{N3}	103

VIII. Formelverzeichnis

(1)	Lebensdauergleichung von Feyrer und Vogel	37
(2)	Lebensdauergleichung von Vogel (durchmesserbezogen)	39
(3)	Lebensdauergleichung von Vogel (massebezogen)	39
(4)	Lebensdauergleichung von DSM	40
(5)	Lebensdauergleichung von Heinze	40
(6)	Lifetime Factor	42
(8)	Ansatz 3	83
(9)	Ansatz 4	83
(10)	Ansatz 5	83
(11)	Ansatz 6	83
(12)	Ansatz 8	83
(13)	Ansatz 9	83
(14)	Ansatz 10	83
(15)	Ansatz 11	83
(16)	Ansatz 12	83
(17)	Ansatz 13	83
(18)	Berechnung Seilkraftfaktoren	98
(19)	Berechnung Lebensdauerfaktoren	98
(20)	Minderungsfaktor für Wirkungsgrad	99
(21)	Minderungsfaktor für Biegelänge	102

IX. Abkürzungsverzeichnis

HMPE	High Molecular Polyethylen
LCP	Liquid Crystal Polymer
PBO	Polybenzoxazol
UV	Ultraviolett
SF	Seilsicherheitsfaktor/ Safety Factor
D/d	Verhältnis Seilscheibendurchmesser D zu Seildurchmesser d
z.B.	zum Beispiel
Bsp.	Beispiel
bzw.	beziehungsweise
etc.	et cetera
sog.	sogenannt

X. Anhang A1

Anmerkung: In den Ergebnisplots sind nur die Ergebnisse der niedrigen Safety Factors dargestellt, auf deren Basis die Analyse und Bewertung der Ansätze erfolgte.

Datensatz Feyrer 1991 - Dyneema SK 60

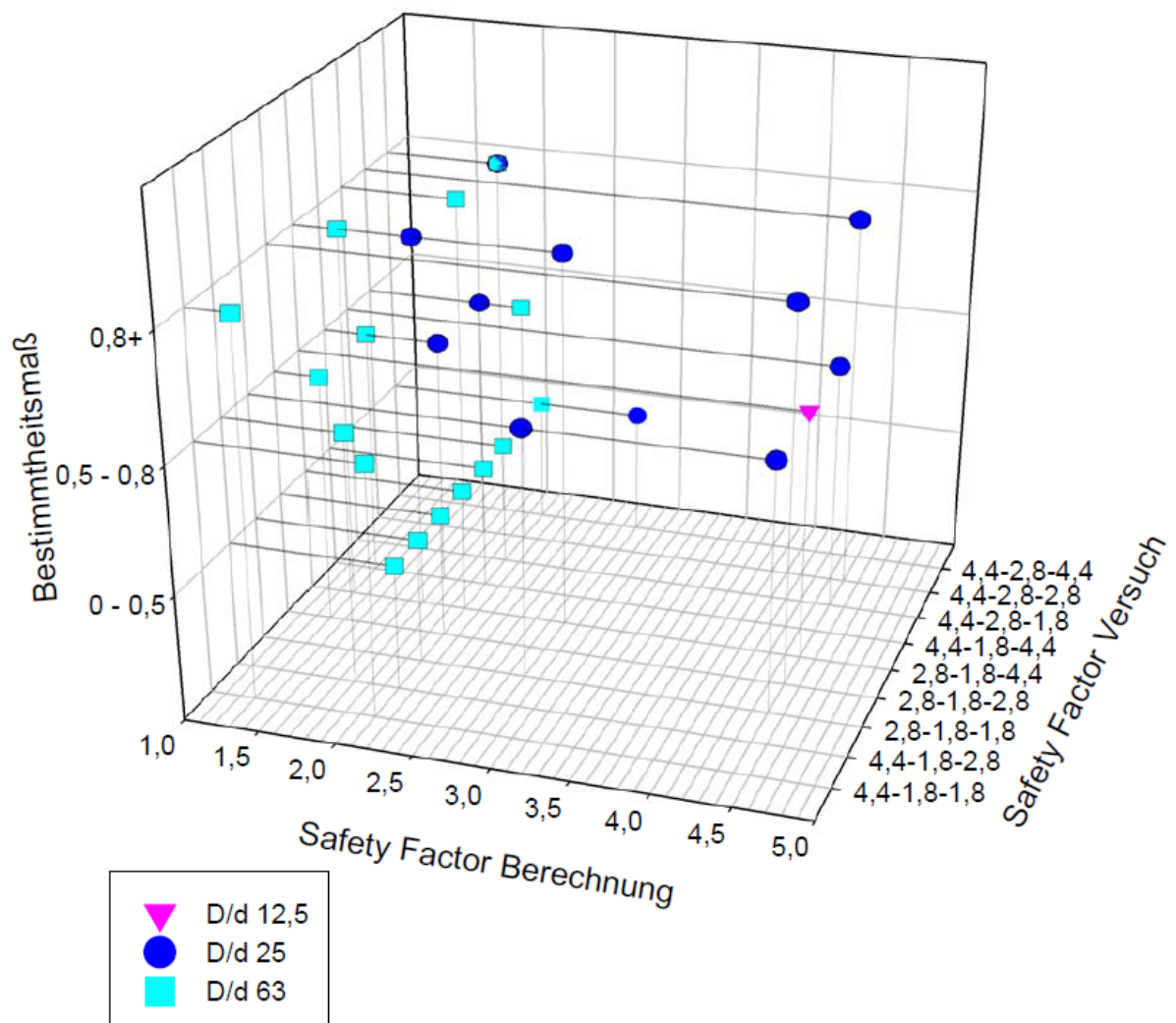
1. Ergebnistabelle

Datensatz: Feyrer
D/d: 12,5/ 25
Seilwerkstoff: Dyneema SK60
Ansatz: 6

		Prognose											
		D/d				12,5				25			
Versuch	12,5/ 12,5/ 25	SF	7,6	4,4	2,8	1,8	4,4	2,8	1,8	2,1	1,8	1,3	
		7,6 4,4 4,4											
		7,6 4,4 2,8											
		7,6 4,4 1,8											
		7,6 2,8 4,4											
		7,6 2,8 2,8											
		7,6 2,8 1,8											
		7,6 1,8 4,4											
		7,6 1,8 2,8											
		7,6 1,8 1,8											
		4,4 2,8 4,4											
		4,4 2,8 2,8											
		4,4 2,8 1,8											
		4,4 1,8 4,4											
		4,4 1,8 2,8											
		4,4 1,8 1,8											
		2,8 1,8 4,4											
		2,8 1,8 2,8											
		2,8 1,8 1,8											

	Bestimmtheitsmaß außerhalb Bereich
	Bestimmtheitsmaß $0 < R^2 < 0,499$
	Bestimmtheitsmaß $0,5 < R^2 < 0,799$
	Bestimmtheitsmaß $0,8 < R^2 < 1$
	Keine Daten
	Werte wurden im Versuch abgeprüft

2. Ergebnisplot



Datensatz Heinze - Dyneema SK 75

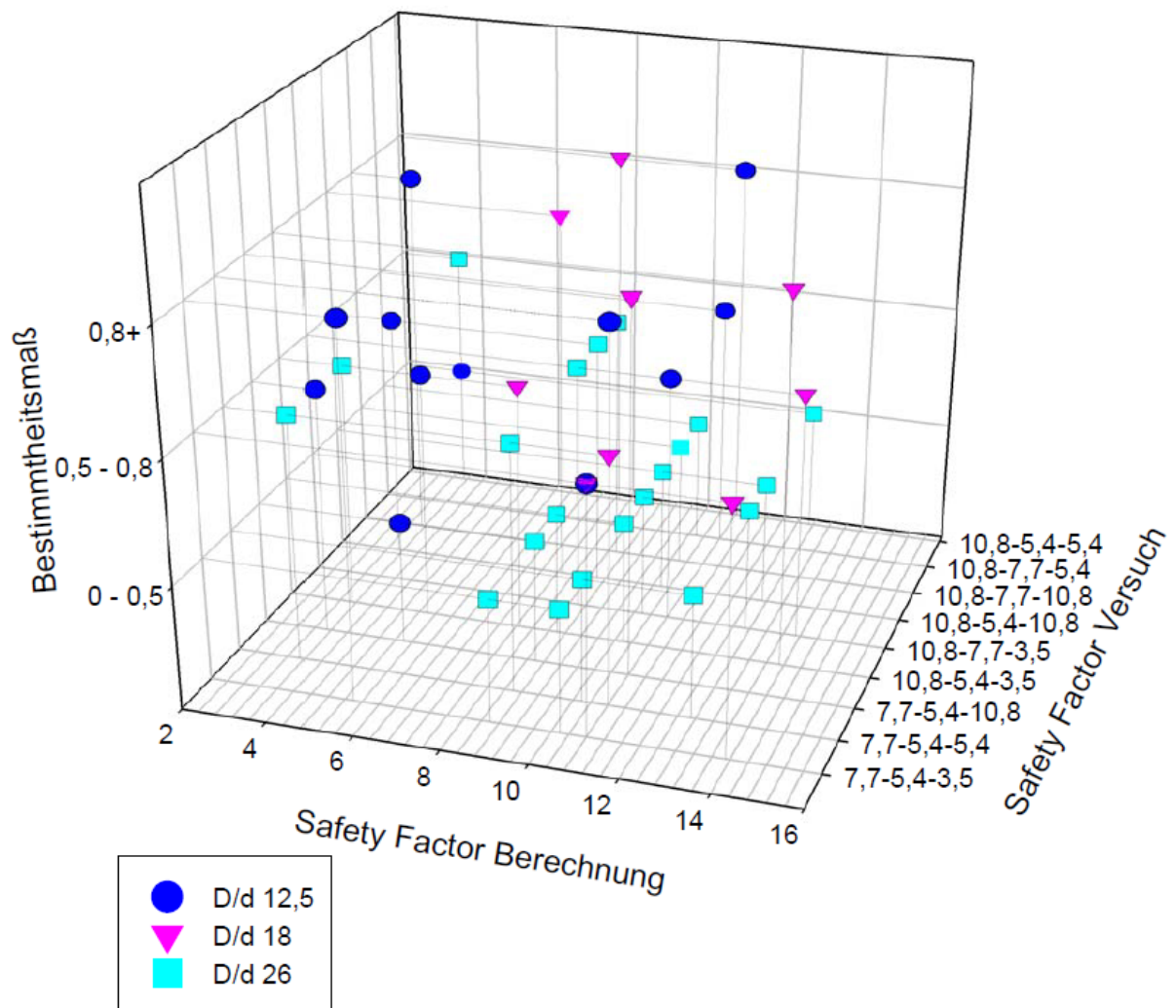
1. Ergebnistabelle

Datensatz: Heinze
 D/d: 12,5/ 18
 Seilwerkstoff: Dyneema SK 75
 Ansatz: 6

		Prognose											
		D/d	12,5				18			25			
Versuch	12,5/ 12,5/ 18	SF	13,9	10,8	7,7	5,4	10,8	5,4	3,5	12,7	10,2	8,6	3,5
		13,9 10,9 10,8											
		13,9 10,9 5,4											
		13,9 10,9 3,5											
		13,9 7,7 10,8											
		13,9 7,7 5,4											
		13,9 7,7 3,5											
		13,9 5,4 10,8											
		13,9 5,4 5,4											
		13,9 5,4 3,5											
		10,8 7,7 10,8											
		10,8 7,7 5,4											
		10,8 7,7 3,5											
		10,8 5,4 10,8											
		10,8 5,4 5,4											
		10,8 5,4 3,5											
		7,7 5,4 10,8											
		7,7 5,4 5,4											
		7,7 5,4 3,5											

	Bestimmtheitsmaß außerhalb Bereich
	Bestimmtheitsmaß $0 < R^2 < 0,499$
	Bestimmtheitsmaß $0,5 < R^2 < 0,799$
	Bestimmtheitsmaß $0,8 < R^2 < 1$
	Keine Daten
	Werte wurden im Versuch abgeprüft

2. Ergebnisplot



Datensatz Gerz - Dyneema SK 78

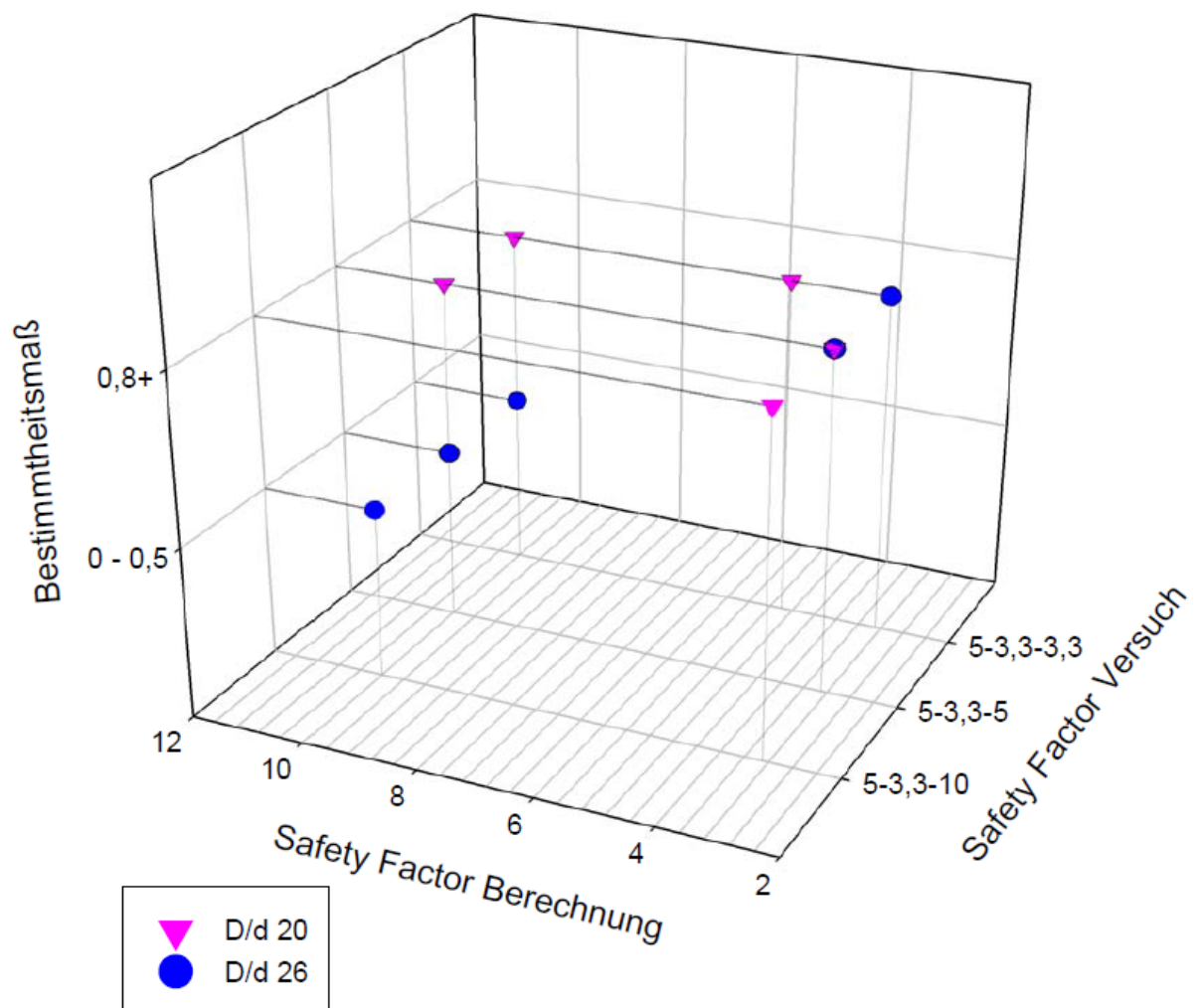
1. Ergebnistabelle

Datensatz: Gerz
 D/d: 15/ 20
 Seilwerkstoff: Dyneema SK78
 Ansatz: 11

			Prognose								
			15			20			26		
Versuch	15/ 15/ 20	SF	10	5	3,3	10	5	3,3	10	5	3,3
		10 5 10									
		10 5 5									
		10 5 3,3									
		10 3,3 10									
		10 3,3 5									
		10 3,3 3,3									
		5 3,3 10									
		5 3,3 5									
		5 3,3 3,3									

	Bestimmtheitsmaß außerhalb Bereich
	Bestimmtheitsmaß $0 < R^2 < 0,499$
	Bestimmtheitsmaß $0,5 < R^2 < 0,799$
	Bestimmtheitsmaß $0,8 < R^2 < 1$
	Keine Daten
	Werte wurden im Versuch abgeprüft

2. Ergebnisplot



Datensatz Heinze – Technora T221

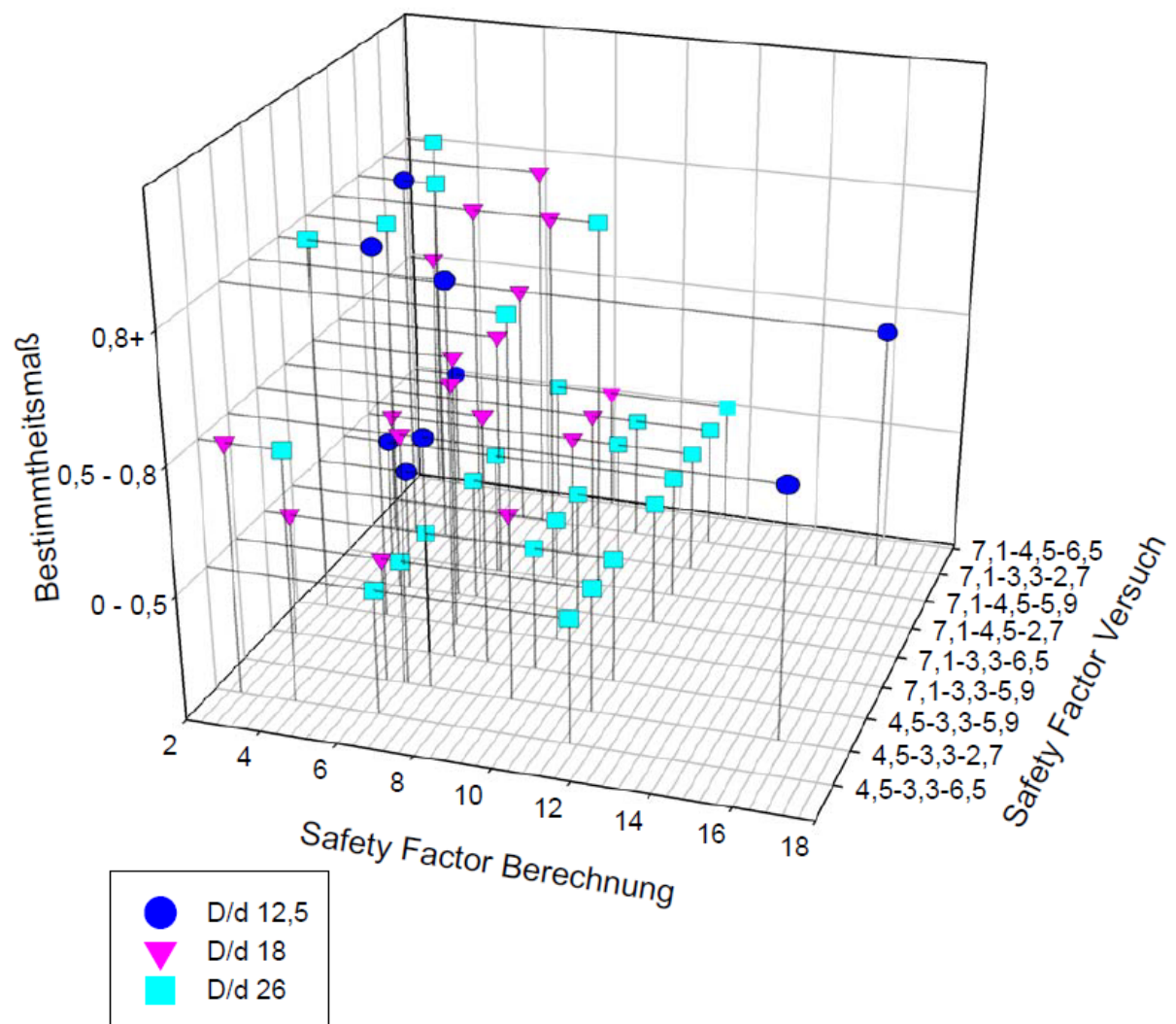
1. Ergebnistabelle

Datensatz: Heinze
 D/d: 12,5/ 18
 Seilwerkstoff: Technora T221
 Ansatz: 6

		Prognose															
		D/d				12,5				18				25			
Versuch	12,5/ 12,5/ 18	SF	16,2	7,1	4,5	3,3	8	6,5	5,9	2,7	11,4	9,3	6,4	4,2	2,8		
		16,2 7,1 8															
		16,2 7,1 6,5															
		16,2 7,1 5,9															
		16,2 7,1 2,7															
		16,2 4,5 8															
		16,2 4,5 6,5															
		16,2 4,5 5,9															
		16,2 4,5 2,7															
		16,2 3,3 8															
		16,2 3,3 6,5															
		16,2 3,3 5,9															
		16,2 3,3 2,7															
		7,1 4,5 8															
		7,1 4,5 6,5															
		7,1 4,5 5,9															
		7,1 4,5 2,7															
		7,1 3,3 8															
		7,1 3,3 6,5															
		7,1 3,3 5,9															
		7,1 3,3 2,7															
		4,5 3,3 8															
		4,5 3,3 6,5															
		4,5 3,3 5,9															
		4,5 3,3 2,7															

	Bestimmtheitsmaß außerhalb Bereich
	Bestimmtheitsmaß $0 < R^2 < 0,499$
	Bestimmtheitsmaß $0,5 < R^2 < 0,799$
	Bestimmtheitsmaß $0,8 < R^2 < 1$
	Keine Daten
	Werte wurden im Versuch abgeprüft

2. Ergebnisplot



Datensatz Heinze – Vectran T97

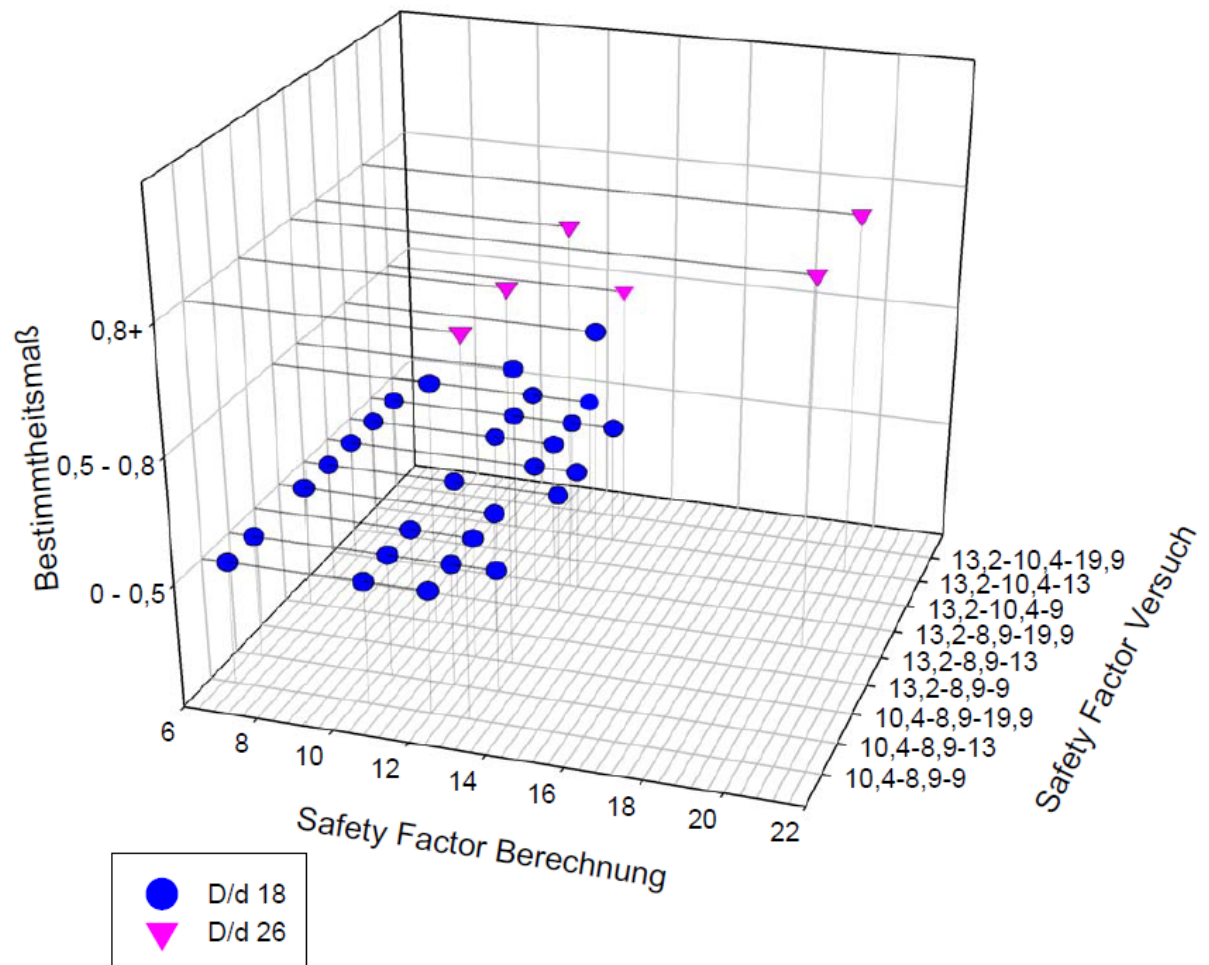
1. Ergebnistabelle

Datensatz: Heinze
 D/d: 12,5/ 18
 Seilwerkstoff: Vectran T97
 Ansatz: 13

		Prognose													
		D/d				12,5				18			25		
Versuch	12,5/ 12,5/ 18	SF	15,7	13,2	10,4	8,9	19,9	13	9	13,2	12	10,3	6,7		
		15,7 13,2 19,9													
		15,7 13,2 13													
		15,7 13,2 9													
		15,7 10,4 19,9													
		15,7 10,4 13													
		15,7 10,4 9													
		15,7 8,9 19,9													
		15,7 8,9 13													
		15,7 8,9 9													
		13,2 10,4 19,9													
		13,2 10,4 13													
		13,2 10,4 9													
		13,2 8,9 19,9													
		13,2 8,9 13													
		13,2 8,9 9													
		10,4 8,9 19,9													
		10,4 8,9 13													
		10,4 8,9 9													

	Bestimmtheitsmaß außerhalb Bereich
	Bestimmtheitsmaß $0 < R^2 < 0,499$
	Bestimmtheitsmaß $0,5 < R^2 < 0,799$
	Bestimmtheitsmaß $0,8 < R^2 < 1$
	Keine Daten
	Werte wurden im Versuch abgeprüft

2. Ergebnisplot



XI. Anhang A2 – Beispiel Datensatz Gerz, Darstellung der Ergebnisse für die Bestimmtheitsmaße (81 Ergebnisse, kleinster ausgewerteter Datensatz)

Gerz - Dyneema - D/d 15/ 20 - Ansatz 11

lg N	D/d	SF	R ²	lg N	D/d	SF	R ²
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
5,1173	20	10		4,5832	20	5	
4,8959	15	10	1,00	4,5832	20	5	1,53
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
4,8959	15	10	1,33	4,5832	20	5	91,63
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
4,8959	15	10	1,72	4,5832	20	5	0,91
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,5832	20	5		4,1516	20	3,3	
4,8959	15	10	1,55	4,5832	20	5	1,22
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
4,8959	15	10	1,33	4,1516	20	3,3	0,70
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
4,8959	15	10	2,02	4,1516	20	3,3	0,97
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,1516	20	3,3		5,1173	20	10	
4,8959	15	10	1,93	4,1516	20	3,3	1,07
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
4,8959	15	10	1,18	4,1516	20	3,3	2,28
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
4,8959	15	10	1,61	4,1516	20	3,3	0,82
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
5,1173	20	10		4,5832	20	5	
4,2416	15	5	1,88	4,1516	20	3,3	0,97
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
4,2416	15	5	1,00	4,1516	20	3,3	6,58

lg N	D/d	SF	R ²	lg N	D/d	SF	R ²
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
4,2416	15	5	1,17	4,1516	20	3,3	0,77
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,5832	20	5		4,1516	20	3,3	
4,2416	15	5	1,02	4,1516	20	3,3	0,80
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
4,2416	15	5	1,06	5,5873	26	10	0,08
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
4,2416	15	5	1,24	5,5873	26	10	0,14
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,1516	20	3,3		5,1173	20	10	
4,2416	15	5	0,73	5,5873	26	10	0,11
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
4,2416	15	5	1,08	5,5873	26	10	0,83
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
4,2416	15	5	1,20	5,5873	26	10	0,09
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
5,1173	20	10		4,5832	20	5	
3,6659	15	3,3	0,63	5,5873	26	10	0,08
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
3,6659	15	3,3	0,90	5,5873	26	10	6,30
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
3,6659	15	3,3	0,96	5,5873	26	10	0,16
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,5832	20	5		4,1516	20	3,3	
3,6659	15	3,3	0,87	5,5873	26	10	0,07

lg N	D/d	SF	R ²	lg N	D/d	SF	R ²
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
3,6659	15	3,3	0,82	4,8865	26	5	5,62
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
3,6659	15	3,3	0,91	4,8865	26	5	1,28
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,1516	20	3,3		5,1173	20	10	
3,6659	15	3,3	1,30	4,8865	26	5	1,72
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
3,6659	15	3,3	0,77	4,8865	26	5	249,90
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
3,6659	15	3,3	0,87	4,8865	26	5	1,00
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
5,1173	20	10		4,5832	20	5	
5,1173	20	10	0,71	4,8865	26	5	1,79
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
5,1173	20	10	1,03	4,8865	26	5	1153,50
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
5,1173	20	10	1,14	4,8865	26	5	3,87
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,5832	20	5		4,1516	20	3,3	
5,1173	20	10	7,09	4,8865	26	5	1,07
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
5,1173	20	10	0,83	4,3521	26	3,3	0,76
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,5832	20	5		5,1173	20	10	
5,1173	20	10	1,04	4,3521	26	3,3	1,04

lg N	D/d	SF	R ²	lg N	D/d	SF	R ²
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,1516	20	3,3		5,1173	20	10	
5,1173	20	10	38,03	4,3521	26	3,3	1,18
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
5,1173	20	10	0,96	4,3521	26	3,3	1,80
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
4,1516	20	3,3		4,5832	20	5	
5,1173	20	10	0,77	4,3521	26	3,3	0,91
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
5,1173	20	10		4,5832	20	5	
4,5832	20	5	3,80	4,3521	26	3,3	1,13
4,2416	15	5		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
4,5832	20	5	1,15	4,3521	26	3,3	3,99
4,8959	15	10		4,2416	15	5	
4,2416	15	5		3,6659	15	3,3	
5,1173	20	10		4,1516	20	3,3	
4,5832	20	5	1,45	4,3521	26	3,3	0,82
4,8959	15	10		4,8959	15	10	
3,6659	15	3,3		4,2416	15	5	
4,5832	20	5		4,1516	20	3,3	
4,5832	20	5	43,44	4,3521	26	3,3	0,96
4,2416	15	5					
3,6659	15	3,3					
4,5832	20	5					
4,5832	20	5	1,00				

XII. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Gregor Novak
Geburtsdatum	24.06.1983
Geburtsort	Sulzbach-Rosenberg
Nationalität	Deutsch
Familienstand	ledig

Bisherige Beschäftigungen

seit 10/ 2017	Abteilungsleiter „Seiltechnologie“ am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
seit 02/ 2015	Gruppenleiter „Offshore-Seiltechnik“ am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
Seit 07/ 2010	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Seiltechnologie am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
04/ 2009 – 09/ 2009	Praktikum bei Kärcher Futuretech in Winnenden
02/ 2007 – 06/ 2010	Studentische Hilfskraft in der Abteilung Seiltechnologie am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
07/ 2004 – 08/ 2004	Praktikum bei Voith AG in Heidenheim

Ausbildung

10/ 2004 – 07/ 2010	Maschinenbaustudium an der Universität Stuttgart
08/ 1994 – 07/ 2004	Schillergymnasium in Heidenheim