

# Neuartige Methode für die Abschätzung der Lebensdauer laufender hochmodularer Faserseile

New method for the assessment of the lifetime of running high-modulus fibre ropes

**Gregor Novak**

*Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) - Abteilung für Seiltechnologie  
Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
Universität Stuttgart*

**H**ersteller und Anwender von Hebezeugen möchten hochmodulare Faserseile heutzutage vor allem wegen der hohen Lebensdauer einführen. Dafür ist es notwendig, diese Lebensdauer der Seile beim Lauf über die Seilscheibe zu kennen. Wie bei Drahtseilen können auch Biegeversuche durchgeführt werden, die die tatsächlichen Parameter in bestimmten Seiltrieben widerspiegeln. Die oben erwähnte hohe Lebensdauer von hochmodularen Faserseilen führt jedoch zu lang laufenden Biegeversuchen. Auch ist es nicht praktikabel, Biegeversuche für jede mögliche Kombination von Parametern durchzuführen, die es gibt.

Daher ist eine neuartige Methode erforderlich, um die Lebensdauer eines laufenden Faserseils mit einem Minimum an Aufwand abzuschätzen. Das Paper wird die Ergebnisse einer Untersuchung über eine neuartige Methode vorstellen, um die Lebensdauer eines laufenden Faserseiles abzuschätzen. Die Untersuchungen beinhalten die Analyse, welche Parametern verwendet werden müssen, wie weit die Schätzungen genutzt werden können und mit welcher Genauigkeit.

*[Hochmodulare Faserseile, Lebensdauer, Abschätzung, Seiltrieb]*

**M**anufacturer and users of lifting applications have today the aim to introduce high-modulus fibre ropes because of the high lifetime. For this it is necessary to know the lifetime of the ropes when bended over sheaves. Like with wire ropes, bending tests can be done that reflect the actual situation in specific rope drives. The above mentioned high lifetime of running fibre ropes leads to long running bending tests. Also it is not applicable to do bending tests for every possible combination of parameters that can be found.

Therefore a method is needed to estimate the lifetime of a running fibre rope with a minimum of work. The paper will introduce the results of an investigation regarding an above mentioned method to estimate the lifetime

of a running fibre rope. The investigations include the analysis which set of parameters have to be used, how far the estimations can be used and with which accuracy.

*[High-modulus fibre ropes, Lifetime, Assessment, Rope drive]*

## 1 EINFÜHRUNG

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 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.

Daher wäre es von Vorteil, eine Methode zur Verfügung zu haben, mit der es möglich ist, die Lebensdauer eines hochmodularen Faserseiles für einen bestimmten Seiltrieb abzuschätzen. In der Vergangenheit wurden von mehreren 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 definierten 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.

## 2 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN ZUR LEBENSDAUER LAUFENDER HOCHMODULARER FASERSEILE

In der Vergangenheit wurden im Vergleich zu Stahlseilen eine geringe Zahl an Untersuchungen hinsichtlich der Seillebensdauer durchgeführt, diese auch 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] und dem Autor [Nov14] 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 Polyamidmonofilern und –multifilern handelt (Abbildung 1). Die Monofilern wirken dabei wie Drähte, um die die Multifilern zu Litzen verseilt werden. Diese Art von Seilen wird vorwiegend als Festmacherseile in der Schifffahrt verwendet. Da es sich um niedermodulare Faserseile handelt, werden keine den hochmodularen Faserseilen ver-

gleichbaren Lebensdauern erreicht. Jedoch können diese Art von Seilen auch in laufenden Anwendungen verwendet werden, wenn keine hohen Anforderungen an die Lebensdauer gestellt werden.



Abbildung 1. 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 erzielten 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.

### 2.1 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<sub>i</sub>: Regressionskoeffizienten

$S/d^2$ : Durchmesserbezogene Seilzugkraft [N/mm<sup>2</sup>]  
 $D/d$ : Verhältnis Seilscheibendurchmesser zu Seilnennendurchmesser

Laut Feyrer wurde ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,991 erreicht. 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) für eine vergleichbare Konstruktion mit dem gleichen Seilwerkstoff Dyneema SK60 angewendet und keine gute Übereinstimmung gefunden (Abbildung 2). So konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Berechnung (Rote Punkte in Abbildung 2) nahezu vollständig außerhalb des 80 % Konfidenzintervalls (Blau gestrichelte Linien in Abbildung 2) der Versuchsergebnisse (Blaue Punkte in Abbildung 2) liegen. Darüber hinaus kreuzt die Gerade der Berechnungsergebnisse (Rote Linie) die Gerade der Versuchsergebnisse (Blaue Linie) in einem sehr starken Winkel.

der Donandpunkt bei einem  $S/d^2$  von 243 N/mm<sup>2</sup>, bei einem  $D/d$ -Verhältnis von 25 bei einem  $S/d^2$  von 277,7 N/mm<sup>2</sup> und bei einem  $D/d$ -Verhältnis von 63 lag der Donandpunkt bei einem  $S/d^2$  von 312,5 N/mm<sup>2</sup>. Feyrer hat zur Ermittlung der wirklichen Bruchkraft einen Zerreißversuch durchgeführt, bei dem das Faserseil mit Aluminiumhüllen 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 Donandpunktes 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 Donandpunkt für die untersuchten Seilmuster als untergeordnet anzusehen ist.

## 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 Nennendurchmesser 8 mm durchgeführt hat [Vog98]. Im Unterschied zu der von Feyrer aufgestell-

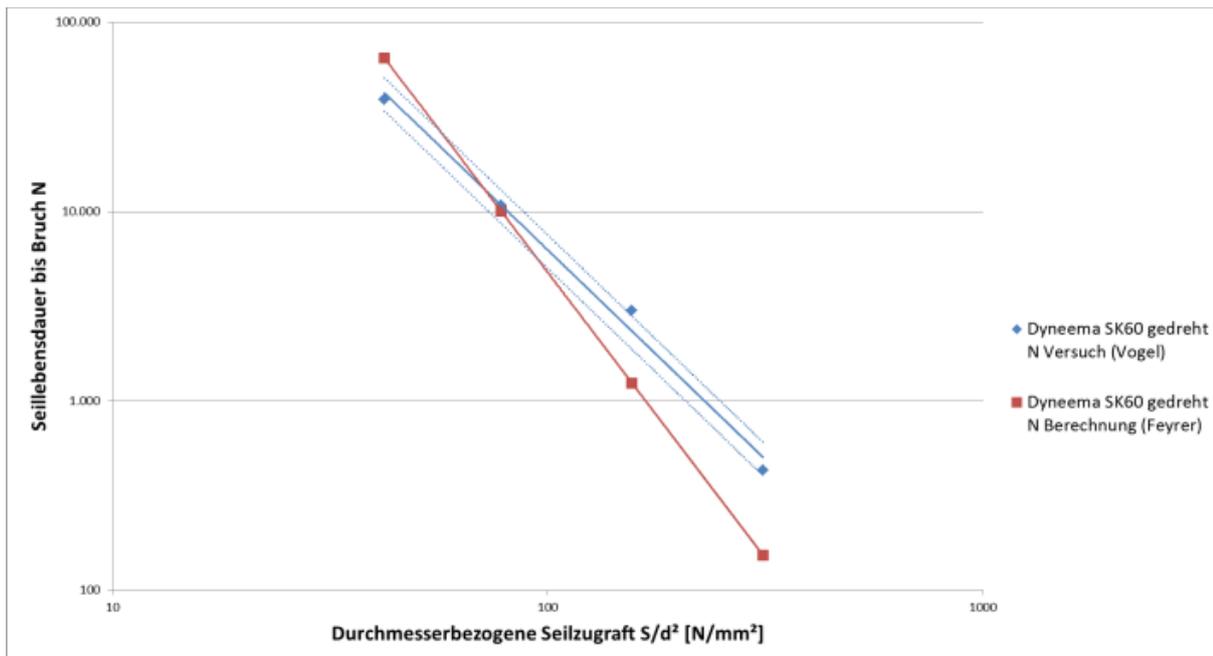


Abbildung 2. Vergleich der Versuchsergebnisse von Vogel mit den Berechnungsergebnissen mit der Formel von Feyrer (Das Konfidenzintervall von 80% ist blau gestrichelt eingezeichnet)

Bei den von Feyrer durchgeführten Untersuchungen wurde erstmals eine zu Drahtseilen vergleichbare Belastungsgrenze hinsichtlich eines starken Abfallens der Lebensdauer nachgewiesen. Die bei Drahtseilen „Donandpunkt“ 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

ten 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.

$$\lg N = a_0 + a_1 * \lg(S/d^2) \quad (2)$$

$$\lg N = b_0 + b_1 * \lg(S/m^*) \quad (3)$$

- Mit: N: Biegewechselzahl  
 a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>: Regressionskoeffizienten  
 S/d<sup>2</sup>: Durchmesserbezogene Seilzugkraft [N/mm<sup>2</sup>]  
 S/m\*: Massebezogene Seilzugkraft [N/tex]

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

### 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].

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

- Mit: N: Biegewechselzahl  
 a<sub>i</sub>: Regressionskoeffizienten  
 F/d<sup>2</sup>: Durchmesserbezogene Seilzugkraft [N/mm<sup>2</sup>]  
 D/d: Verhältnis Seilscheibendurchmesser zu Seilnennendurchmesser  
 d: Seilnennendurchmesser

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

### 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.

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

- Mit:  $\bar{N}$ : Mittlere Biegewechselzahl  
 p<sub>i</sub>, a<sub>Di</sub>: Regressionskoeffizienten  
 BV: Biegedurchmesser Verhältnis  
 $BV = \frac{D_1^*}{d_{ET}}$   
 Mit: D<sub>1</sub>\*: Auflagedurchmesser (Rillengrunddurchmesser)  
 d<sub>ET</sub>: tragender Seilersatzdurchmesser  
 σ: Seilzugspannung [N/mm<sup>2</sup>]

Bestimmtheitsmaße werden von Heinze nicht angegeben.

### 2.5 VERGLEICH DER VORGESTELLTEN LEBENSDAUERGLEICHUNGEN

Die oben vorgestellten Lebensdauer Gleichungen 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 Abbildung 3 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.

Wie in Abbildung 3 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.

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, Nenn-

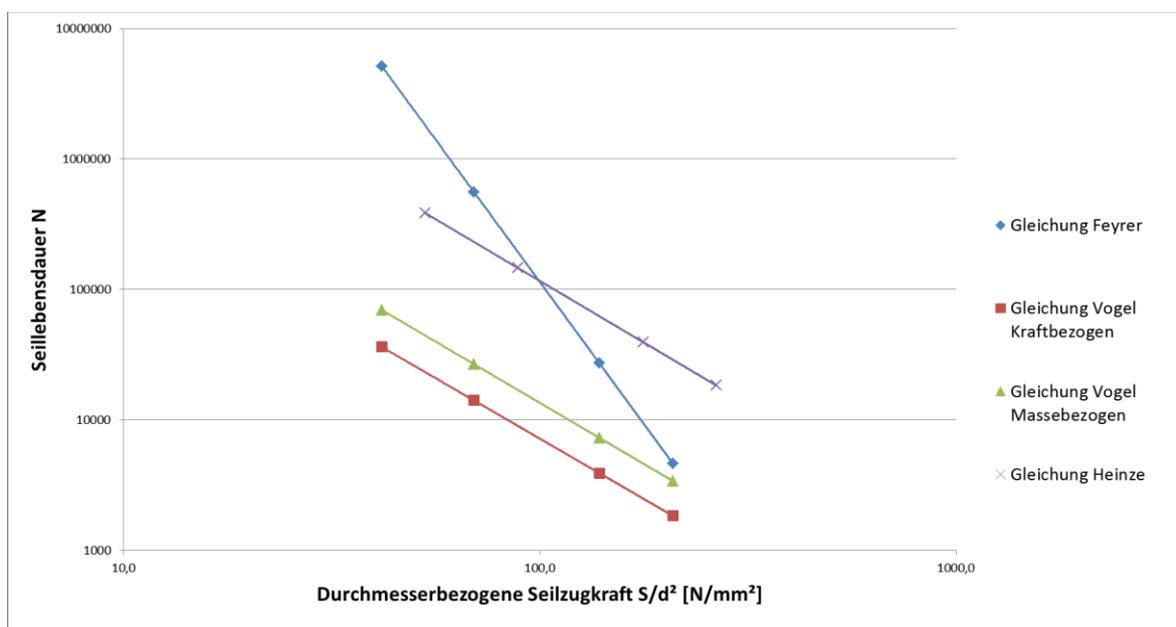


Abbildung 3. Vergleich der Lebensdauergleichungen von Feyrer, Vogel und Heinze an einem Berechnungsbeispiel

Fazit: Feyrer (2.1) und Vogel (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.

### 3 FORMULIERUNG DER NEUARTIGEN BERECHNUNGSMETHODE

In Kapitel 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

festigkeiten 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 1 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.

### 3.1 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 Aus-

wertung 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.

### 3.2 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 3.3). Diese Faktoren wurden zum Beispiel auch von Feyrer unter anderem für Drahtseile [Fey11] und auch für Faserseile (siehe Kapitel 2.1) berücksichtigt. Wie in Kapitel 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 (Abbildung 4).

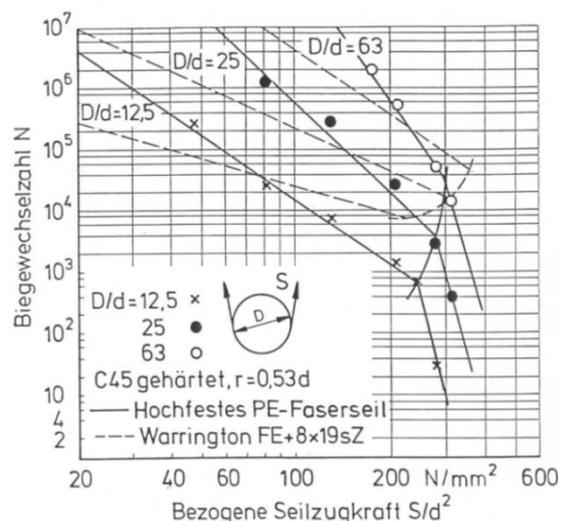


Abbildung 4. Lebensdauergeraden eines Drahtseiles und eines hochmodularen Faserseiles [Fey91]

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 1 und Abbildung 5). 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.

Tabelle 1. *Parameterkombinationen der durchzuführenden Biegeversuche*

| Versuchs-Nr.   | 1    | 2    | 3            |
|----------------|------|------|--------------|
| D/d-Verhältnis | D/d1 | D/d1 | D/d2         |
| Safety Factor  | SF1  | SF2  | SF2 oder SF3 |

Mit diesen drei Lebensdauerpunkten soll es die neuartige Methodik ermöglichen, einen vierten Lebensdauerpunkt zu berechnen (siehe Abbildung 6).

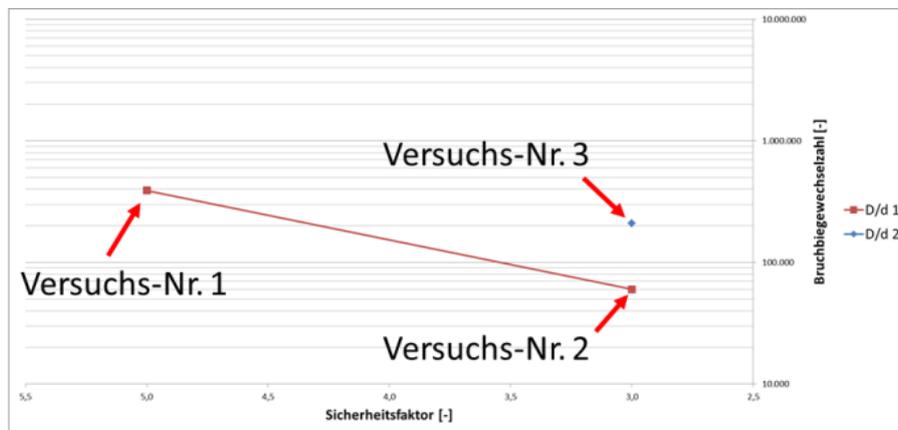


Abbildung 5. *Ausgangssituation der Methode des neuartigen Abschätzungsansatzes*

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. 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 Biege-

wechsellzahl beträgt. Der Wert von 25 % wurde gewählt, da ein Konfidenzintervall von 80 % 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 Bruchbiegewechsellzahl an [Fey15].

- 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 für die Aufstellung der neuen Methode die Lebensdauerbeeinflussenden Faktoren im Biegeversuch identifiziert. Diese sind im Einzelnen:

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

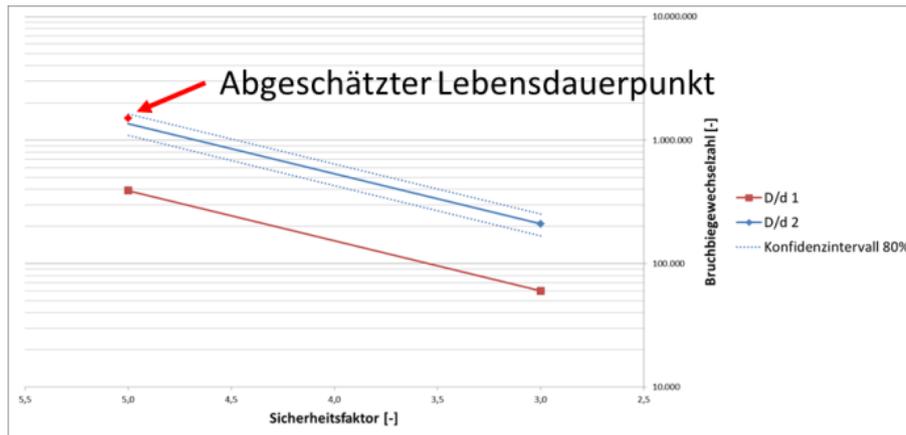


Abbildung 6. Ergebnis der Methode des neuartigen Abschätzansatzes

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 Nenn-Durchmesser 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 Abbildung 7 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.

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 von mindestens 80% berücksichtigt werden sollen. Diese Vorgehensweise wurde zum Beispiel auch von Ernst [Ern12] und Weber [Web13] basierend auf Feyrer [Fey15] herangezogen.

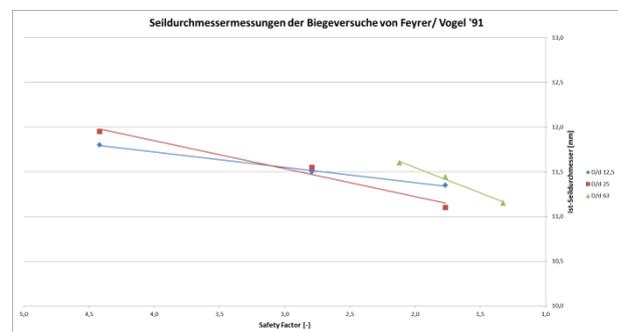


Abbildung 7. Verlauf der Ist-Seildurchmesser bei verschiedenen D/d-Verhältnissen und Safety Factors

### 3.3 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 3.2 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 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, Torsions-

spannungen) 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 Filamentes weit geringer ist als ein Draht.

Für die Auswertung der Ansätze wurden die in Kapitel 3.4 aufgeführten Ergebnisse herangezogen. Die in Tabelle 2 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 3.6.1 und Kapitel 3.6.2).

Tabelle 2. Aufgestellte Ansätze zur Lebensdauerabschätzung

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Ansatz 3  | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times lg\left[\frac{SF}{\left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)}\right]$                         | (1) |
| Ansatz 4  | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \frac{1}{lg\left[\frac{SF}{\left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)}\right]}$               | (2) |
| Ansatz 5  | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times lg\left[SF \times \left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)\right]$                          | (3) |
| Ansatz 6  | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left(\frac{D}{d}\right) + b_2 \times \frac{1}{lg\left[SF \times \left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)\right]}$                | (4) |
| Ansatz 8  | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left[\frac{\left(\frac{D}{d}\right)}{SF}\right] + b_2 \times lg\left[\frac{SF}{\left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)}\right]$ | (5) |
| Ansatz 9  | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left[\left(\frac{D}{d}\right) \times SF\right] + b_2 \times lg\left[\frac{SF}{\left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)}\right]$  | (6) |
| Ansatz 10 | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left(\frac{SF}{\frac{D}{d}}\right) + b_2 \times lg\left[\frac{SF}{\left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)}\right]$              | (7) |

|           |   |      |
|-----------|---|------|
| Ansatz 11 | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left[\frac{\left(\frac{D}{d}\right)}{SF}\right] + b_2 \times lg\left[SF \times \left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)\right]$ | (8)  |
| Ansatz 12 | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left[\left(\frac{D}{d}\right) \times SF\right] + b_2 \times lg\left[SF \times \left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)\right]$  | (9)  |
| Ansatz 13 | $lgN = b_0 + b_1 \times lg\left[\frac{SF}{\left(\frac{D}{d}\right)}\right] + b_2 \times lg\left[SF \times \left(\frac{d_{ist}}{d_{Nenn}}\right)\right]$ | (10) |

### 3.4 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 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 Donandpunkt liegen.

#### 3.4.1 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. Von den Autoren wurden darüber hinaus bereits alle Ergebnisse markiert, die über dem Donandpunkt liegen. Diese Lebensdauerpunkte wurden, wie oben beschrieben, nicht für die eigenen Analysen übernommen.

#### 3.4.2 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 Donandpunkt 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, Vectran T 97 und Technora T221 jeweils in einer Kern-Mantel-Konstruktion mit geflochtenem Kern ermittelt.

### 3.4.3 LEBENSDAUERUNTERSUCHUNGEN GERZ 2016

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

### 3.5 PROGRAMMIERUNG EINER AUSWERTESOFTWARE IN NI LABVIEW

Wie in Kapitel 3.1 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 Programmierumgebung 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 Frontpanel 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 Abbildung 8) 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 Abbildung 8). 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 Abbildung 10.

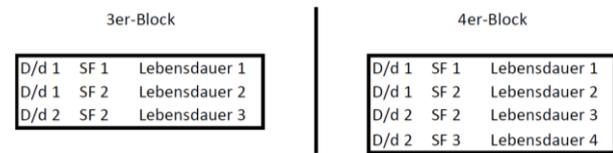


Abbildung 8. Beispiele für 3er- und 4er-Blöcke

Im Folgenden ist das Ablaufdiagramm, nach dem die Auswertesoftware arbeitet, abgebildet (Abbildung 9).

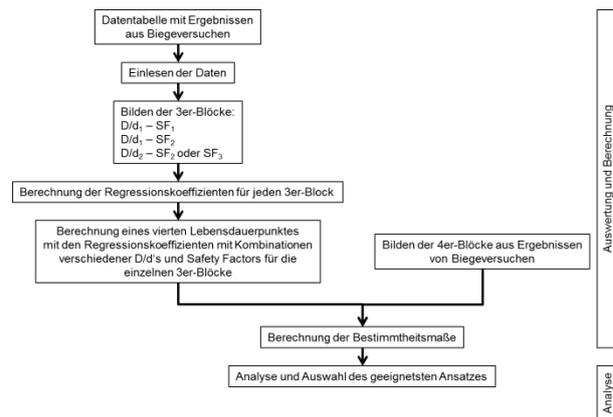


Abbildung 9. Ablaufdiagramm der Auswertung

### 3.6 AUSWERTUNG DER FORMULIERTEN ANSÄTZE

Wie bereits mehrfach beschrieben, werden 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.

#### 3.6.1 AUSWERTUNG DER 3-PUNKT-METHODE

Für die Auswertung der 3-Punkt-Methode (siehe Kapitel 3.1) wurde das in Kapitel 3.5 beschriebene Auswerteprogramm verwendet. Für jeden Ansatz wurden Auswertungen hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes mit der oben beschriebenen Methodik durchgeführt. In Abbildung 10 ist ein Beispiel für eine Auswertung des Datensatzes von Gerz (siehe Kapitel 3.4.3) abgebildet.

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

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

Abbildung 10. Ergebnistabelle einer Auswertung der 3-Punkt-Methode 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 Abbildung 10 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 Abbildung 10). Dies bedeutet, dass das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nicht zwischen 0 und 1 liegt. 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 Abbildung 10). Für ein D/d-Verhältnis von 20 konnte für keinen der Safety Factors eine Lösung für diesen Ansatz berechnet werden (Blauer Rahmen in Abbildung 10). 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 Abbildung 10). Für die beiden anderen Safety Factors dieses D/d-Verhältnisses konnten keine Lösungen gefunden werden (Grüner Rahmen in Abbildung 10).

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 Abbildung 10 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 Abbildung 10).

In Abbildung 11 ist der Probabilitäts-Plot für den vorgestellten Ansatz abgebildet.

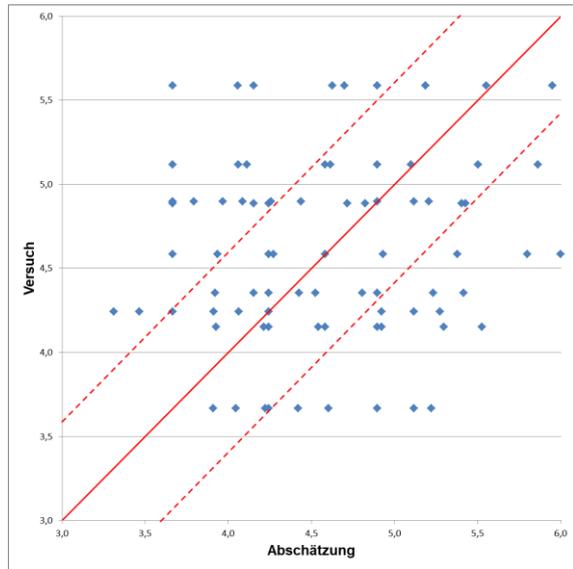


Abbildung 11. Probabilitäts-Plot für Ansatz 11 aus obigem Beispiel in Abbildung 10 (rote gestrichelte Linien geben 80% Konfidenzintervall an)

Die Auswertung der in Tabelle 2 aufgeführten Ansätze erfolgte mit dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Programm. In Tabelle 3 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 3. 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     |

Da es für jeden Ansatz eine Vielzahl an Regressionsfaktoren gibt (für das Beispiel in Abbildung 10 sind dies allein 81 Regressionsätze) und Bestimmtheitsmaße (für das Beispiel in Abbildung 10 sind dies allein 81 Bestimmtheitsmaße) werden diese hier nicht angegeben.

In Kapitel 3.7 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 Computeralgebra-systems 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.

### 3.6.2 HERKÖMMLICHE AUSWERTUNG MIT GROßER DATENBASIS

Zusätzlich zu der zuvor beschriebenen Auswertung der 3-Punkt-Methode der aufgestellten Ansätze wurde eine herkömmliche Auswertung (siehe Kapitel 3.1) 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 3.3 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 2) 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 sind in Tabelle 4 und die dazugehörigen Regressionskoeffizienten in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 4. *Aufstellung der am besten geeigneten Ansätze der herkömmlichen Auswertung*

| Seilwerkstoff            | Seilkonstruktion                               | Datensatz            | Ansatz |
|--------------------------|--|----------------------|--------|
| Dyneema SK 60/ Polyester | Kern-Mantel Konstruktion mit geschlagenem Kern | Feyrer 1991          | 11     |
| Dyneema SK 75            | Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern | Heinze 2013 Dyneema  | 8      |
| Dyneema SK 78            | Offenes 12er Geflecht                          | Gerz 2015            | 8      |
| Technora T221            | Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern | Heinze 2013 Technora | 4      |
| Vectran T97              | Kern-Mantel Konstruktion mit geflochtenem Kern | Heinze 2013 Vectran  | 5      |

Tabelle 5. *Bestimmtheitsmaße und Regressionskoeffizienten der herkömmlichen Auswertung*

| Seilwerkstoff            | Ansatz | R <sup>2</sup> | b <sub>0</sub> | b <sub>1</sub> | b <sub>2</sub> |
|--------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Dyneema SK 60/ Polyester | 11     | 0,971          | -2,368         | 8,141          | 4,053          |
| Dyneema SK 75            | 8      | 0,998          | -0,476         | 4,387          | 2,305          |
| Dyneema SK 78            | 8      | 0,997          | -1,024         | 5,212          | 2,792          |
| Technora T221            | 4      | 0,977          | 1,727          | 4,116          | -1,968         |
| Vectran T97              | 5      | 0,996          | -1,438         | 4,736          | 0,899          |

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

### 3.7 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 3.2 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 Abbildung 10 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 geprüfte, 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 wurden<sup>41</sup>, 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.

- 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 werden
- 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.

### **3.8 EINFLUSSFAKTOREN FÜR LEBENSDAUERABSCHÄTZUNGEN**

Im Folgenden werden Einflussfaktoren aufgeführt, die bei einer Seiltriebanalyse angewendet werden können bzw. sollten. 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:

$$S_{\text{korr}} = S_0 \times f_{Si}$$

Mit:  $S_{\text{korr}}$ : 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:

$$N_{\text{korr}} = N_0 \times f_{Ni}$$

Mit:  $N_{\text{korr}}$ : durch Lebensdauerfaktoren korrigierte Seillebensdauer  $N_0$

$N_0$ : im Biegeversuch bzw. durch Berechnung ermittelte Seillebensdauer

$f_{Ni}$ : Lebensdauerfaktoren zur Korrektur der Seillebensdauer  $N_0$

### 3.8.1 SEILKRAFTFAKTOREN

Die Erhöhung der Seilkraft durch die Reibung der Lastführung, falls vorhanden, wird durch einen Seilkraftfaktor berücksichtigt wie sie auch in [Weh05] für Drahtseile aufgeführt sind. Bei stark außermittiger Seilaufhängung sind höhere Werte anzunehmen.

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  $\eta$  herangezogen werden.

Im Falle der Verwendung von parallelen Seilen wie zum Beispiel bei Hallenkränen können für einen Seilkraftfaktor die Werte für Drahtseile aus [Weh05] herangezogen werden.

Für den Donandpunkt werden keine Faktoren angegeben, da dieser im Betrieb nicht überschritten werden darf. Ein Überschreiten des Donandpunktes hat zur Folge, dass nach wenigen Biegewechsel bzw. Hubspielen ein Gewaltbruch des Seiles erfolgen kann.

### 3.8.2 LEBENSDAUERFAKTOREN

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

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 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.

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

### 3.9 VORGEHENSWEISE ZUR ANALYSE EINES SEILTRIEBS

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 (Abbildung 12). Wie bei Drahtsei-

len, hängt die Seillebensdauer von hochmodularen Faserseilen grundsätzlich von dem D/d-Verhältnis und der Seilzugkraft ab. Da ebenfalls die Lebensdauergeraden bei doppeltlogarithmischer Auftragung einen ähnlichen Verlauf aufweisen (siehe dazu auch Abbildung 4), kann davon ausgegangen werden, dass diese Vorgehensweise auch für hochmodulare Faserseile angewendet werden kann.

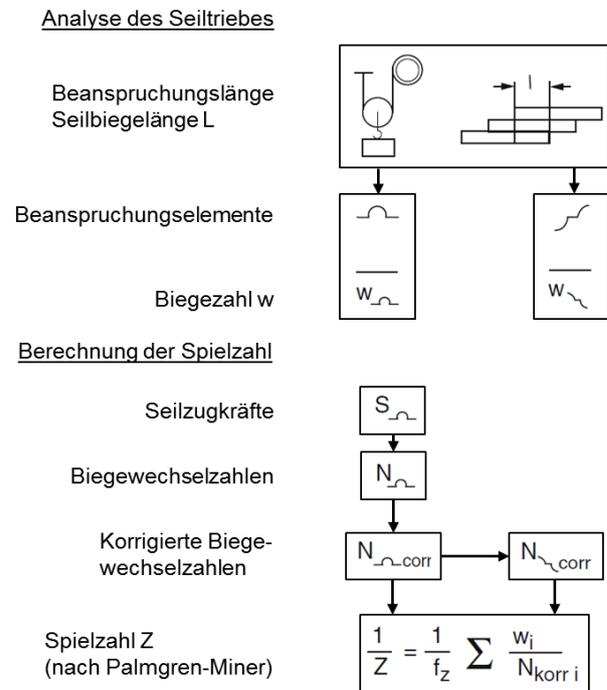


Abbildung 12. Vorgehensweise zur Analyse eines Seiltriebes (in Anlehnung an [Weh05])

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 berechnet.

Als nächstes werden die Biegewechselzahlen für das einzusetzende hochmodulare Faserseil für die gegebenen Seilzugkräfte bestimmt. Dies erfolgt entweder durch ex-

perimentelle Versuche auf Biegemaschinen oder unter Verwendung einer Abschätzungsformel, wie sie zum Beispiel in 3.2 vorgestellt wird.

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

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen 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. 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.

#### LITERATUR

- [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.
- [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.
- [DIN74] DIN: DIN 15020 Teil 1: 1974 – Grundsätze für Seiltriebe – Berechnung und Ausführung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, 1974.
- [Ern10] Ernst, B.: Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik. AiF Abschlussbericht. Stuttgart, 2010.
- [Fey91] Feyrer, K.: Hochfestes Faserseil beim Lauf über Seilrollen. Draht, 42. Jahrgang, 1991, Nr. 11, S. 814 – 818.
- [Fey11] Feyrer, K.: Die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Größeneinfluss. Lift-Report, 37. Jahrgang, 2011, Nr. 1, S. 12 – 18.
- [Fey15] Feyrer, K.: Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability – 2nd Edition. Springer. Berlin, 2015.
- [Fra16] Franck, B.: Biegeversuche an Faserseilen. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2016.
- [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.
- [Hei11] Heinze, T.: Dimensionieren je nach Einsatzfall. Hebezeuge Fördermittel, 51. Jahrgang, 2011, Nr. 6 p. 366 - 369.
- [Hei13] Heinze, T.: Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus hochfesten

- [Hei14] Polymerfasern. Dissertation. Chemnitz, 2013.
- [Hei14] Heinze, T.: Treibscheibenaufzüge mit Faserseil. Lift-Report, 40. Jahrgang, 2014, Nr. 1, S. 10 – 16.
- [Kle16] Kleinert, R.: Evaluierung neuer Konzepte für Biegeversuche mit hochmodularen, laufenden Faserseilen. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2016.
- [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.
- [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.
- [Pal24] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure VDI 68 1624, 339 – 341.
- [Sam16] Samson Ropes: K-100 is pulling its weight for the U.S. Navy. Ferndale, 2016.
- [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.
- [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.
- [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.
- [Weh05] Wehking, K.-H. et al., Laufende Seile - Bemessung und Überwachung. Expert Verlag Renningen, 2005
- 
- Dipl.-Ing. Gregor Novak**, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart.
- Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Holzgartenstrasse 15B, 70174 Stuttgart
- Telefon: +49 711 685-83693, Fax: +49 711 685-83769, E-Mail: gregor.novak@ift.uni-stuttgart.de

