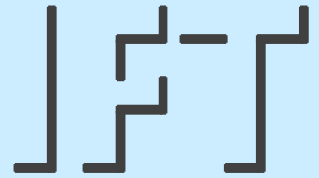


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

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

UNIVERSITÄT STUTTGART



Martin Wehr

Beitrag zur Untersuchung von hochfesten synthetischen Faserseilen unter hochdynamischer Beanspruchung

Mai 2017

**Beitrag zur Untersuchung von
hochfesten synthetischen Faserseilen
unter hochdynamischer Beanspruchung**

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. Martin Wehr

aus Bad Mergentheim

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

Mitberichter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Pott

Tag der mündlichen Prüfung: 31.05.2017

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)

der Universität Stuttgart

2017

Meinen Eltern gewidmet

I. Vorwort

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Seiltechnologie des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart. Auf die in dieser Arbeit behandelte Problematik des Einsatzes von neuartigen, hochfesten Faserseilen unter hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen wurde ich sowohl durch die Forschergruppe des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) unter Leitung von Jun.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pott als auch die am IFT geleistete Forschungs- und Normungsarbeit im Bereich der hochfesten Synthetik-Faserseile aufmerksam.

Die experimentell erlangten Ergebnisse dieser Arbeit entstammen zum Großteil des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Grundlagenforschungsprojektes „hochdynamische Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken“. Für die Unterstützung durch die DFG, die meine Forschungsarbeit erst ermöglichte, möchte ich mich herzlich bedanken.

Weiterhin danke ich

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. K.-H. Wehking, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), für die wissenschaftliche Betreuung und die Unterstützung meiner Arbeit.
- Herrn Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Pott, Juniorprofessor für Angewandte Simulation in der Produktionstechnik am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), für die Übernahme des Mitberichts, die Durchsicht meiner Arbeit, seine hilfreichen Anregungen sowie die Bereitstellung von Seilroboter-Baugruppen.
- Den Seilherstellern Geo. Glestein und Sohn GmbH, LIROS GmbH und VORNBÄUMEN Stahlseile GmbH & Co. KG für die zur Verfügung gestellten Versuchsseile. Insbesondere danke ich Frau A. Neuner von der Firma Geo. Glestein und Sohn GmbH für die fachlichen Diskussionen sowie die freundliche und unkomplizierte Beratung und Unterstützung.
- Herrn Dipl.-Ing. S. Winter, Dipl.-Ing. K. Kühner, Dipl.-Ing. D. Moll, S. Traub M. Sc. sowie den Kollegen der Abteilung Seiltechnologie für die permanente Unterstützung und die freundschaftliche Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. G. Novak für unzählige fachliche Diskussionen, Anregungen sowie das Korrekturlesen meiner Arbeit.

- Den Mitarbeitern der institutseigenen Werkstätten für die Unterstützung der konstruktiven und handwerklichen Tätigkeiten.
- Allen Studierenden für ihre Tätigkeiten und Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes.
- Meinen Eltern und Geschwistern, die mich zu jeder Zeit tatkräftig unterstützt haben.
- Vor allem danke ich von ganzem Herzen meiner Freundin Jessica für ihre grenzenlose Unterstützung und ihre Rücksichtnahme, die diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Martin Wehr

Stuttgart, im Januar 2017

II. Inhaltsverzeichnis

I.	Vorwort	V
II.	Inhaltsverzeichnis	VII
III.	Abkürzungen und Formelzeichen	XI
IV.	Kurzzusammenfassung	XV
V.	Abstract	XVII
1.	Einleitung	1
1.1.	Motivation	1
1.2.	Zielsetzung der Arbeit	3
2.	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1.	Seilroboter	5
2.2.	Klassifikation von Seilrobotern	10
2.3.	Seile und deren Entwicklung	10
2.3.1.	Definition und Macharten	10
2.3.2.	Entwicklung der Seile	13
2.3.3.	Entwicklung der HM-HT-Fasern	14
2.3.4.	Faserseile - Begriffe und Definitionen	16
2.3.5.	HM-HT-Fasern – Produktion und Eigenschaften	18
2.3.6.	Seile aus HM-HT-Fasern	19
2.3.7.	Vergleich verschiedener HM-HT-Fasern	20
2.4.	Lebensdaueruntersuchungen laufender Seile	24
2.4.1.	Laufende Stahlseile	24
2.4.2.	Laufende Faserseile	30
2.4.3.	Verschleißverhalten von Faserseilen	34
2.4.4.	Seilschlupf und Verschleiß laufender Seile	35
2.4.5.	Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer	37
2.5.	Ablegereifeerkennung	38

2.6.	Vergleich von HM-HT-Faserseilen und Stahldrahtseilen	40
2.7.	Einsatz von HM-HT-Faserseilen	44
3.	Experimentelle Untersuchungen	47
3.1.	Versuchsseile	47
3.2.	Versuchseinrichtungen	49
3.3.	Dauerbiegeversuche	50
3.3.1.	Versuchseinrichtungen für Dauerbiegeversuche	50
3.3.2.	Versuchsscheiben	53
3.3.3.	Durchführung der Dauerbiegeversuche	56
3.3.4.	Versuchsaufstellung	58
3.4.	Zugschwellversuche	60
3.4.1.	Zugschwellprüfmaschine	60
3.4.2.	Vorbereitung der Zugschwellversuche	61
3.4.3.	Durchführung der Zugschwellversuche	65
3.5.	Ermittlung der Bruchkraft	67
3.5.1.	Vorbereitungen zur Ermittlung der Bruchkraft	67
3.5.2.	Durchführung der Versuche zur Ermittlung der Bruchkraft	69
3.6.	Hochdynamikversuche	69
3.6.1.	Hochdynamikprüfstand und Prüfmethodik	69
3.6.2.	Parameter der Hochdynamikversuche	76
3.6.3.	Durchführung der Hochdynamikversuche	79
4.	Versuchsergebnisse	81
4.1.	Dauerbiegeversuche	81
4.1.1.	Ergebnisse der Dauerbiegeversuche	81
4.1.2.	Zusammenfassung der Dauerbiegeversuche	87
4.2.	Zugschwellversuche	88
4.2.1.	Ergebnisse der Zugschwellversuche	88
4.2.2.	Zusammenfassung der Zugschwellversuche	92
4.3.	Zugversuche	93

4.3.1.	Ergebnisse der Zugversuche	93
4.3.2.	Zusammenfassung der Zugversuche	97
4.4.	Hochdynamikversuche	98
4.4.1.	Abschätzung der Streubreite	99
4.4.2.	Ergebnisse der Hochdynamikversuche	100
4.4.3.	Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Faserwerkstoffe	107
4.4.4.	Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seildurchmesser	112
4.4.5.	Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seilkonstruktionen	113
4.4.6.	Auswertung nach Lage der Bruchstellen	114
4.4.7.	Auswertung nach Seilgeschwindigkeit an der Bruchstellen	117
4.4.8.	Zusammenfassung der Hochdynamikversuche	119
4.5.	Schlupfmessungen am Hochdynamikprüfstand	121
4.5.1.	Versuchsaufbau der Schlupfmessungen	121
4.5.2.	Ergebnis der Schlupfmessungen	123
4.6.	Mikroskopische Untersuchungen	124
4.6.1.	Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen	125
4.6.2.	Zusammenfassung der mikroskopischen Untersuchungen	127
5.	Referenzversuche und Diskussion	129
5.1.	Referenzseil DynaOne 2mm, E2	130
5.1.1.	Ergebnisse der Referenzversuche E2	131
5.1.2.	Zusammenfassung der Referenzversuche E2	136
5.2.	Stahlseil 6x19 S2	137
5.2.1.	Ergebnisse der Referenzversuche S2	138
5.2.2.	Zusammenfassung der Referenzversuche S2	143
5.3.	Diskussion	145
6.	Zusammenfassung und Ausblick	149
6.1.	Zusammenfassung	149
6.2.	Kritik	156
6.3.	Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten	156

7.	Literaturverzeichnis	i
VI.	Abbildungsverzeichnis	xiii
VII.	Tabellenverzeichnis	xvii
VIII.	Anhang	xix
IX.	Lebenslauf	xxi

III. Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

ASTM	American Society for Testing and Materials
BM	Biegemaschine
BOS	Standard Biegeversuch (Bending Over Sheaves)
csv	comma-separated values (Dateiformat)
CKRM	Completely Kinematic Restrained Manipulators
DB	Doppelbiegung
D2	Geflochtenes Versuchsseil aus Dyneema mit Nenndurchmesser 2mm
E2	Geflochtenes Versuchsseil aus Dyneema mit Nenndurchmesser 2mm (Referenzseil)
FEM	Finite Elemente Methode
HDBOS	Hochdynamik-Biegeversuch (vgl. BOS)
HIKE	Hybride Intelligente Konstruktions Elemente
HM	High Modulus (hochsteif)
HMPE	Hochmodulares Polyethylen
HT	High Tensity (hochfest)
IFT	Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
IKRM	Incompletely Kinematic Restrained Manipulators
IPA	Fraunhoferinstitut für Produktionstechnik und Automatisierung
LCP	Liquid Crystal Polymer
M6	Gelegtes Versuchsseil („Wire Rope Construction“) aus Vectran mit Nenndurchmesser 6mm
MTBF	Mean Time Between Failures
OIPEEC	Organisation internationale pour l'étude de l'endurance des câbles
PBO	Poly-Phenylen-Benzobisoxazol
RAMP	Redundantly Actuated Manipulators
RBG	Regalbediengerät
S	Seale
S2	Versuchsseil aus Stahldraht 6x19W WSC mit Nenndurchmesser 2mm (Referenzseil)
T2	Geflochtenes Versuchsseil aus Technora mit Nenndurchmesser 2mm

UHMWPE	Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene
V2	Geflochtenes Versuchsseil aus Vectran mit Nenndurchmesser 2mm
V6	Geflochtenes Versuchsseil aus Vectran mit Nenndurchmesser 6mm
WSC	Wire Strand Core

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
μ	-	Reibkoeffizient
$2S_a$	N	Schwingweite
a	m/s^2	Beschleunigung
B	-	Bestimmtheitsmaß
d	mm	Seilnenndurchmesser
D	mm	Seilscheibendurchmesser
d_0	mm	Einheitsdurchmesser (=1 mm)
d_a	mm	Seilaußendurchmesser
d_E	mm	Ersatzdurchmesser
d_{ist}	mm	Seilistdurchmesser
d_m	mm	Mittlerer Durchmesser
d_{max}	mm	Maximaldurchmesser
d_{min}	mm	Minimaldurchmesser
d_n	mm	Seilnenndurchmesser
d_{theo}	mm	Theoretischer Seildurchmesser
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz
F_{min}	N	Mindestbruchkraft
f_{Ni}	-	Biegewechselfaktoren
$f_{Prüf}$	Hz	Prüffrequenz
F_r	N	rechnerische Bruchkraft
F_w	N	wirkliche Bruchkraft
g	m/s^2	Gravitationskonstante
H	M	Höhe

h	mm	Seilhub
j	m/s ³	Ruck
J	kg*mm ²	Trägheitsmoment
l	mm	Biegelänge (Biegeversuch)
L	mm	Prüflänge (Zugschwellversuch)
lg s	-	Standardabweichung
M	Nm	Drehmoment
m	-	Anzahl der verwendeten Seile eines Seilroboters
MBL	N	Mindestbruchkraft
m _s	kg/m	Längenbezogene Seilmasse
N	-	Bruchschwingspielzahl
n	-	Anzahl der Freiheitsgrade eines Manipulators
q ₀ , q ₁	-	Kostanten zur Ermittlung der Donandtkraft
R	-	Redundanz (eines Seilroboters)
R ₀	N/mm ²	Nennfestigkeit
R _a	µm	Oberflächenrauheit
R _m	N/mm ²	wirkliche Festigkeit
S	N	Seilzugkraft
S/d ²	N/mm ²	durchmesserbezogene Seilzugkraft
S _a	N	Amplitude
S _D	N/mm ²	Donandtkraft
S _m	N	Mittellast
S _o	N	Oberlast
S _q	N	äquivalente Seilzugkraft
S _u	N	Unterlast
T	°C	Temperatur
T _{grenz}	°C	maximal zulässige Grenztemperatur
t _H	s	Haltezeit
T _T	tex	Seilfeinheit
u	mm	Umschlingungsbogen
U	1/min	Drehzahl
v _{eff}	m/s	Effektivgeschwindigkeit
v _{max}	m/s	Maximalgeschwindigkeit
v _{min}	m/s	Minimalgeschwindigkeit
v _n	m/s	Nenngeschwindigkeit

W	J	Arbeit
w_i	-	Beanspruchungselement der Schadensakkumulationshypothese
x	mm	Länge
Z	-	Spielzahl eines Seiltriebs
γ	°	Rillenöffnungswinkel
Δ	-	Differenz
ε	%	Dehnung
σ	N/mm ²	Spannung
σ_E	N/mm ²	Ersatzspannung
σ_N	N/mm ²	Nennspannung
ρ	g/cm ³	Faserdichte

Indizes

A	Amplitude
a	Beschleunigung
b	Biegung
korr	korrigiert
m	Mittel
max	Maximal
min	Minimal
n	Nenn
O	Ober
Rb	Reib
Ref	Referenz
U	Unter
$v=k$	konstante Geschwindigkeit
x,y,z	Achsen im Absolutkoordinatensystem

IV. Kurzzusammenfassung

In den letzten Jahren werden in immer mehr Anwendungen Drahtseile durch hochmodulare Faserseile ersetzt. Neben ihrer vergleichbar hohen Festigkeit weisen diese hochmodularen Faserseile enorme Vorteile in Bezug auf deren geringen Eigengewicht und der Möglichkeit zur Realisierung kleiner Biegeradien auf. Diese positiven Eigenschaften prädestinieren hochmodulare Faserseile für hochdynamische Anwendungen, wie sie in parallelkinematischen, seilbasierten Fördersystemen vorliegen. Am Stuttgarter Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) beschäftigt sich eine Forschergruppe um Junior-Prof. Dr.-Ing. A. Pott mit der Entwicklung sogenannter Seilroboter für unterschiedliche hochdynamische Anwendungen [133, 134]. Da es sich bei der Erforschung hochmodularer Faserseile um ein sehr junges Forschungsgebiet handelt, besteht bislang jedoch ein großer Mangel an grundlagenorientierter Forschungsarbeit. Speziell hinsichtlich des Verhaltens hochmodularer Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung existieren bislang keinerlei Erkenntnisse, was den Einsatz dieser Seile, trotz ihrer großen Vorteile, bislang stark einschränkt [78]. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verhalten hochmodularer Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung und basiert auf dem grundlagen- und anwendungsorientierten Forschungsprojekt „Hochdynamische Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken“ [180], das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) über 24 Monate gefördert wurde.

In Kapitel 1 wird der Forschungsbedarf anhand der Verwendung von hochfesten Faserseilen in modernen Seilkinematiken und dem Mangel an grundlegender Forschung aufgezeigt. Zudem werden die Ziele der hier vorliegenden Arbeit herausgearbeitet und dargelegt.

Kapitel 2 widmet sich dem internationalen Stand der Forschung in Bezug auf Seilroboter sowie auf Faserseile, wobei hier ein Vergleich zum Stand der Forschung auf dem Gebiet der Stahldrahtseile gezogen wird. Insbesondere wird auf bisherige Lebensdaueruntersuchungen laufender Faserseile eingegangen.

Sämtliche im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden in Kapitel 3 vorgestellt und beschrieben. Neben bereits bekannten Versuchsaufbauten werden die Konstruktion und die Erstellung des für diese Arbeit grundlegenden, neuartigen Hochdynamik-Prüfstandes dargelegt, mit dem auf vier unabhängigen Prüfstellen Dauerbiegeversuche unter definierten Parametern mit einer maximalen Beschleunigung von $a = 100 \text{ m/s}^2$ und einer Geschwindigkeit von $v = 10 \text{ m/s}$ durchgeführt werden können. Die verwendeten Versuchsseile werden anhand Ihrer Kennwerte beschrieben. Insgesamt werden fünf

unterschiedliche Seile aus drei verschiedenen Materialien (Dyneema SK 78, Technora T221 und Vectran HT) in zwei unterschiedlichen Macharten (offenes 12er-Geflecht und ummanteltes, gelegtes Seil) in zwei verschiedenen Seildurchmessern (2 mm und 6 mm) untersucht. Zudem wird die Planung, systematische Variation der ausschlaggebenden Versuchsparameter sowie die Durchführung der jeweiligen Versuche beschrieben.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche werden in Kapitel 4 dargelegt, zusammengefasst, ausgewertet und diskutiert. Dabei wird detailliert auf das individuelle Verhalten verschiedener Faserwerkstoffe sowie unterschiedlicher Seilmacharten eingegangen. Besonderheiten der jeweiligen Versuchsseile werden herausgearbeitet und tiefgehend beleuchtet. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Hochdynamik-Versuche mit denen der Standard-Dauerbiegeversuche lassen sich die Schädigungsparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung isoliert quantifizieren. Durch die Durchführung von Zug-Schwell-Versuchen wird zudem der Einfluss des Zug-Schwell-Anteils, der durch hohe Beschleunigung träger Massen entsteht, separat erfasst.

Hierbei zeigt sich, dass Zug-Schwell-Beanspruchung unter verschiedenen Lasten und Prüffrequenzen kaum Einfluss auf die Seillebensdauer nimmt. Unter der Beanspruchung in hochdynamischen Biegeversuchen nimmt die Seillebensdauer im Vergleich zu der in Standard-Dauerbiegeversuchen hingegen deutlich ab. Dieser Abfall ist seilspezifisch und für das ummantelte Versuchsseil M6 am wenigsten ausgeprägt. Am deutlichsten zeigt sich der Einfluss der Dynamikparameter auf das Versuchsseil D2 aus Dyneema, weshalb im darauffolgenden Kapitel weitere Referenzversuche mit einem anderen Seil aus Dyneema durchgeführt werden, die die gewonnenen Ergebnisse untermauern.

Kapitel 5 beschreibt die Auswahl sowie die Durchführung geeigneter Referenzversuche an dem Referenzseil E2 aus Dyneema sowie einem Drahtseil. Hieraus ergibt sich die deutliche Überlegenheit hochmodularer Faserseile gegenüber Drahtseilen in hochdynamischen Anwendungen.

In Kapitel 6 werden die im Rahmen dieser Forschungsarbeit erzielten Erkenntnisse zusammengefasst und in Relation zum bislang veröffentlichten Fachwissen gesetzt. Die Ergebnisse werden kritisch beleuchtet und anschließend ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

V. Abstract

Contribution to the Study of High-Strength Fibre Ropes under High-Dynamic Load

Initial Situation

A cable robot is a parallel-kinematic manipulator with flexible connecting links instead of rigid connectors. The use of nearly endless ropes enlarges the workspace of the kinematic system by a multiple. At the same time the ratio of payload to moving mass improves from 1:10 of a standard articulated robot to 10:1 and more, using a cable robot [126]. As a result cable robots are able to perform high-dynamic movements. For example, the cable robot „IPAnema“, which was invented by a research group lead by Prof. A. Pott at the Stuttgart Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation [133], is able to move with a speed up to $v = 10$ m/s and an acceleration up to $a = 100$ m/s² [134]. These high-dynamic loads lead to completely unexplored stress in the novel tension elements which necessarily has to be investigated in order to close eventual security holes [184]. Chapter 2.1 and 2.2 reflect the current international state of research in the field of cable robots.

The following chapter 2.3 presents the development and the state of the art high-modulus fibre ropes and rope materials focusing on the three most popular brands Dyneema, Technora and Vectran. Dyneema is an ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) developed by the Dutch company Royal DSM N.V. with a tensile strength up to 4000 N/mm² and a density of 0,97 g/cm³, which makes it lighter than water [99]. Technora is the name of an aromatic Polyamide made by the company Teijin [52]. Vectran is a thermoplastic liquid crystal polymer produced by the Japanese company, Kuraray Co, Ltd. [1]. The most important characteristics are shown and compared.

The state of research in the field of running ropes is described and summarized in chapter 2.4. In addition to running fibre ropes, the state of research for running steel wire ropes is shown and compared. Similarities and differences are carved out, and the lack of basic research in the fields of running fibre ropes and high-dynamic loading of ropes is demonstrated. Single publications which deal with the influence of dynamic load on the lifetime of ropes are presented. Due to different factors, e.g. the use of single yarns in special abrasion machines under low speed [7, 78], the results can not directly be transferred on running fibre ropes.

Chapter 2.5 deals with discard criteria and displays the lack of non-destructive test methods for fibre ropes while high-modulus fibre ropes and steel wire ropes are compared in chapter 2.6.

Paragraph 2 ends with chapter 2.7 which describes the current application area of high-modulus fibre ropes. In offshore technology mooring lines are used for anchoring drilling platforms on the sea ground [8, 69]. The Swiss Schindler AG uses Aramid ropes in elevators [147, 178] while Teufelberger Seil Ges.m.b.H and Samson installed high-modulus fibre ropes on mobile cranes [148] [158]. Due to missing basic research on the influence of high-dynamic load on the lifetime of running fibre ropes, no safety critical application of fast running high-modulus fibre was realized until now.

The financing of the research project [180] by the German Research Foundation DFG, which underlies the presented work here, underlines the importance of basic research in the field of high-dynamically loaded high-modulus fibre ropes.

The Research Program

In the corresponding research project mentioned above, five different HM-HT-fibre ropes were tested. The selection of these test ropes is described in chapter 3.1. Additionally, another fibre rope as well as one steel wire rope were added to the research program. In total four different materials (Dyneema, Technora, Vectran, Steel), of two different diameters (2 mm and 6 mm) and two different constructions (braided and layed) were tested. Table 1 shows the main parameters of the tested ropes.

Labeling	D2	E2	T2	V2	V6	M6	S2
Constructi on of rope	braided, 12fold	braided, 12fold	braided, 12fold	braided, 12fold	braided, 12fold	Step- index; layed,	6x19S WSC B(zn k) 2160 sZ
material	UHMWPE Dyneema SK78	UHMWPE Dyneema SK78	Aramid; Technora T221	LCP; Vectran HT	LCP; Vectran HT	LCP; Vectran HT	Steel wire
d_n [mm]	2	2	2	2	6	6	2

table 1: test ropes

The executed test program contains mainly standard bending tests (BOS), tension-tension-tests, tensile tests and high-dynamic bending tests (HDBOS). For standard BOS-tests the machines No.4 and No.12 of the IFT laboratory were used (chapter 3.3) while the 75-kN pulsator was used for tension-tension-tests as well as tensile tests (chapter 3.4 and 3.5.). To install the ropes in the pulsator a new cone

socketing method with two-component epoxy resin had to be developed and tested within the framework of the present project.

BOS-tests under high-dynamic load have to be performed with a defined test speed up to $v = 10 \text{ m/s}$ and a defined acceleration up to $a = 100 \text{ m/s}$. Using standard bending machines it is only possible to generate a sinusoidal, permanently changing velocity and acceleration plot as shown in figure 2.

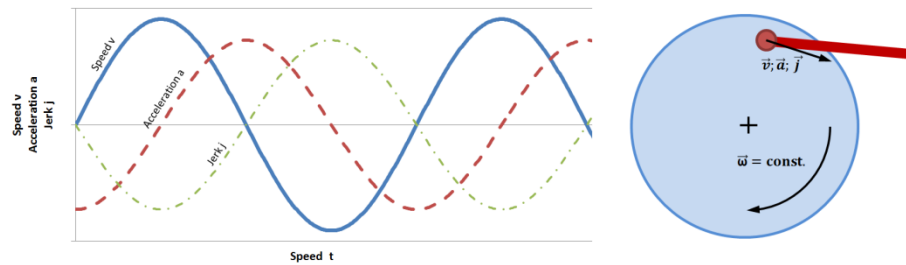


figure 2: movement profile of standard BOS-tests

Furthermore, to realize rope speed up to $v = 10 \text{ m/s}$ a long, free rope length is required. Therefore, it was necessary to design and build a completely new test facility for high-dynamic bending tests (chapter 3.6). The new test facility, with its four independent test stations and the corresponding movement profile, is shown in figure 3. The test facility has a height of 6,50 m and offers high-dynamic bending tests for rope diameters up to $d = 6 \text{ mm}$.

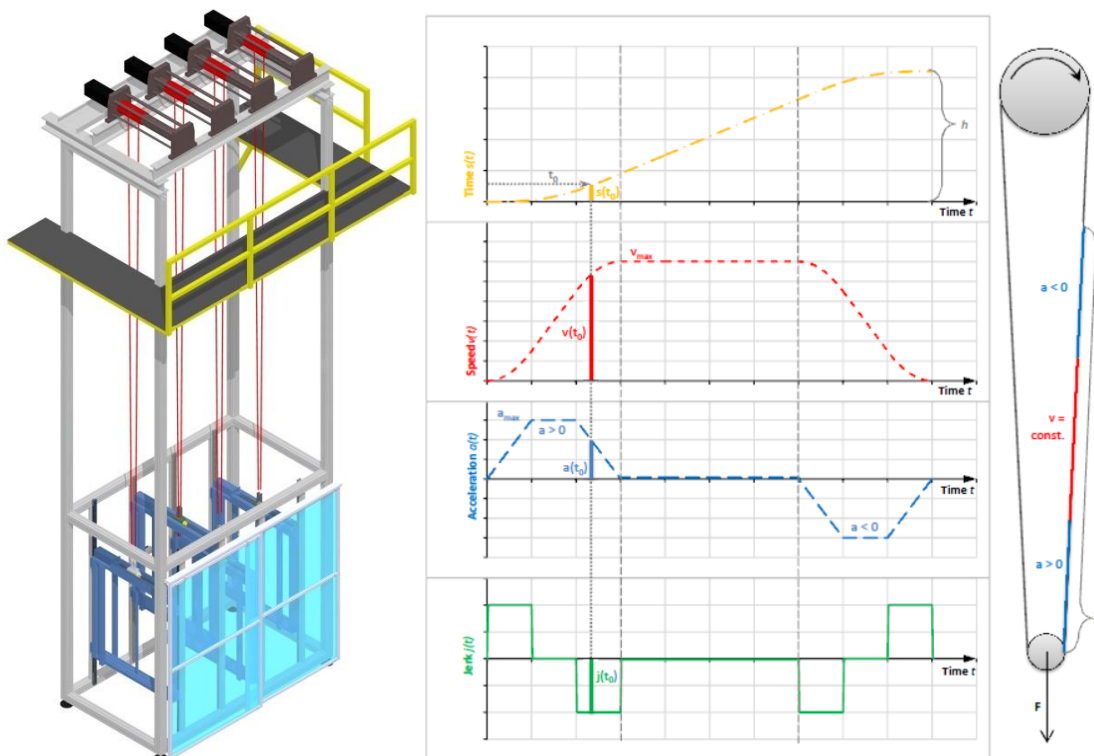


figure 3: novel test facility for high dynamic bending over sheaves (HDBOS) tests and its movement profile

Findings and Conclusions

The results of all performed tests are shown, explained and summarized in paragraph 4.

In order to separate the influence of speed and acceleration on the lifetime of running ropes, it is necessary to know the lifetime in standard bending tests. The results of standard BOS-tests of all seven test ropes are shown in figure 4 (chapter 4.1).

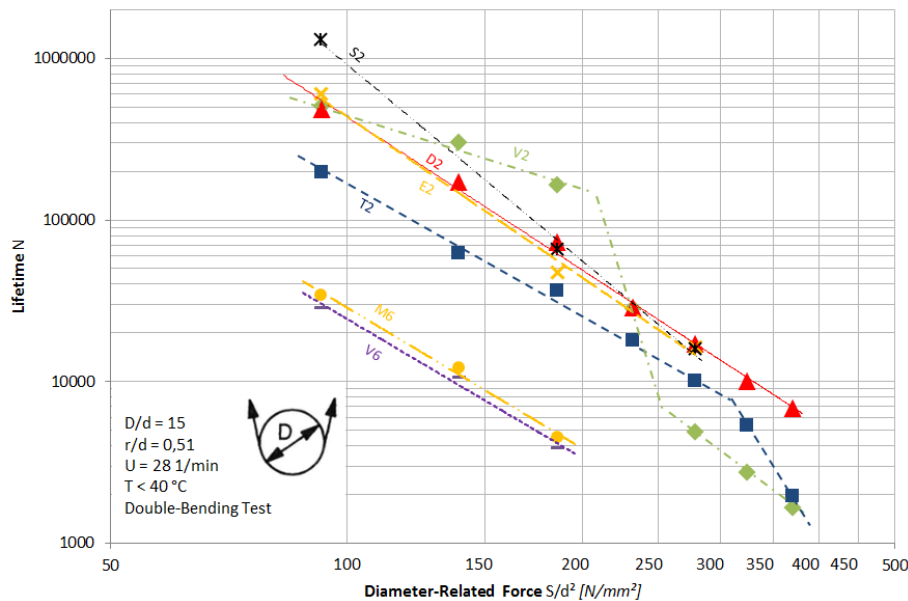


figure 4: Lifetime of all seven test ropes in standard BOS-tests

Obviously the lifetime N of all test ropes follows a linear decrease in a double-logarithmic scale. When reaching a specific force, the lifetime N collapses dramatically. This point is called Donandt-point [138] and can be found for the two test ropes T2 and V2.

Tension-tension tests are performed for all test ropes with different test frequencies and forces up to 50 % of the nominal breaking load (chapter 4.2). Thereby 100 % of the test samples survived the targeted goal of 5×10^5 alternations. In the following tensile tests (chapter 4.3) only marginal losses of breaking load are measured. Some samples, especially those from the test rope D2 out of Dyneema even showed an increase in breaking load due to the previous tension-tension stress. This can be explained by stretching processes in the long chain Dyneema fibres.

All high-dynamic bending tests are performed with the same diameter-related rope force of $S/d^2 = 93$ N/mm², which is at the same moment the lowest load of the different standard BOS-tests. In order to separate the influence of speed from the influence of acceleration, both parameters are varied discretely. The complete results of all high-dynamic bending tests can be found in chapter 4.4. Beside graphics, which

show the absolute lifetime of each rope in dependence of speed and acceleration, the relative lifetime of the test ropes in relation to the results of standard BOS-tests is displayed. Figure 5 shows the exemplary relative lifetime of the test rope D2 depending on speed and acceleration in high-dynamic BOS-tests.

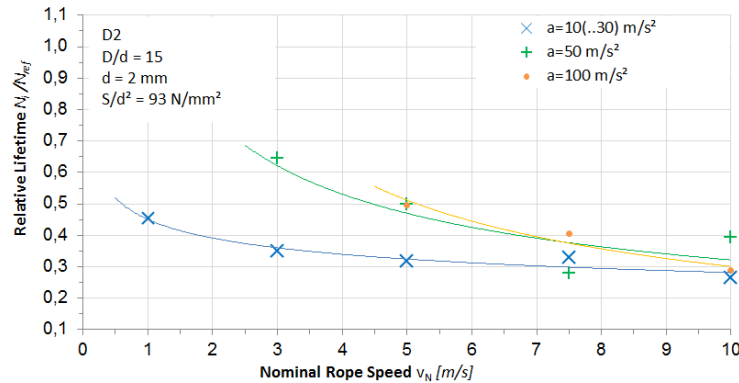


figure 5: Relative lifetime of the test rope D2 in high-dynamic BOS tests

It appears that the lifetime drops off with increasing speed. At the same time the lifetime tends to a global limit at approx. 30 % of the reference lifetime of standard BOS-tests. This means that 70 % of the lifetime gets lost by raising the dynamic of cycling BOS-tests. Due to the immunity of HM-HT-fibre ropes against tension-tension stress under dynamic load change discovered before, the reason for the decrease of lifetime in high-dynamic BOS-tests has to be found in the bending stress itself. In chapter 4.5 slippage measurements show that there is slip between the rope and the sheave which can be responsible for outer wear on the fibre rope. The appearance of the broken ropes is investigated microscopically in chapter 4.6. Here it can be shown that outer wear dominates the appearance of the ropes. Completely different properties can be found for other test ropes; for example the covered rope M6, see figure 6.

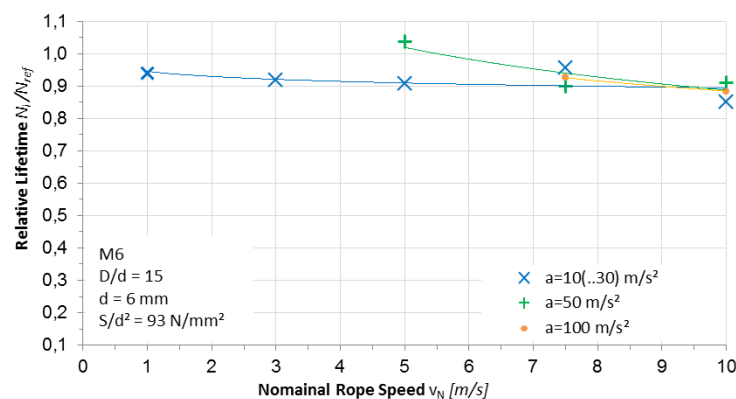


figure 6: Relative lifetime of the test rope M6 in high-dynamic BOS tests

The covered rope M6 shows only a marginally small decrease in lifetime of maximum 10 % when raising the dynamic parameters speed and acceleration. Based on the knowledge of the outer wear process in HDBOS-tests, the cover of the rope M6 acts like a shelter for the inner, load-bearing HM-HT-fibres. Consequently, the leading fibres do not get damaged by outer wear, which leads to the significantly better performance in high-dynamic BOS-tests.

The result of the HDBOS-tests performed with the test wire rope S2 is shown in figure 7 (see chapter 5.2).

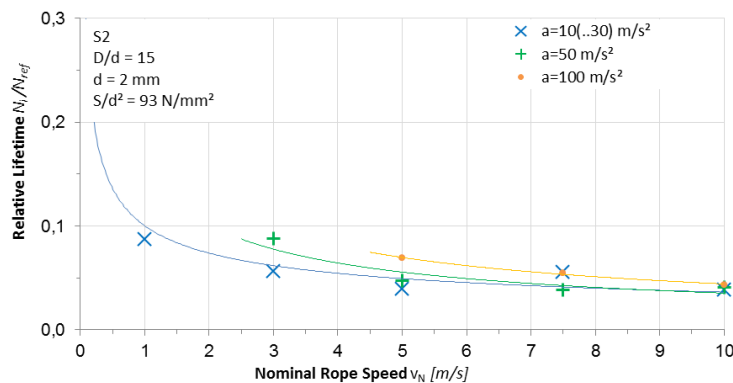


figure 7: Relative lifetime of the test rope S2 in high-dynamic BOS tests

Compared to standard BOS-tests, where the steel wire rope S2 showed a very good performance, the lifetime breaks down dramatically when increasing the dynamic parameters speed and acceleration. At the limit only 4 % of the reference lifetime is left, which means that 96 % of the lifetime got lost. This proves directly that high-dynamic conditions impair the lifetime of steel wire ropes much more than fibre ropes. Therefore, the so far common lifetime factor for high-dynamic influence in steel wire rope applications $f_{S4} = 1,00 \dots 1,20$ seems to be estimated as too low and should be examined in more detail.

The present work regards the influence of high-dynamic stress on the lifetime of synthetic fibre ropes for the very first time. Within this project the influence of high speed and high acceleration is regarded completely separate. In order to see the biggest possible overview, three different fibre materials, two different rope designs and two different rope diameters are examined. Therefore, it is possible to separate single influence parameters, which is done in chapter 4.4.3 ff. It appears that parameters like diameter, fibre material, speed, acceleration and rope design have different sizes of influence on the lifetime of the ropes. In summary it can be stated that with these results, the principle suitability of high modular fibre ropes for high-dynamic applications is proven and the influence of high dynamic on the lifetime of HM-HT-fibre ropes, which has to be taken into account, is quantified for the first time.

1. Einleitung

1.1. Motivation

Auf dem Gebiet der Fördertechnik sind Zugmittel für Aufzüge, Krane, Hebezeuge etc. von vorrangiger Bedeutung, wobei sich die eingesetzten Elemente in Bauform und verwendeten Materialien stark unterscheiden. Weit verbreitete Zugmittel sind beispielsweise Stahlseile, Riemen, Ketten und Bänder. Sicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit hängen maßgeblich von der Lebensdauer der eingesetzten Zugmittel ab [162].

Drahtseile verfügen gegenüber anderen metallischen Zugelementen über sehr hohe (Längs-)Festigkeiten, die sich aus den Einzelfestigkeiten der verseilten Drähte zusammensetzt [59]. Durch die parallel angeordneten Drähte ergibt sich im Vergleich zur Kette ein redundanter Aufbau, der einen schlagartigen Ausfall des Zugelements verhindert. Einzelne Drahtbrüche im Seil können durch visuelle und magnetische¹ Kontrollen rechtzeitig erkannt und somit das Seil sicher betrieben werden. Der Forschungsstand zum Schädigungs- und Ausfallverhalten von Stahldrahtseilen ist unter einem Großteil der Gesichtspunkte sehr hoch.

Nach Wehking et al. kann die Einteilung von Drahtseilen nach Verwendungszweck und den Konstruktionsmerkmalen der zur Anwendung kommenden Seile erfolgen [181]. Nach VDI 2358 [162] wird demnach folgendermaßen unterschieden:

- Laufende Seile
- Stehende Seile
- Tragseile
- Anschlagseile

Im Vergleich zu den drei letztgenannten unterscheiden sich Laufende Seile grundlegend in ihrer axialen Bewegungsform. Hierbei werden die Laufenden Seile über Scheiben geführt oder auf Winden aufgetrommelt, wobei sie neben der Zugbelastung gleichzeitig eine Biegebelastung erfahren. Nach Wang sind die primär an den Drähten von Stahldrahtseilen auftretenden mechanischen Spannungen Zug-, Biege- und Torsionsspannungen [174].

Die bislang vor allem durch ihre hohe Betriebssicherheit etablierten Stahlseile gelangen bei modernen technischen Anwendungen jedoch mehr und mehr an ihre

¹ Die magnetische Seilprüfung basiert auf dem Prinzip der magnetischen Streuflussmessung und wird beispielsweise in [41] näher beschrieben.

Grenzen, was vor allem auf die hohe Eigenmasse und die „ausgereizte“ Festigkeit zurückzuführen ist. So finden neben den etablierten Stahldrahtseilen hochfeste Faserseile in den verschiedensten technischen Anwendungen immer weiter verbreiteten Einsatz. Im Vergleich zu Drahtseilen ist der Stand der Forschung auf dem Gebiet der hochfesten Faserseile bislang jedoch unzureichend [107].

Auf Basis von hochmodularen Faserseilen wird am Stuttgarter Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) ein grundlegend neuer Ansatz zur Roboteranwendung verfolgt [133]. Hierbei wird eine bewegliche Plattform, die über hochmodulare Faserseile mit bis zu acht ortsfesten Winden verbunden ist, frei und vollständig kontrolliert durch den Raum bewegt. Die bekannteste Anwendung eines solchen, auch als „seilbasierter Stewart-Gough-Plattform“² genannten Manipulators, ist die seilgeführte Stadionkamera³ in großen Fußballstadien. Den prinzipiellen Aufbau eines solchen „Seilroboters“ zeigt Abbildung 1.1.

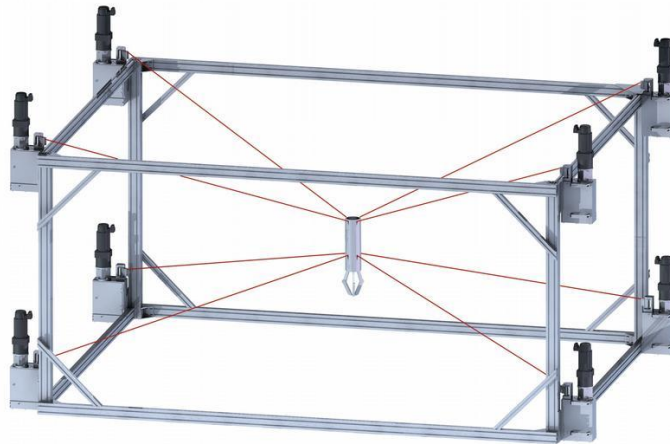


Abbildung 1.1: Aufbau eines Seilroboters [98]

Bei einem typischen Industrieroboter liegt das Verhältnis von Nutzlast zu bewegter Eigenmasse bei 1:10 [126]; bei den fortschrittlichsten Leichtbaurobotern etwa dem Kuka LBR 4+ wird ein Verhältnis von 2:1 realisiert [126]. In der Intralogistik werden automatische, schienengebundene Regalbediengeräte eingesetzt, die selbst bei geringen Nutzlasten von 20 bis 50 kg über ein Eigengewicht zwischen 1 bis 2 t verfügen [194]. Beim Seilroboter sind die Antriebselemente ortsfest angebracht, weshalb bei der Bewegung neben dem zu bewegenden Gut lediglich der Manipulator und die Seile im Raum bewegt werden müssen. Dies, verbunden mit der geringen Dichte und der hohen Festigkeit von hochfesten Faserseilen, ermöglicht beim Seilroboter ein sehr hohes Verhältnis von Nutzlast zu bewegter Eigenmasse. Durch

² Paralleles Maschinenkonzept, bei dem an Plattform und Basis Gelenkpunkte stets zusammen fallen und auf die beiden Erfinder Dr. E. Gough (1962) und D. Stewart (1965) zurück geht (Gough & Whitehall, 1962) (Stewart, 1965)

³ Auch unter dem Markennamen „Spidercam“ bekannt

diese enorme Leistungssteigerung kann der Seilroboter extrem energieeffizient arbeiten, da der Verlust für die Beschleunigung und Verzögerung der Strukturbauteile weitestgehend entfällt.

Gleichzeitig kann der Arbeitsraum völlig frei auf bis zu 100 m x 100 m x 30 m [134] und darüber hinaus vergrößert werden, was beispielsweise den Einsatz beim Aufbau von Solarfeldern oder bei der Bearbeitung von übergroßen Bauteilen wie den Tragflächen von Flugzeugen denkbar macht. Durch den prinzipiell einfachen und modularen Aufbau lässt sich der Seilroboter problemlos in bestehende Strukturen integrieren und ermöglicht sogar einen temporären, mobilen Aufbau für zeitlich begrenzte Aufgabenstellungen.

Mit dem größten Vorteil dürfte der Seilroboter jedoch damit aufweisen, dass auf Grund der geringen bewegten Massen enorm hohe Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s bei Beschleunigungen von bis zu 100 m/s² erreicht werden können [134]. Gerade bei großen Arbeitsräumen stellt dies einen großen Vorteil vor allem in Bezug auf die Taktzeit dar.

Bei diesen extremen Belastungen treten in den eingesetzten hochfesten Zugelementen bislang vollkommen unerforschte Beanspruchungen auf, die vor dem Einsatz hochfester Faserseile zwingend näher untersucht werden müssen, um einen ansonsten vorhandenen Mangel an Sicherheit zu verhindern [184].

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Wie zuvor beschrieben finden hochmodulare Faserseile in industriellen Anwendungen mehr und mehr Einzug. Großer Vorteil ist neben der hohen ertragbaren Zugkraft die geringe Dichte und damit die geringe Masse der eingesetzten Fasern. Auf Grund der Neuheit der hochmodularen Faserseile ist eine Reihe von Einflussfaktoren auf die Lebensdauer dieser Seile, wie zum Beispiel die Biegelänge, die Art der Biegung oder der Einfluss der Dynamik bislang gänzlich unerforscht. Dieser sicherheitstechnische Mangel erfordert eine grundlegende und systematische Untersuchung dieser Einflüsse. Zwei der wichtigsten dieser Einflüsse sind die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Seile in den Seiltrieben, da eben diese Parameter vorrangig für die Vorteile hochfester Faserseile stehen. Die Förderung dieser Arbeit zu Grunde liegenden Forschungsprojekts⁴ durch die DFG⁵ unterstreicht die Relevanz der Thematik für Wissenschaft und Forschung gleichermaßen wie für die praxisnahe Anwendung.

⁴ „Hochdynamische Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken“ [180]

⁵ DFG= Deutsche Forschungsgemeinschaft. Einrichtung zur Förderung von Wissenschaft und Forschung in der Bundesrepublik Deutschland

Die Zielsetzung des in dieser Arbeit behandelten Forschungsvorhabens zur Untersuchung von hochfesten Synthetischen Faserseilen unter hochdynamischer Beanspruchung lässt sich im Wesentlichen mit den folgenden wissenschaftlichen Betrachtungsweisen zusammenfassen:

- Grundlegende Darstellung der eingesetzten Fasermaterialien
- Erstellung eines Versuchsplans und Konstruktion eines neuartigen Prüfstands zur Realisierung der im Versuchsplan festgelegten Parameter
- Bau und Inbetriebnahme eines neuartigen Prüfstands
- Erarbeitung einer Datenbasis aus Standard-Dauerbiegeversuchen, die später als Referenz zu den aus Hochdynamikversuchen errungenen Ergebnissen dient.
- Durchführung systematischer Reihenversuche zur Erforschung des Verhaltens hochmodularer Fasereile unter schwellender Zugbeanspruchung.
- Erarbeitung einer Versuchsdatenbasis auf Grundlage systematischer Versuchsreihen durch gezielte Variation der Dynamikparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie ggf. weiterführenden und ergänzenden Versuchen.
- Aufarbeitung der Versuchsergebnisse zur analytischen Beschreibung der Seillebensdauer unter dem Einfluss verschiedener Geschwindigkeiten und Beschleunigungen.
- Verifikation der gewonnenen Erkenntnisse in Referenzversuchen.
- Verknüpfung der aus der Forschungsarbeit gewonnenen Erkenntnisse mit der Praxis.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es erstmalig die bislang vollkommen unbekanntem Einflüsse von hochdynamischer Beanspruchung auf die Lebensdauer und das Verhalten hochmodularer Faserseile zu untersuchen. Diese Beanspruchungen können auf Grund der komplexen Verhältnisse nicht analytisch erfasst werden, weshalb die Untersuchung ausschließlich auf experimentellen Reihenuntersuchungen basieren kann. Um die unterschiedlichen Einflüsse von Geschwindigkeit v und Beschleunigung a auf die Lebensdauer laufender Faserseile separat erfassen zu können ist es notwendig beide Parameter in Dauerbiegeversuchen getrennt voneinander systematisch zu variieren. Durch Angabe des Einflusses hoher Dynamik auf die Seillebensdauer werden die Versuchsergebnisse für alle untersuchten Seile der praktischen Anwendung zugänglich gemacht.

2. Grundlagen und Stand der Forschung

2.1. Seilroboter

Hinter dem Begriff Seilroboter steht die Idee eines parallelen⁶ Manipulators⁷, bei dem anstatt starrer Verbindungsglieder, wie sie beispielsweise bei einem Knickarmroboter⁸ verwendet werden, biegeeweiche Zugelemente zur Kraftübertragung eingesetzt werden. Zur weiteren Erklärung kann die Bezeichnung „seilbasierte Stewart-Gough-Plattform“ herangezogen werden. Bereits im Jahre 1928 wurde durch J. E. Gwinnett in seiner Patentschrift [72] die Anwendung eines räumlichen Parallelmanipulators als Simulator beschrieben. Dabei sollte die bewegliche Plattform eines Vergnügungs-Fahrgeschäfts über mehrere Beine eine Verschiebung zur ortsfesten Basis realisieren. Im Jahre 1962 entwickelte Dr. E. Gough im Rahmen seiner Tätigkeit bei der Firma Dunlop Rubber Co. ein paralleles System zur Prüfung von Reifen [70], bei dem die räumlich freie Bewegung der Plattform ausschließlich durch lineare Antriebe realisiert wird. Im Jahre 1965 entwickelte Stewart ein ähnliches System für Flugzeugsimulatoren, welches auch heute noch eingesetzt wird und als „Klassiker“ einer Parallelkinematik gilt. Die Anwendung einer sog. Stewart-Gough-Plattform als Flugsimulator zeigt Abbildung 2.1.



Abbildung 2.1: Flugsimulator mit paralleler Kinematik des Instituts für Systemdynamik der Universität Stuttgart (ISYS)

⁶ Parallel bedeutet, dass mehrere Achsen zur Erzeugung einer linearen Bewegung agieren müssen.

⁷ Ein Manipulator ist ein Begriff aus der Robotik und bezeichnet das Element, das die physikalische Interaktion mit der Umgebung realisiert.

⁸ Knickarmroboter werden auch als Industrie- oder Gelenkarmroboter bezeichnet

In den vergangenen Jahren entstand auf den unterschiedlichsten Anwendungsfeldern eine Vielzahl neuartiger paralleler Strukturen. So beschreiben Schöpfer und Neumann in [145] eine parallelkinematische Werkzeugmaschine unter Verwendung von Seilantrieben. Große Vorteile zeigen die parallelkinematischen Roboter dabei durch eine sehr hohe Steifigkeit, die aus einer gegenseitigen Verspannung der hochfesten Elemente resultiert. Gleichzeitig lässt sich die Dynamik des Gesamtsystems durch wesentlich kleinere bewegte Massen erheblich steigern. Zuletzt ermöglicht die Verwendung von baugleichen Antriebskomponenten die Reduktion der Fertigungskosten sowie einen modularen Aufbau.

Ein großer Nachteil parallelkinematischer Roboter liegt jedoch in ihrem stark begrenzten Arbeitsraum und ihrem schlechten Verhältnis von Bauraum zu Arbeitsraum auf Grund der mechanischen Grenzen der zur Verfügung stehenden Linearantriebe. Bereits im Jahr 1985 zeigen Landberger und Sheridan [101] eine Lösung dieser Probleme durch die Verwendung von Seilen in Verbindung mit Winden statt Linearaktuatoren auf. Dieses System wird im Folgenden als (paralleler) Seilroboter („wire robot“ [109] oder „cable driven robot“ [48]) bezeichnet.

Als wichtigste Eigenschaften von Seilrobotern im Vergleich zu konventionellen und konventionell parallelkinematischen Robotern können dabei in Anlehnung an Bruckmann [16] die folgenden angesehen werden:

- Seile sind sehr biegeweich bei gleichzeitig hoher Steifigkeit in axialer Richtung [59]. Somit ist es sehr einfach möglich Seile auf Trommeln und Winden zu speichern und durch Drehung der Winde eine Zugkraft im Seil zu erzeugen. Das Speichervolumen der verwendeten Trommeln und Winden lässt sich nahezu beliebig erhöhen, weshalb die effektive Länge des eingesetzten Linearaktuators „Seil“ praktisch nicht begrenzt ist. Der Arbeitsraum eines Seilroboters ist somit nahezu unbeschränkt. Gleichzeitig erreicht das Verhältnis von Bauraum zu Arbeitsraum bisher kaum mögliche Werte.
- Die Verfahrgeschwindigkeiten von Seilen richten sich vorrangig nach den eingesetzten Antrieben. So können Seile auf schnelllaufenden Winden aufgewickelt werden. Damit können für Leichtbau-Endeffektoren sehr hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen realisiert werden. Nach Merlet können extrem schnelle Seilroboter mit Hilfe von Flaschenzügen gebaut werden, da hierbei die Geschwindigkeit des Antriebs mit Hilfe der Einscherungen vervielfacht werden kann [110].
- Unter Beibehaltung der Antriebe lässt sich die Nutzlast bei verringerter Dynamik um ein Vielfaches im Vergleich zu konventionellen Industrierobotern steigern. Somit sind Seilroboter mit einer Nutzlast von mehreren Tonnen durchaus möglich [134].

- Der Aufbau eines Seilroboters ist modular und zugleich mechanisch einfach. So lassen sich die verwendeten Winden in Baukastensysteme stufen und unter Verwendung einer modernen Steuerung mit Feldbustechnik zu einer Vielzahl an Varianten zusammenfügen. Somit ist der Aufbau eines Seilroboters zugleich rekonfigurierbar und bietet ein Höchstmaß an Flexibilität.
- Durch die massive Verringerung an bewegten Massen unter gleichzeitiger Verwendung von Leichtbau-Endeffektoren wird der Energieverbrauch des Gesamtsystems fast ausschließlich nur noch für die Bewegung des Gutes selbst festgelegt. Die Energie, die sonst zur Bewegung des Roboters selbst aufzubringen ist, spielt nur noch eine untergeordnete Rolle. Dadurch können Seilrobotern im Vergleich zu anderen Systemen extrem energieeffizient arbeiten.
- Im Gegensatz zu Zylindern oder Kugelrollspindeln können Seile (im Wesentlichen) nur Zugkräfte übertragen. Hierzu muss das Seil unter Spannung stehen, wozu entweder innere oder äußere Kräfte angreifen müssen. Innere Kräfte können durch zusätzlich an der Plattform angreifende Seile erzeugt werden. Das System wird somit innerhalb des Arbeitsraums verspannt. Dies kann zu Zugänglichkeitsproblemen führen, was eine detaillierte Kollisionsbetrachtung erfordern kann.
- Durch Dehnung der Seile und teils langen Übertragungstrecken ist die Positioniergenauigkeit von Seilrobotern mitunter mangelhaft. Aus diesem Grund eignen sich Seilroboter nicht für Aufgaben, die höchste Ansprüche an die Positioniergenauigkeit stellen.

Weltweit wird seit einigen Jahren im Rahmen verschiedener Projekte am System „Seilroboter“ geforscht.

So entstanden beispielsweise im Rahmen der DFG-Forschungsprojekte „ARTIST“ (Arbeitsraumsynthese seilgetriebener Parallelkinematikstrukturen, HI 370/18) und „SEGESTA“ (Seilgetriebene Stewart-Plattformen in Theorie und Anwendung, HI 370/24-1 und SCHR 1176/1-2) an der Universität Duisburg-Essen mathematische Modelle zur Analyse des Arbeitsraums seilgetriebener Roboter sowie Prüfstände zur Verifikation theoretischer Betrachtungen [16], [81], [163]. Nach Bruckmann zeigen die mit dem SEGESTA-Prüfstand demonstrierten Verwendungszwecke bereits das Potential von Seilrobotern hinsichtlich des enormen Beschleunigungsvermögens [16].

In den Projekten „RoboCrane“ des National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington D.C., USA [3] und CABLEV (Cable levitation) der Universität Rostock [80] [188] wird daran gearbeitet den potentiell sehr großen Arbeitsraum von Seilrobotern auszunutzen.

Das Potential eines Seilroboters, das auf Grund seiner hohen Dynamik entsteht, steht bei verschiedenen Forschungsvorhaben im Vordergrund. So basiert der MARIONET-Prüfstand [111] auf dem Prinzip eines invertierten Flaschenzugs, durch das sich sehr hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erzeugen lassen. Der Seilroboter WARP (Wirepuller-arm-driven redundant parallel manipulator) [105][156] wurde für hochdynamische Handhabungsaufgaben entwickelt. Ebenso wurde der Seilroboter Falcon (Fast Load Conveyance) [91][92] für hochdynamische Aufgaben entwickelt.

Im Projekt CoGiRo („Control of Giant Robots“) soll die Steuerung großer Seilroboter, die gleichzeitig schwere Lasten handhaben können, erforscht werden. Hierzu haben sich vier Projektpartner (TECNALIA France, Institut Pascal CNRS – Universität Blaise Pascal, LIRMM CNRS – Universität Montpellier 2 und EPI COPRIN INRIA Sophia Antipolis) zusammengeschlossen und einen Großdemonstrator mit einer Größe von 15 m x 11 m x 6 m erstellt [115].

Eine weitere Anwendung von Seilrobotern, bei dem der geringe Seildurchmesser dazu ausgenutzt werden soll, möglichst wenig Angriffsfläche für Windströmung zu bieten, ist die Verwendung als Aufhängung im Windkanal. Diese Idee wurde beispielsweise in [100] oder [192] verfolgt und erforscht. Unter Leitung von Prof. Moustafa Abdel-Maksoud wurde an der Technischen Universität Hamburg-Harburg in Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg-Essen ein aktives Aufhängungssystem im Windkanal für Nutzlast bis ca. 100 kg entwickelt [159].

Im Siebten Rahmenprogramm (FP7/2007-2013, n^o 285404) wurde im Projekt CableBOT an der Universität Duisburg Essen unter Förderung der Europäischen Union die Eignung von Robotersystemen zum Transport von Großbauteilen, wie sie beispielsweise im Flugzeugbau vorkommen, untersucht [159]. Dabei konnte der Seilroboter durch seinen enormen Arbeitsraum sowie seine Rekonfigurierbarkeit überzeugen.

Ebenfalls durch die Universität Duisburg-Essen wurde im Rahmen des Effizienz-Clusters LogistikRuhr-Projekt „Entwicklung eines Regalbediengerätes auf Basis der Stewart-Gough-Plattform“ ein Seilroboter mit einer Länge von 12 m und einer Höhe von 6 m entwickelt und erstellt, der als Regalbediengerät fungiert. Mit diesem Prototyp konnten die bewegten Massen um bis zu 90% reduziert werden, was sowohl dem Energieverbrauch wie auch der Dynamik des Gesamtsystems zu Gute kam [18].

Stuttgarter Forscher des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) um Junior-Prof. Dr.-Ing. A. Pott konnten im Laufe der Jahre

unter dem Namen „IPAnema“⁹ bereits eine ganze Familie an Seilrobotern entwickeln und realisieren. [17]. In der aktuellsten Version wird der IPAnema 3.2 produziert und weiter erforscht. Er verfügt über insgesamt acht baugleiche Winden, die vom IPA speziell entwickelt, designet und produziert wurden [133]. Die Steuerung wird über eine echtzeitfähige NC-Steuerung, die sich über G-Code¹⁰ [27] programmieren lässt, realisiert [134]. Im Vergleich zu anderen Seilrobotern kommen beim IPAnema anstatt Stahldrahtseilen ausschließlich hochfeste Faserseile aus Dyneema¹¹ zum Einsatz. Die enormen Vorteile dieser modernen Seile werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Je nach Nutzlast werden beim IPAnema hochmodulare Dyneema-Faserseile mit einem Durchmesser von 2,5 mm oder 6,0 mm eingesetzt.

Am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen wurde mit Unterstützung des Fraunhofer IPAs im Jahr 2015 ein neuer Seilroboter entwickelt, der zur Bewegungssimulation eingesetzt werden soll [121]. Als erster Seilroboter überhaupt können mit dem „CableRobot Simulator“ Personen auf einer Plattform transportiert werden und damit der Forschung der Abteilung Wahrnehmung, Kognition und Handling von Prof. H. Bühlhoff genutzt werden. Zum sicheren Transport von Personen, der beim CableRobot Simulator zur Simulation von Achterbahnfahrten oder Flugzeugstarts oder zur Erforschung von Gleichgewichtsstörungen dienen soll, wurde die Leichtbau-Plattform dieses Roboters an acht Stahldrahtseilen befestigt [121]. Auf die Verwendung von modernen hochfesten Faserseilen wurde auf Grund lückenhafter Grundlagenforschung auf dem Gebiet der hochfesten Faserseile verzichtet.

Diese Auswahl an internationalen Forschungsprojekten unterstreicht das große Potential des Systems „Seilroboter“ und verdeutlicht die Relevanz der grundlegenden Erforschung der eingesetzten Zuelemente in einem derartigen kinematischen System. Die Übertragung gewonnener Erkenntnisse in andere Anwendungen mit schnelllaufenden Faserseilen ist dabei gut denkbar. Mögliche Anwendungsgebiete sind dabei beispielsweise Aufzugsanlagen, Schachtförderanlagen, Achterbahnen und Crash-Test-Anlagen.

⁹ IPAnema ist ein Kunstwort und leitet sich aus der Kurzform des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung, IPA, sowie der Endsilbe des verwendeten Seilrohstoffs, Dyneema, ab.

¹⁰ G-Code, auch DIN-Code genannt, ist eine Maschinensprache, die meist für CNC-Maschinen angewandt wird.

¹¹ Dyneema ist ein eingetragener Handelsmarke des niederländischen Herstellers „Royal DSM“ für eine synthetische, hochmodulare Faser

2.2. Klassifikation von Seilrobotern

Seilroboter werden nach der Anzahl der verwendeten Seile m sowie der Anzahl der Freiheitsgrade des Manipulators n definiert. Nach Ming & Higuchi [118] gilt für die Redundanz r der Zusammenhang

$$r = m - n \quad (2.1)$$

Nach Fang [55] lassen sich somit 3 Klassen von Seilrobotern definieren:

- IKRM (Incompletely Kinematic Restrained Manipulators) $m < n$
- CKRM (Completely Kinematic Restrained Manipulators) $m = n$
- RAMP (Redundantly Actuated Manipulators) $m \geq n + 1$

Aus Sicht der Seiltechnik lassen sich Seilroboter prinzipiell nach der Art der eingesetzten Zuelemente einteilen. So existieren neben Seilrobotern, bei denen Stahlseile zur Übertragung der Zugkräfte eingesetzt werden auch Seilroboter, in denen hochfeste Faserseile, die gegenüber Stahlseilen einige Vorteile haben, verwendet werden.

2.3. Seile und deren Entwicklung

2.3.1. Definition und Macharten

Bei einem Faserseil handelt es sich um ein aus Kunst- oder Naturfasern zusammengedrehtes oder -geflochtenes, längliches, biegeweiches Element, das hauptsächlich zur Übertragung von Zugkräften eingesetzt wird. Die Begrifflichkeiten rund um das Faserseil regelt DIN EN ISO 1968 [30]. Wesentliche Eigenschaften eines Faserseils sind die Zusammensetzung aus einer Vielzahl einzelner, sehr dünner Filamente¹² sowie eine relativ hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringer Biegesteifigkeit. Durch drehen entstehen aus Filamenten Garne¹³, aus Garnen Litzen, welche wieder durch schlagen oder flechten zu einem (Faser-)Seil zusammengefasst werden. Der Herstellungsprozess eines Seils ist somit immer mehrstufig, wobei die Anzahl der Stufen hauptsächlich vom gewünschten Garn-, Litzen- und Seildurchmesser abhängt. Darüber hinaus werden Faserseile in offener Konstruktion oder mit einem schützenden Mantel produziert.

Nach VDI 2500 [161] werden Faserseile der folgenden Macharten unterschieden:

¹² Ein „Filament“ bezeichnet eine einzelne Faser unbegrenzter Länge

¹³ „Garn“ ist ein Sammelbegriff für alle linienartigen, textilen Gebilde [29]

Gedrehtes (geschlagenes)¹⁴ Faserseil

Hierbei werden die Litzen, ähnlich wie bei einem klassischen Stahlseil, helixförmig¹⁵ zueinander verdreht. Gedrehte Faserseile verfügen über keine feste Struktur und eignen sich somit (ohne stützenden Schutzmantel) nicht zum Einsatz als Laufende Seile. Abbildung 2.2 zeigt den Aufbau eines solchen gedrehten Seils.

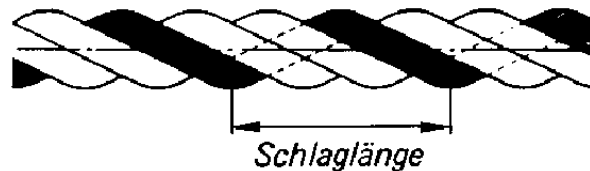


Abbildung 2.2: Seitenansicht eines gedrehten (geschlagenen) Seils [161]

Trossenschlag- und Kabelschlagseil

Trossen- und Kabelschlag beschreiben spezielle gedrehte Faserseilkonstruktionen, wobei das Kabelschlagseil gegenüber dem Trossenschlagseil durch eine zusätzliche Verarbeitungsstufe entsteht.

Geflochtenes Faserseil

Unter der Gruppe der geflochtenen Seile wird zusätzlich unter den in Abbildung 2.3 aufgelisteten Geflechten unterschieden. Den Aufbau verschiedener Rundgeflechte zeigt Abbildung 2.4.



Abbildung 2.3: Übersicht über geflochtene Seilkonstruktionen i.A.a. [161]

¹⁴ „Schlagen“ beschreibt das Zusammendrehen mehrerer Bestandteile zu einer Litze oder einem Seil.

¹⁵ schraubenlinienförmig

Geflochtene Faserseile zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass Sie unter Last auf Grund ihres symmetrischen Aufbaus kein nach außen wirkendes Drehmoment erzeugen. Durch die Verflechtung der Litzen neigen sie nicht zum Aufdrehen und bieten einen guten Abrasionswiderstand. Darüber hinaus sind sie gut spleißbar. Abbildung 2.4 zeigt den Aufbau verschiedener Rundgeflechte.

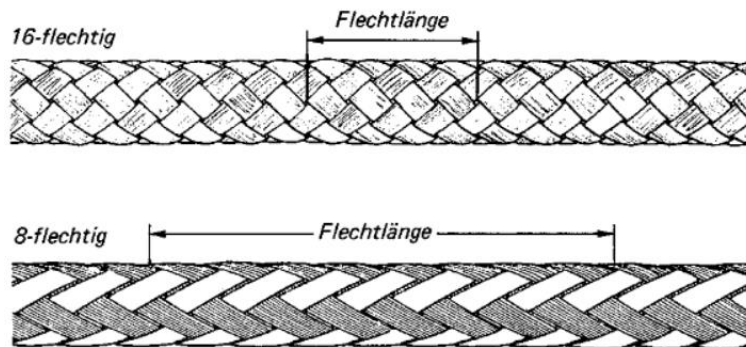


Abbildung 2.4: Rundgeflechte und deren Flechtlänge [161]

Rundgeflechte entstehen durch das regelmäßige Verkreuzen von Litzen. In der Regel sind Rundgeflechte symmetrisch aufgebaut, d.h. die Hälfte der Litzen ist linksgängig, die andere Hälfte rechtsgängig¹⁶ geflochten. Zudem werden ebenfalls je zur Hälfte rechts- und linksgängige Litzen verwendet¹⁷. Dadurch sind Rundgeflechte von Natur aus rotationsfrei. Durch ihre runde Form sowie die geringe Dehnung eignen sie sich sehr gut zum Einsatz als laufendes Seil.

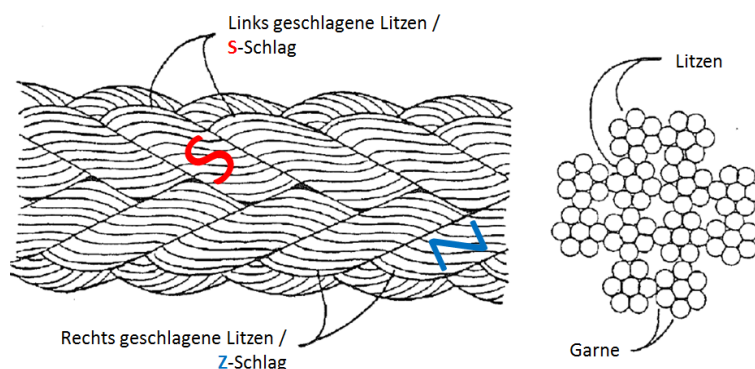


Abbildung 2.5: Aufbau eines 12-flechtigen Rundgeflecht-Faserseils in der Seitenansicht (links) und im Querschnitt (rechts) [108]

¹⁶ Linksgängig bzw. rechtsgängig gibt an nach welchem Drehsinn das jeweilige Element gefertigt wurde. Die Bezeichnung S- und Z-Schlag stammt davon ab, welche Buchstabenform sich am geeignetsten in die jeweilige Schlagrichtung einbeschreiben lässt.

¹⁷ vgl. Abbildung 2.5: Aufbau eines 12-flechtigen Rundgeflecht-Faserseils in der Seitenansicht (links) und im Querschnitt (rechts) [108]

Auf Grund ihres ringförmigen Aufbaus befindet sich im Rundgeflecht keine Seele¹⁸, d.h. dass das Rundgeflecht zu den sogenannten Hohlgeflechten zu zählen ist. Nach Michael [114] flachen sich Hohlgeflechte unter dynamischer sowie statischer Last ab, was zu einer erhöhten Faser-Faser-Reibung im Seilinneren führt. Dieses verschleißfördernde Verhalten ist beim Einsatz von Hohlgeflechten zu beachten.

Beim Einsatz zum Lauf über Scheiben haben sich unter anderem drahtseilartige Faserseilkonstruktionen („**Wire rope construction**“) auf Grund sehr guter Biegeeigenschaften, dem besseren Abrasionswiderstand wegen der vorliegenden Linienberührung der Garne und einem guten Faser/Seil-Festigkeitsverhältnisses als vorteilhaft erwiesen. Diese Seilgeflechte werden nach den gleichen Prinzipien wie Stahldrahtseile gefertigt. Die Litzen werden hierbei helixförmig um eine Zentrallitze im Zentrum des Seils geschlagen. Üblicher Weise ist der Aufbau dabei mehrlagig. Auf Grund ihrer Neigung zum Aufdrehen und dem schlechten Abrasionsverhalten beim Lauf über Scheiben wird das Seil mit einem schützenden und zugleich stützenden Mantel umflochten.

Auf Grund der o.g. guten bis sehr guten Eigenschaften beim Lauf über Scheiben erscheinen Faserseilkonstruktionen der Macharten „Rundgeflecht“ und „Wire rope construction“ mit Mantel besonders erfolgversprechend für den Einsatz in parallelen Seilkinematiken. Folglich werden in dieser Arbeit Faserseile aus verschiedenen Polymerwerkstoffen dieser beiden Konstruktionen untersucht.

2.3.2. Entwicklung der Seile

Die Geschichte des Seils reicht bereits viele tausend Jahre zurück. Erste Hinweise auf die Verwendung von Seilen finden sich bereits in der Mittelsteinzeit. Die ältesten Darstellungen von Seilen aus pflanzlichen Materialien, Tierhäuten und Haaren gehen bis auf 12000 v.Chr. zurück [167]. Im Jahre 1942 fanden Britische Soldaten in Ägypten ein Papyrusseil, das um Steinquader gebunden war. Dieses Seil, das auf ca. 500 v.Chr. datiert werden konnte, hatte einen ähnlichen Aufbau wie moderne dreilitzige Seile. Hierzu wurden je sieben Fasern zu Garnen verdreht, 40 Garne wurden zu einer Litze verdreht und drei Litzen wurden zu einem Seil zusammengefasst [68].

Die Konstruktion und der Herstellungsprozess der Faserseile wurden im Laufe der Zeit immer weiter verbessert, wobei als Werkstoff ausschließlich Naturfasern wie Hanf und Manila zum Einsatz kamen. Diese natürlichen Werkstoffe unterliegen auf Grund ihres Wachstumsprozesses großen Schwankungen in ihren ohnehin beschränkten mechanischen Eigenschaften. Zudem sind sie empfindlich gegenüber Feuchtigkeitseintrag. Diese Nachteile wirkten sich in Zeiten der Industrialisierung, in

¹⁸ Als Seele wird die Einlage im Zentrum eines Seils bezeichnet.

der immer größere Massen vor allem im Bergbau bewegt werden mussten, zunehmend negativ aus.

Ab Anfang des 19. Jahrhunderts wurden neben Ketten hauptsächlich Hanfseile als Fördermittel verwendet, wobei Ketten zwar über eine höhere Festigkeit verfügten, auf Grund der in Reihe geschalteten Zugglieder jedoch nur eine geringe Betriebssicherheit aufwiesen. Bereits 1834 erkannte Bergrat Wilhelm August Julius Albert den Vorteil der redundanten, parallel liegenden Tragelemente des Faserseils, jedoch war der Einsatz von Hanffasern nur in trockenen Schächten möglich [167]. Durch Kombination der Struktur des Faserseils mit den Festigkeiten der stählernen Kettenglieder entwickelte Albert das Stahldrahtseil, das sowohl eine hohe Festigkeit, wie auch eine hohe Betriebssicherheit durch seinen redundanten Aufbau aufweisen konnte.

2.3.3. Entwicklung der HM-HT-Fasern

Prinzipiell können synthetisch produzierte Hochleistungsfasern in drei Gruppen eingeordnet werden:

- Polymerfasern,
- Carbonfasern und
- anorganische Fasern.

Laut Smeets, Vlasblom et al. sind für dynamische Anwendungen, wie sie in Seiltrieben vorliegen, Polymerfasern am geeignetsten [154].

Erste Entwicklungen von vollsynthetischen Faserseilen erfolgten bereits Anfang des 20. Jahrhunderts. Die Firma DuPont¹⁹ begann im Jahr 1939 mit der industriellen Produktion von Nylon²⁰, ein Polyamid das zuvor von Wallace Carothers erfunden worden war. Über viele Jahre hinweg war Nylon auf Grund seiner Festigkeit und Dehnbarkeit sehr beliebt [108], doch erst die Entwicklung der HM-HT²¹-Fasern in den 1960er Jahren brachte den industriellen Einsatz von Faserseilen zu ihrem wirklichen Durchbruch. Die erste am Markt erhältliche HM-HT-Faser war die von DuPont produzierte (Para-) Aramidfaser, die unter dem Markennamen Kevlar²² vertrieben wird. In den 1980er Jahren erfolgte die Entwicklung der hochmodularen Polyethylene (HMPE). Nach der Jahrtausendwende entwickelte die Firma Toyobo²³ den Werkstoff

¹⁹ E.I. du Pont de Nemours and Company, kurz DuPont, ist einer der weltweit größten Konzerne der chemischen Industrie mit Sitz in Wilmington, USA.

²⁰ Nylon ist ein Gattungsname und bezeichnet die von DuPont entwickelte Faser aus Polyhexamethylenadipinsäureamid. Der Name stammt von der ursprünglichen Entwicklung der Faser für die Verwendung für Strümpfe.

²¹ HM ist die Bezeichnung für „hochsteif“ (High Modulus), HT bezeichnet „hochfest“ (High Tensity)

²² Kevlar ist ein eingetragener Markenname der Firma DuPont

²³ Toyobo ist ein Konzern der chemischen Industrie mit Sitz in Osaka, Japan.

Zylon, der aus Polybenzoxazol besteht. Einen Überblick über die Zugfestigkeiten verschiedener Seilwerkstoffe gibt Abbildung 2.6.

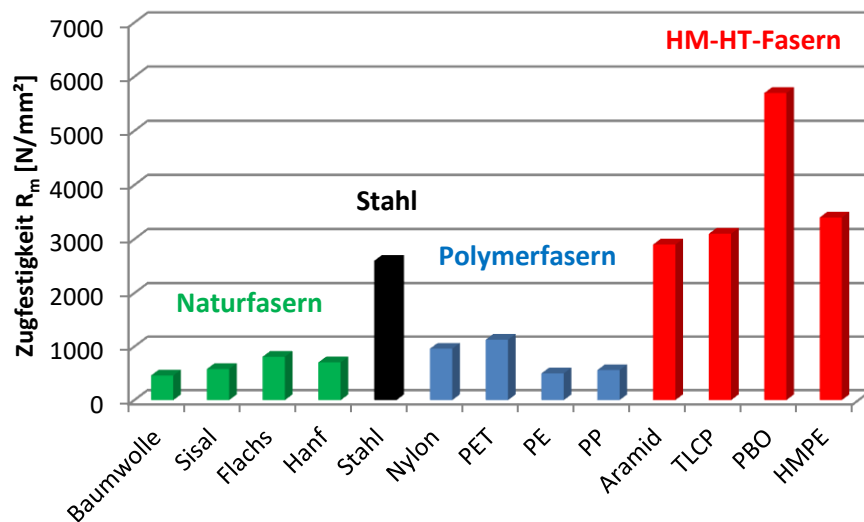


Abbildung 2.6: Zugfestigkeiten verschiedener Seilwerkstoffe im Vergleich i.A.a. [108]

Die bedeutendsten heute am Markt befindlichen HM-HT-Fasern für Seile und deren Handelsname sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

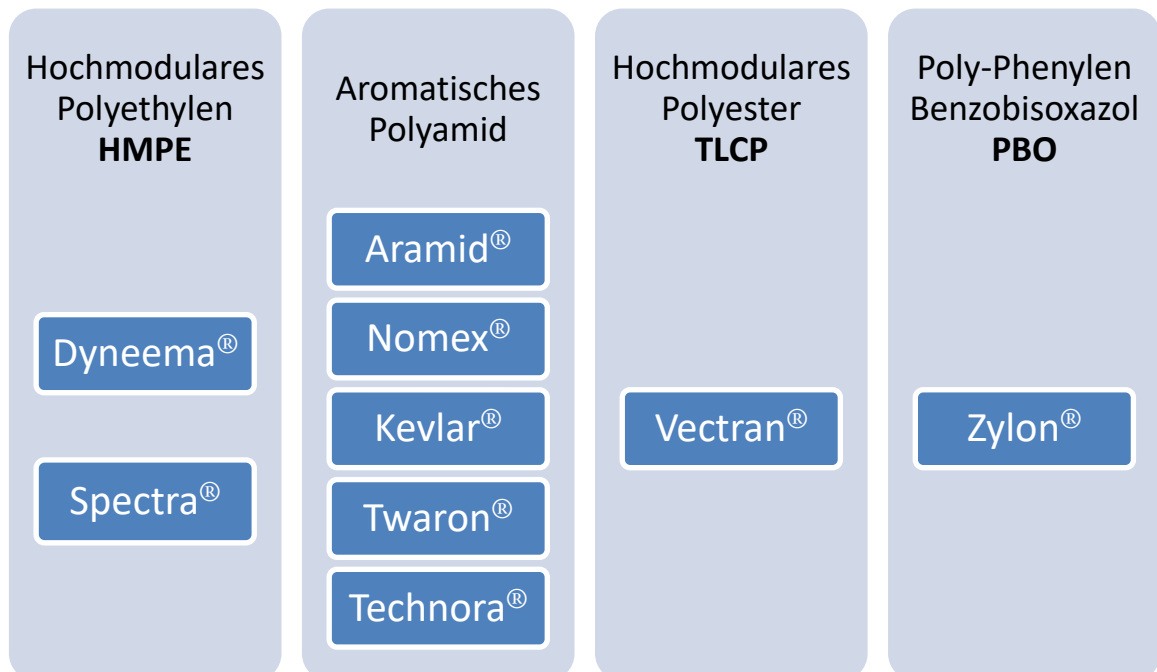


Tabelle 2.1: Hochfeste Fasern und deren Handelsname

Andere in der modernen Technik verwendete Kunstfasern wie beispielsweise Kohlenstofffasern oder Glasfasern finden in der Seiltechnik auf Grund Ihrer

schlechteren Biegeeigenschaften wenig Einsatz. Eine Ausnahme bildet hierbei das Ultrarope der Firma KONE²⁴, das aus ummantelten Kohlenstofffasern besteht [95]. Das „High Friction Coating“ HFC sorgt dabei für einen möglichst hohen Reibwert zwischen Seil und Treibscheibe. Auf Grund unternehmensstrategischer Überlegungen wurden bislang jedoch keine genaueren Details über den Aufbau des Seils veröffentlicht.

2.3.4. Faserseile - Begriffe und Definitionen

Ersatzdurchmesser und Ersatzspannung

Während bei Stahlseilen zur Bestimmung des Querschnittes der Seil-Außendurchmesser d_a verwendet wird, ist dies bei Faserseilen auf Grund der oft nicht kreisrunden und leicht deformierbaren Seilstruktur nicht immer problemlos möglich. Aus diesem Grund kann dazu übergegangen werden den Seilquerschnitt über die Seilfeinheit T_T in Kombination mit der Faserdichte ρ zu ermitteln. Nach Vogel und Heinze [170] ergibt sich der sogenannte Ersatzdurchmesser d_E nach

$$d_E = \sqrt{\frac{4 \cdot T_T}{\pi \cdot \rho}} \quad (2.2)$$

und damit die Ersatzspannung nach

$$\sigma_E = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot d_E^2} = \frac{S \cdot \rho}{T_T} \quad (2.3)$$

Fasermasse

Die Fasermasse beschreibt das Gewicht einer einzelnen Faser auf einer Bezugslänge. Die Einheit der Fasermasse ist tex [28].

$$[1 \text{ tex}] = \left[\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ m}} \right]$$

Analog können die mechanischen Eigenschaften hochfester Faserseile auf die Fasermasse bezogen werden. So ergibt sich für den spezifischen E-Modul

$$\left[\frac{N}{\text{tex}} \right]$$

²⁴ KONE ist ein finnischer Aufzugshersteller und zählt zu den vier großen Unternehmen der Branche. „Kone“ bedeutet übersetzt „Maschine“.

und für die spezifische Steifigkeit als Quotient von spezifischem E-Modul zu Werkstoffdichte

$$\left[\frac{Nm}{kg} \right]$$

Retardation

Unter Retardation versteht man einen Kriechvorgang eines Werkstoffs unter konstanter Last, s. Abbildung 2.7. Dieser Retardationsvorgang ist sowohl zeit- wie auch temperaturabhängig. Dieser Kriechvorgang kann auf das Auseinandergleiten von Molekülketten oder durch Umlagerungen von Fehlstellen zurückgeführt werden [140].

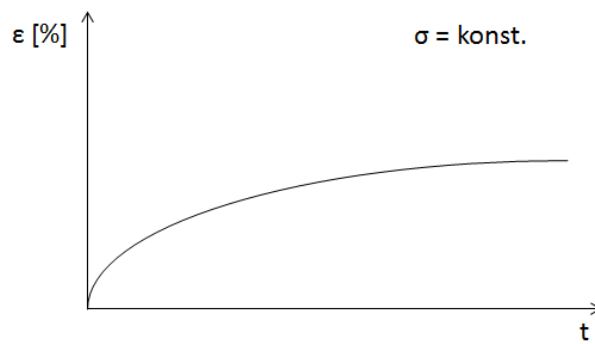


Abbildung 2.7: Retardationsvorgang (Kriechen) in Abhängigkeit der Zeit t

Relaxation

Relaxation beschreibt den Übergang eines Werkstoffs in seinen Grund- bzw. Gleichgewichtszustand. Bei Anliegen einer konstanten Dehnung nimmt die Spannung im Werkstoff zeitlich ab, s. Abbildung 2.8.

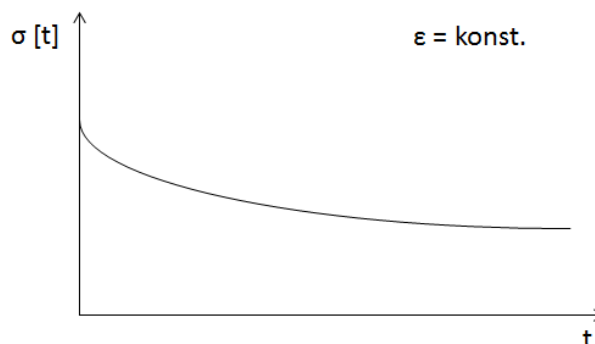


Abbildung 2.8: Relaxationsvorgang in Abhängigkeit der Zeit t

Retardation und Relaxation folgen zumeist einem exponentiellen Verlauf.

Reibung

Reibung ist eine Kraft, welche durch die Wechselwirkung von in Kontakt stehenden Stoffbereichen hervorgerufen wird. Im Falle einer Relativbewegung wirkt die Reibung stets entgegengesetzt.

Verschleiß

Unter Verschleiß versteht man den fortschreitenden Materialabtrag aus der Oberfläche eines Festkörpers, der nur unter Reibung sowie Relativbewegung der sich berührenden Körper auftritt. Verschleiß kann demzufolge nicht unter Haftreibung erfolgen [71]. Die Ritzung bzw. Mikrozerspannung, ausgehend von der Randschicht, wird als *abrasiver Verschleiß* oder *Abrasion* bezeichnet.

Reibung und Verschleiß sind keine konstanten Werkstoffeigenschaften, sondern vielmehr Ausgangsgrößen eines Systems als Stoffeigenschaft. Zwar bildet die Werkstoffpaarung in solch einem tribologischen System²⁵ einen elementaren Teil der Systemstruktur, die jedoch nur durch eine Vielzahl weiterer Eigenschaften vollständig beschrieben werden kann. Darüber hinaus ändert sich eine Vielzahl von Einflussfaktoren, wie beispielsweise Temperatur und Kontaktverhältnisse, auf Grund des wirkenden Verschleiß und Reibung über der Lebensdauer [71].

2.3.5. HM-HT-Fasern – Produktion und Eigenschaften

Chemiefasern²⁶ werden zumeist in Nass- oder Trockenspinnverfahren produziert. Dazu wird der Ausgangsstoff, das Granulat, zunächst in einer Lösung oder durch Erhitzung plastifiziert und anschließend extrudiert. Dabei entstehen in der Faser sowohl kristalline wie auch amorphe Bereiche.

HM-HT-Fasern bestehen aus Thermoplasten, deren lange Kettenmoleküle linear angeordnet und gleichmäßig orientiert sind. Durch diese Anordnung der Kettenmoleküle wird ein sehr hoher Kristallisationsgrad erreicht [120], der laut Loy [104] bis zu 85 % betragen kann. Infolge dieser langen Kettenmoleküle und sehr kleinen Molekülabständen, die zu starken zwischenmolekularen Kräften führen, ergeben sich hohe Festigkeiten und hohe Steifigkeiten. Die Stärke und Art dieser intermolekularen Kräfte ist laut Hopmann & Michaeli [83] abhängig von der Größe der Kettenmoleküle, der Gestalt der Kettenmoleküle, der Ordnung der Kettenmoleküle, der Art der Kettenmoleküle, dem Kristallisationsgrad sowie äußeren Einflüssen. Die amorphen Bereiche sorgen für eine ausreichende Zähigkeit und Flexibilität.

²⁵ Tribologie bezeichnet die Lehre der Reibung

²⁶ früher „Kunstfasern“ genannt

Durch Verstrecken der Fasern um bis zum Fünffachen ihrer ursprünglichen Länge wird die Orientierung der Moleküle stark erhöht, weshalb die Festigkeit der Produkte ein Vielfaches ihrer Ausgangsstoffe beträgt, s. Abbildung 2.9. Das Verstrecken von Fasern eignet sich für unterschiedliche Fasermaterialien nicht gleichermaßen. Hearle macht darauf aufmerksam, dass das Verstrecken von TLCP-Fasern die Festigkeit sogar reduzieren kann und somit nicht in Betracht gezogen werden sollte [74].

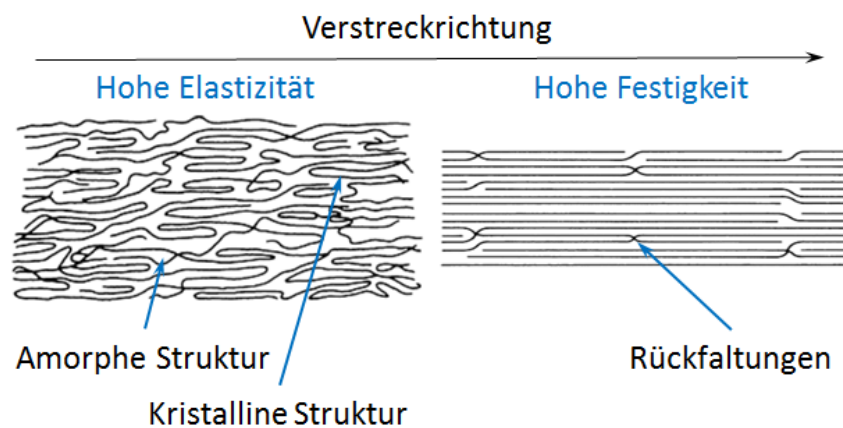


Abbildung 2.9: Molekulare Struktur vor und nach der Verstreckung i.A.a. [73]

2.3.6. Seile aus HM-HT-Fasern

Wie in Tabelle 2.1 auf Seite 15 bereits erwähnt, existieren unter dem Übergriff der HM-HT-Fasern unterschiedliche Fasertypen, die am Markt unter verschiedenen Handelsnamen auftauchen. Unter Vernachlässigung der Gruppe der PBOs²⁷, besser bekannt unter dem Handelsnamen Zylon, die bislang eine eher untergeordnete Rolle spielen, lassen sich die Fasern mit dem höchsten Verbreitungsgrad in die folgenden drei Gruppen gliedern.

Hoch-Modulige Polyethylene

Mit Abstand bekanntester und auch bedeutendster Vertreter dieser Gruppe stellt das von Royal DSM N.V. entwickelte und produzierte Dyneema dar, das zu den UHMW-PE (Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene) zu rechnen ist. Es verfügt über eine sehr hohe Zugfestigkeit von bis zu 4000 N/mm², was sich aus der starken Orientierung der Molekülketten von über 95 % ergibt. Mit einer Dichte von 0,97 g/cm³ ist Dyneema leichter als Wasser und schwimmt somit. Die Faser ist unempfindlich gegen UV-Strahlung, neigt allerdings zum Kriechen. Ihr Schmelzpunkt liegt bei ca. 144°C, laut Hersteller ist ihr Einsatzbereich auf max. 80°C begrenzt. Sie verfügt

²⁷ PBO = Poly(p-phenylen-2,6-benzobisoxazol) ist ein synthetisches Polymer. Bekanntester Markenname ist Zylon

über eine sehr hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht [99]. Ein weiterer Vertreter der hochmodularen Polyethylenfasern ist das weniger verbreitete Spectra von Honeywell²⁸ mit ähnlichen Eigenschaften.

Aktuell bietet Royal DSM N.V. Dyneema in fünf unterschiedlichen Varianten an. SK75 (seit 1996), SK78 (seit 2003), SK90 (seit 2009) DM20 (seit 2012) und SK99 (seit 2013). SK78 verfügt im Vergleich zu SK75 über ein reduziertes und damit optimiertes Kriechverhalten. Speziell für Yachten im High-Performance-Racing entwickelt, verfügt SK90 über eine 15 % höhere Festigkeit und einen um 25 % höheren E-Modul [66]. DM20 wurde zur Anwendung in Mooring-Lines entwickelt und soll kriechfrei sein, allerdings nur beim statischen Einsatz. SK99 verfügt nochmals über eine höhere Festigkeit.

Aromatische Polyamide

Hierbei sind laut Definition [52] mindestens 85 % der Amidgruppen direkt an zwei aromatische Gruppen gebunden. Bekannte Handelsnamen sind Kevlar von DuPont oder Technora von Teijin²⁹. Die Faser verfügt über einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten, wird bei Erwärmung also kürzer. Dazu ist sie bis zu 500°C hitzebeständig, chemisch beständig, jedoch anfällig gegenüber UV-Einstrahlung. Aromatische Polyamide verfügen über eine hohe Festigkeit sowie eine hohe Bruchdehnung [191].

Flüssigkristallpolymere (Thermoplastic liquid crystal polymer)

Dabei handelt es sich um Polymere, die gelöst oder geschmolzen flüssigkristalline Eigenschaften aufweisen. Durch Extrusion werden die Molekülketten stark linear ausgerichtet. Der starke intermolekulare Zusammenhalt führt zu einem hohen Schmelzpunkt von ca. 330°C. Bekanntester Markenname dieser goldenen Faser ist Vectran der Firma Kuraray Co., Ltd.³⁰. TLCP-Fasern haben eine geringe Kriechneigung, sind jedoch empfindlich gegenüber UV-Einstrahlung [1].

2.3.7. Vergleich verschiedener HM-HT-Fasern

Abbildung 2.10 zeigt die Einkaufspreise verschiedener Fasermaterialien bzw. Faserhersteller für Seilproduzenten bei Großmengenabnahme.

²⁸ Honeywell International Inc. Ist ein US-amerikanischer Mischkonzern.

²⁹ Teijin (Aramid), früher bekannt als *Teijin Twaron*, ist ein Konzern der chemischen Industrie mit Sitz im holländischen Arnheim

³⁰ Kuraray Co., Ltd. Ist ein in Tokyo und Osaka, Japan ansässiger Faser und Chemikalienproduzent

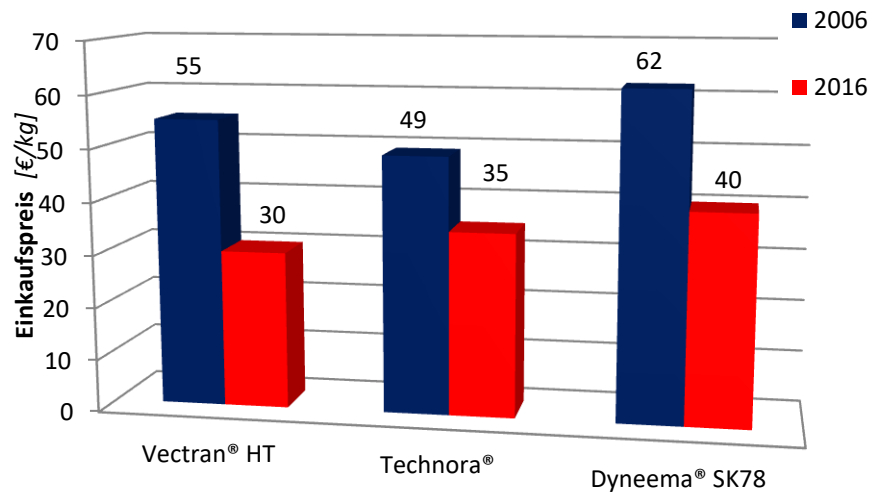


Abbildung 2.10: Faserpreise im Vergleich [65]

Im Rahmen dieser Arbeit werden HM-HT-Faserseile dieser drei Gruppen betrachtet und behandelt werden.

Die wichtigsten Eigenschaften der drei unterschiedlichen Fasertypen sind Tabelle 2.2 zu entnehmen.

	Dyneema®	Technora®	Vectran®
Dichte [g/cm ³]	0,97	1,45	1,40
Schmelztemperatur [°C]	150	500	330
Zugfestigkeit [mN/tex]	3400	2900	3100
Bruchdehnung [%]	3,5	3,5	3,5
E-Modul [N/mm ²]	100 x 10 ³	90 x 10 ³	80 x 10 ³
Kurzzeitig ertragbare Erhitzung [°C]	80	350	200
UV-Resistenz	1	4	4
Resistenz gegenüber Säuren und Basen	1	2	1
Schnittfestigkeit	1	3	2
Externe Abrasion	1	2	1
Kriechverhalten	3	1	1
	1= sehr gut; 2= gut; 3= befriedigend; 4= ausreichend		

Tabelle 2.2: Eigenschaften verschiedener HM-HT-Fasern [4, 108]

Zudem unterscheiden sich die verschiedenen Faserwerkstoffe deutlich in Bezug auf ihren Reibwert. In Abbildung 2.11 sind die Bandbreiten der Gleitreibwerte $\mu_{g,i}$ verschiedener Faserseile auf Stahl dargestellt.

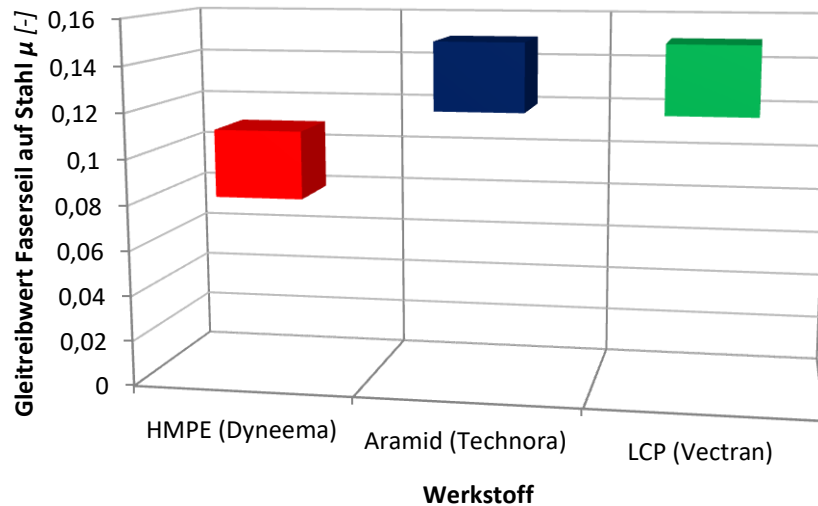


Abbildung 2.11: Gleitreibwerte verschiedener Faserseile auf Stahl

Demnach erstrecken sich die Gleitreibwerte der Faserseile aus Technora und Vectran gleichermaßen über einen Bereich zwischen 0,12 und 0,15. Der Gleitreibwert eines Seils aus Dyneema bewegt sich dagegen in einer Spanne zwischen 0,08 und 0,11, also deutlich unter dem der beiden vorgenannten Werkstoffe. Auch der Reibwert von Stahl auf Stahl liegt bei Vorliegen gehärteter Kontaktpartner und ausreichender Schmierung in diesem Bereich zwischen 0,08 und 0,10 [187]. Nendel und Michael untersuchen in [124] den Reibwert verschiedener Faserseile bzw. verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit des Seilrillendurchmessers. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt Abbildung 2.12. Auch hierbei wird deutlich, dass die Reibwerte der Seile aus Vectran und Technora (PES) deutlich höher liegen als der Reibwert des Seils aus Dyneema. Zudem zeigt sich ein kontinuierlicher Abfall der Reibwerte aller drei Werkstoffe mit Zunahme des Seilrillendurchmessers. Dies ist auf ein Nachlassen der Klemmwirkung der Seile in der Seilrille und auf eine sich verkleinernde Berührfläche zwischen Seil und Scheibe zurückzuführen. Der Zusammenhang zwischen Seilrillendurchmesser, Seildurchmesser und Reibwert verschiedener Faserseile wurde von Michael in [114] systematisch untersucht und analytisch formuliert.

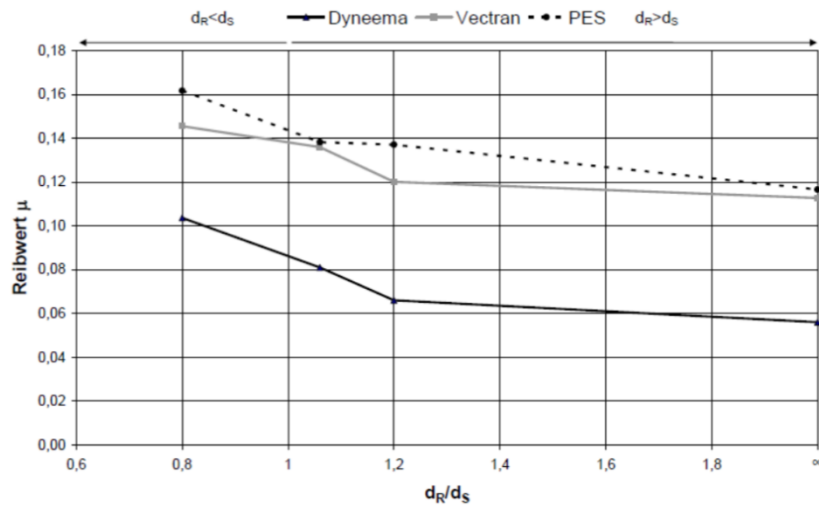


Abbildung 2.12: Reibwert verschiedener Faserseile in Abhängigkeit des Rillendurchmesser / Seildurchmesser- Verhältnisses [124]

Hierbei wurden auch die Haftreibwerte $\mu_{h,i}$ der drei wichtigsten Faserseilwerkstoffe untersucht, vgl. Abbildung 2.13. Dabei zeigte sich, dass die Haftreibwerte von Faserseilen auf Stahl in einem ähnlichen Verhältnis zueinander stehen wie dies bereits bei den Gleitreibwerten der Fall ist.

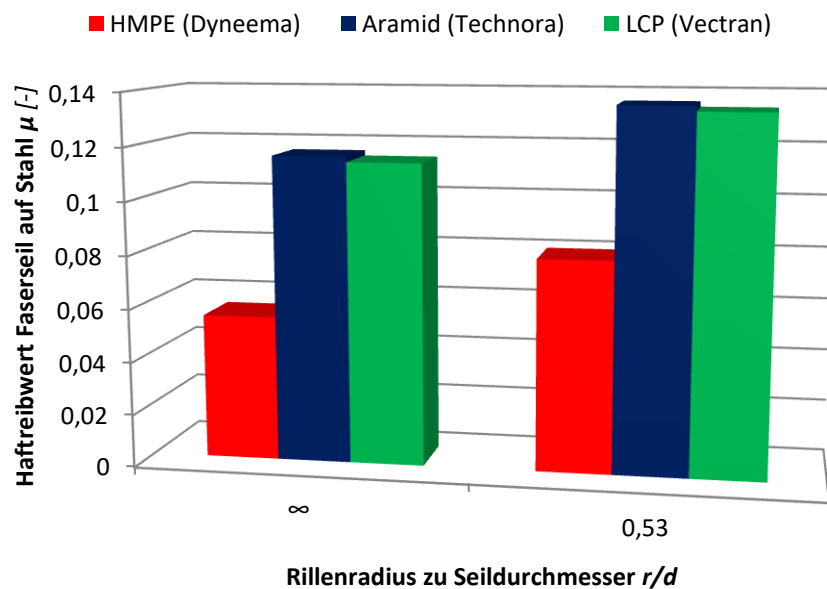


Abbildung 2.13: Haftreibwerte unterschiedlicher Faserseile in Stahlrillen nach [114]

2.4. Lebensdaueruntersuchungen laufender Seile

Seile unterliegen bei Ihrem Lauf über Scheiben und Trommeln einer kombinierten Belastung aus Zug, Biegung und Torsion [175]. Zugleich sind Seile aufgrund Ihrer Belastung, die zu Verschleiß und Ermüdung im Seil führt, nicht dauerhaft, sondern können nur über eine begrenzte Einsatzzeit sicher betrieben werden [181]. Durch die Vielzahl an lokalen Kontaktstellen zwischen den Drähten bzw. Fasern entsteht Verschleiß, Kerbbildung und Reibungswärme, die in Kombination zu einem komplexen Schädigungsverhalten führen und die Lebensdauer der Seile begrenzen [132][146]. Die Lebensdauer der Seile ist auf Grund dieses komplexen Schädigungsverhaltens rein analytisch bislang jedoch nicht abschätzbar. Die unter definierten Parametern ertragbare Anzahl an Biegungen über Scheiben oder Trommeln, die sogenannte Biegewechselzahl³¹ N , muss nach wie vor experimentell ermittelt werden [59]. Die Durchführung solcher Dauerbiegeversuche und die hierfür eingesetzten Maschinen werden in Kapitel 3.3 detailliert beschrieben.

2.4.1. Laufende Stahlseile

Beim Lauf über Scheiben erfahren Drahtseile eine Biegebeanspruchung, die zu Relativverschiebungen der Drähte führen [132][146][169], was wiederum abrasiven Verschleiß an den Drahtoberflächen verursacht [174]. Die hierdurch hervorgerufene stetige Schwächung des Seils führt in Kombination mit äußerlichen Verschleißerscheinungen nach einer gewissen Beanspruchungsdauer zur Überschreitung des betriebssicheren Zustandes und schließlich zum Bruch³² des Seils. Durch den vorzeitigen Bruch einiger Drähte ändern sich die komplexe Spannungs-, Pressungs- und Kontaktverteilung im Drahtseil, was zu einer zusätzlichen Belastung des Drahtseils führen kann. Aufgrund der Komplexität dieser Vorgänge ist eine hinreichend exakte Vorhersage der Spannungsverteilung im Seil über seine komplette Lebensdauer bislang nicht möglich. Nach Feyrer [59] ist jedoch selbst bei Kenntnis der exakten Spannungsverteilung im Drahtseil eine Lebensdauervorhersage allein auf dieser Größe nicht möglich.

Über die Einsatzzeit eines laufenden Stahlseils beginnt ab einem gewissen Zeitpunkt die Entstehung von Drahtbrüchen. Die Anzahl dieser Drahtbrüche steigt mit wachsender Biegewechselzahl N stetig an [59]. Die Lage der Drahtbrüche im Seilquerschnitt hängt dabei von einer Vielzahl an Einflussfaktoren wie beispielsweise der Seilmachart und der Scheibenoberfläche ab. Durch die geschickte Wahl dieser Parameter lässt sich stark Einfluss darauf nehmen, ob die Drahtbruchentstehung

³¹ Die Biegewechselzahl N beschreibt wie oft ein Seil vom geraden Zustand über eine Scheibe und zurück gebogen werden kann. Die Biegewechselzahl beschreibt die für ein Seil wichtige Kenngröße der Biegewechselfestigkeit.

³² Das Versagen eines Seils durch Seilriss wird fachlich als Bruch bezeichnet.

sichtbar an der Seiloberfläche oder visuell nicht erkenntlich im Seilinneren stattfindet. Nach Jahne [89] führen einzelne Drahtbrüche zu einer lokalen Umverteilung der Last, was wiederum zu einer höheren Belastung der noch intakten, benachbarten Drähte führt. Da diese nun höher beanspruchten Drähte zuvor eine ähnlich hohe Beanspruchung wie die bereits gebrochenen Drähte erfahren haben, tritt ein vorzeitiges Versagen der verbleibenden Drähte ein. Die Drahtbruchentwicklung ist somit stark ansteigend und folgt einem exponentiellen Verlauf [59]. Die Spannungszustände, die in Drahtseilen beim Lauf über Scheiben entstehen, wurden von Schiffner [146] und Wang [174] an der Universität Stuttgart analytisch und experimentell untersucht. Im Folgenden wurden die Spannungen über den kompletten Seilquerschnitt mit Hilfe der FEM³³ näher betrachtet [183][193]. In diesen Arbeiten wurde die Spannungsverteilung in zugschwell-belasteten³⁴ Drahtseilen untersucht. Zudem wird in [193] beschrieben, dass zusätzliche experimentelle Analysen zur Verifikation des Berechnungsmodells notwendig sind.

Einen typischen, experimentell bestimmten Verlauf der Biegewechselzahlen eines Stahldrahtseils zeigt Abbildung 2.14.

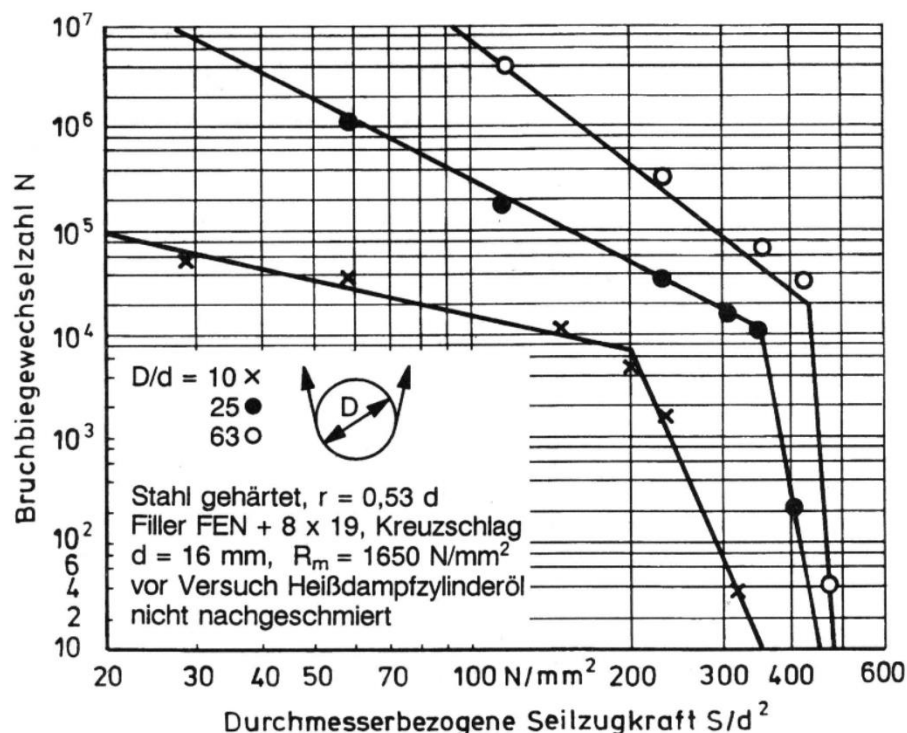


Abbildung 2.14: Bruchbiegewechselzahlen eines Drahtseils
16 8x19F-NFC 1650 U sZ [58]

³³ FEM= Finite Elemente Methode, eine numerische Näherungsmethode zur Lösung komplexer Differentialgleichungssysteme

³⁴ Unter Zugschwellbelastung versteht man eine über die Zeit variable Zugbelastung eines Seils [56]

Auffällig ist dabei, dass die drei Kurven der drei verschiedenen Durchmesser-Verhältnisse jeweils durch einen starken Knick charakterisiert werden. An diesem Punkt, dem sog. Sprung- oder Donandtpunkt³⁵, wird die Fließgrenze des Drahtes überschritten und das Versagensverhalten geht vom Dauerbruch in einen Gewaltbruch über [138]. Nach Feyrer lässt sich die Donandtkraft für Einfachbiegung nach

$$S_D = q_0 * F_{min} + q_1 * \frac{F_{min}}{\frac{D}{d}} \quad (2.4)$$

berechnen [61], wobei die Konstanten q_0 und q_1 je nach Seilkonstruktion gewählt werden müssen und für die wichtigsten Konstruktionen in der Literatur, beispielsweise in [61], nachgeschlagen werden können.

Auf Basis analytischer Spannungsberechnungen wurden nach Feyrer verschiedene Ansätze zur Lebensdauerberechnung laufender Stahldrahtseile, wie beispielsweise durch Pantucek [131], aufgezeigt. Nach Feyrer [59] reicht jedoch die alleinige Kenntnis über die Drahtspannungen und Zeitfestigkeiten der Drähte für eine Voraussage der Seillebensdauer nicht aus. So formulierte Feyrer auf Grundlage unzähliger Versuchsreihen seine weltweit anerkannte und verbreitete, im Sprachgebrauch nach ihm benannte Lebensdauerformel³⁶ [59] in Abhängigkeit der wichtigsten Seiltriebparameter D/d , S/d^2 und l sowie R_0 ³⁷.

Der Einfluss des Seildurchmessers d auf die Biegewechselzahl N wurde in den vergangenen Jahrzehnten bereits weitgehend untersucht [24][61]. Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass die Lebensdauer von Stahldrahtseilen bei größer werdendem Seildurchmesser und Beibehaltung der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 und des D/d -Verhältnisses, stetig abnimmt. Dies kann damit begründet werden, dass mit wachsendem Seildurchmesser die Drahtquerschnittsflächen quadratisch zunehmen, die Berührflächen benachbarter Drähte jedoch nur unwesentlich wachsen. Folglich resultiert eine höhere Flächenpressung zwischen den Drähten, die zu einem vorzeitigen Versagen der Drähte führt. Zudem beschreibt Ziegler in [193], dass die in Drahtumlaufbiegeversuchen untersuchte Schwingfestigkeit von Stahldrähten bei zunehmendem Drahtdurchmesser abnimmt.

³⁵ H. Donandt entdeckte seinerzeit die „Sprungspannung“ bei Drähten. Feyrer erforschte darauf aufbauend den Sprungpunkt bei Drahtseilen und benannte die am Sprungpunkt wirkende Kraft zu Ehren seines Doktorvaters als „Donandtkraft“

³⁶ Die „Feyrer“-Formel ist eine Gleichung zur Berechnung der Seillebensdauer laufender Drahtseile. Neben ihr existieren weitere Berechnungsansätze wie in [90] beschrieben.

³⁷ R_0 bezeichnet die Festigkeitsklasse des Seiles in $[N/mm^2]$

Der Einfluss der Biegelänge l , also der Länge, die über Scheiben läuft, wurde unter anderem von Müller untersucht [123]. Danach bleibt die Bruchbiegewechselzahl im Biegeversuch unter Variation der Biegelänge bis zur Unterschreitung der einfachen Schlaglänge des Seils praktisch konstant. Erst bei sehr kurzen Biegelängen, die kürzer sind als die Schlaglänge des Seils, steigt die Lebensdauer an. Müller begründet dies damit, dass nicht alle Litzen die wechselnde Biegebeanspruchung erfahren. Nach Feyrer [57] nimmt die Lebensdauer jedoch auch bei einer Zunahme der Biegelänge ab, was er statistisch begründet: Je größer die Beanspruchungszone ist, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen im betreffenden Seilstück, was wiederum zu einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit des Seils führt.

Durch die Auswertung weiterer Versuche, vor allem in Bezug auf Seildurchmesser und Biegelänge und die damit verbundene Erlangung weiterer Erkenntnisse überarbeitete Feyrer seine Lebensdauerformel zu folgender, weiterentwickelten Formel [60]:

$$\begin{aligned} \lg N = a_0 + \left(a_1 + a_3 \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \lg \frac{R_0}{1770} \right) \\ + a_2 \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_l \end{aligned} \quad (2.5)$$

mit

$$f_d = \frac{0,52}{-0,48 + \left(\frac{d}{16} \right)^3} \quad (2.6)$$

und

$$f_l = \frac{1,54}{2,54 - \left(\frac{l}{57,5} - 2,5 \right)^{-0,14}} \quad (2.7)$$

Ohne Berechnung einzelner Werte mit Gleichung (2.5) kann grundlegend festgehalten werden, dass die Seillebensdauer mit zunehmender Seilzugkraft S , bzw. zunehmender bezogener Seilzugkraft S/d^2 sowie mit abnehmendem Verhältnis zwischen Seilscheibe und Seildurchmesser D/d stetig abnimmt. Das Maß der Abnahme hängt dabei von weiteren Parametern, wie beispielsweise der Seilmachart ab.

Die mit Gleichung (2.5) berechneten Biegewechselzahlen gelten jedoch ausschließlich für die in [59] aufgeführten, idealen Bedingungen. Abweichende Bedingungen können mit Hilfe der Korrekturfaktoren f_{Ni} und Gleichung (2.8) berücksichtigt werden. Es gilt:

$$N_{korr} = N * f_{N1} * f_{N2} * f_{N3} * f_{N4} \quad (2.8)$$

Korrekturfaktoren f_{Ni} , teilweise auch Biegewechselfaktoren genannt, existieren nur für einige Einflussfaktoren und haben, wie aus Gleichung (2.8) ersichtlich, direkte Auswirkung auf die korrigierte Biegewechselzahl N_{korr} .

Der Faktor f_{N1} berücksichtigt den Schmierzustand des Seils, wobei nach Feyrer für gut geschmierte Seile der Faktor mit 1, für ungeschmierte Seile mit 0,2 zu setzen ist [59]. Der Faktor f_{N2} berücksichtigt die Seilkonstruktion. Mit dem Faktor f_{N3} fließt ein, welche Rillenform der Seilscheibe vorliegt. Zur Bestimmung der Faktoren für Rundrillen wurden in [59] unterschiedliche Untersuchungen von Wolf [190], Woernle [189], Müller [122], Shitkow/Pospechow [151] und Unterberg [160] zusammengefasst und ausgewertet. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

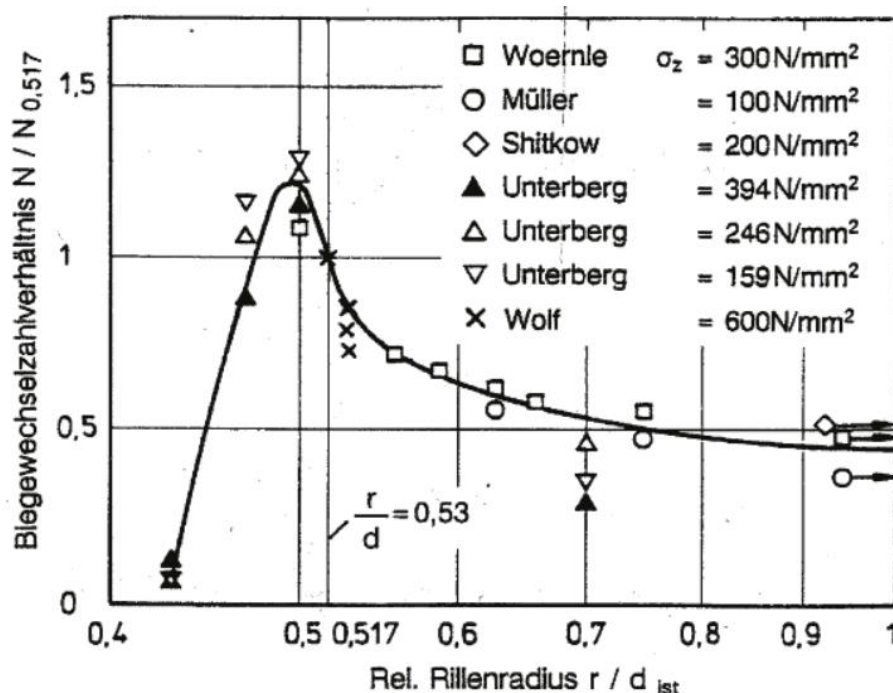


Abbildung 2.15: Einfluss des Rundrillenübermaßes auf die Bruchbiegewechselzahl [59]

Es zeigt sich, dass ein Optimum an Lebensdauer genau dann erreicht wird, wenn der Rillengrundradius r optimal zum Seildurchmesser d passt, das r/d -Verhältnis also

genau 0,5 beträgt. Auf Grund des zulässigen Seildurchmesser-Übermaßes von bis zu 5 %³⁸ wird in DIN EN 12385-4 [33] jedoch ein r/d -Verhältnis von 0,525 bis 0,53 empfohlen. Andererseits stellt sich bei exakt passendem Rillengrundradius von $r/d=0,5$ im ungünstigen Fall in Kombination mit einem Seil mit $d_{\text{ist}}=1,05 \cdot d_n$ ein Verhältnis von $r/d_{\text{ist}}=0,476$ ein. Nach Unterberg tritt hierbei noch keine massive Einbuße an Lebensdauer ein [160].

Formrillen finden nur in Anwendungen Verwendung, bei denen die Treibfähigkeit über einen begrenzten Umschlingungswinkel aufgebracht werden muss. Die in [59] hinterlegten f_{N3} -Faktoren für Formrillen stammen aus Forschungsergebnissen von Holeschak [82]. Zusammenfassen lässt sich, dass die Schädigung des Seils beim Lauf über Sitz- oder Keilrillen³⁹ dramatisch höher ist als beim Lauf über Rundrillen.

Die seitliche Ablenkung eines Seils führt zu einer zusätzlichen Beanspruchung und zu einer Schädigung des Seils [31]. Diesem lebensdauerermindernden Einfluss wird mittels des Korrekturfaktors f_{N4} Rechnung getragen. Der quantitative Einfluss des sogenannten Schrägzugs wurde in [150] grundlegend untersucht.

Weitere Einflussgrößen auf die Lebensdauer laufender Seile werden in den folgenden Kapiteln an passender Stelle detailliert beschrieben oder sind für das Ergebnis dieser Arbeit nicht von Bedeutung.

Zur Bestimmung der Seillebensdauer in Seiltrieben wird zunächst der Seiltrieb analysiert und das höchst beanspruchte Seilstück identifiziert. Dieses wird zur Berechnung herangezogen. Für Beanspruchungselemente w_i , die zusätzlich zur Einfachbiegung vorliegen, wie beispielsweise Gegenbiegungen oder Biegungen mit Zugkraftänderung, werden ebenfalls korrigierte Biegewechselzahlen $N_{\text{kor},j}$ ermittelt. Die Einzelbeanspruchungen können entsprechend ihrem Anteil mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner [117][130] zusammengefasst werden. Demnach gilt:

$$\frac{1}{Z} = \sum_{i=1, j=1}^{i,j} \frac{w_i}{N_{\text{kor},j}} \quad (2.9)$$

Aus Gleichung (2.9) ergibt sich die Spielzahl Z des Seiltriebs.

Die Kriterien zum Ablegen von Stahldrahtseilen sind klar definiert und beispielsweise in ISO 4309 [87] dokumentiert. Die lange Entwicklungsgeschichte der Normen über

³⁸ Die Grenzabweichung in Prozent des Seildurchmessers richtet sich nach DIN EN 12385-4 [33] Tabelle 3 nach dem Nenndurchmesser des Drahtseils und liegt bei Drahtseilen mit $d_n = 8$ mm und größer zwischen 0 % und +5 %, bei kleineren Seilen stufenweise zwischen 0 % und +6 % bis 0 % und +8 %.

³⁹ Sitz- und Keilrillen sind spezielle Arten an Formrillen

die Seilablegereife wird beispielsweise von Beck in [10] beschrieben. Beim korrekten Umgang mit Stahldrahtseilen und deren Betrieb in Hebezeugen und bei ordnungsgemäßer Wartung ist die äußerliche Anzahl an sichtbaren Drahtbrüchen das mit Abstand wichtigste Kriterium zur Erkennung der Ablegereife [181]. Die hierfür notwendige visuelle Prüfung ist bei kurzen Seilen in der Regel problemlos anwendbar. Bei sicherheitstechnisch hohen Anforderungen, insbesondere von sehr langen Seilen, wie sie beispielsweise bei Seilbahnen oder Großkränen vorkommen, bedarf es einer messtechnischen Methode den inneren und äußeren Seilzustand vor allem im Hinblick auf Drahtbrüche, mit angemessenem Zeitaufwand zu erfassen. Hier hat sich seit vielen Jahrzehnten die Methode der magnetinduktiven Seilprüfung als zuverlässig und praktikabel zugleich etabliert [181].

2.4.2. Laufende Faserseile

Ebenso wie Stahlseile werden auch Faserseile beim Lauf über Scheiben einer spezifischen, kombinierten Beanspruchung unterzogen, die ihre Lebensdauer begrenzt [108, 152]. Die Verschleißvorgänge, die dabei im Faserseil ablaufen, sind im folgenden Kapitel 2.4.3 „Verschleißverhalten von Faserseilen“ detailliert beschrieben.

Im Gegensatz zu Stahldrahtseilen, bei denen verschiedene Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Seillebensdauer vorliegen [59, 90], existiert für die Lebensdauerberechnung von laufenden Faserseilen bislang keinerlei allgemeingültige Berechnungsmethode. Dies ist vor Allem auf den bislang noch unzureichenden Forschungsstand auf dem relativ jungen Forschungsgebiet der HM-HT-Seile zurückzuführen. Der Untersuchungsstand der wichtigsten Seil- und Seiltriebparameter mit Einfluss auf die Seillebensdauer von laufenden Stahl- und Faserseilen ist in Abbildung 2.16 dargestellt.

Stahlseile	Parameter mit Einfluss auf die Seillebensdauer	Faserseile
	Seilkonstruktion	
	Seileinlage	
	Seilzugkraft	
	Seildurchmesser	
	Scheibendurchmesser	
	Schrägzug	
	Schlaglänge	
	Umschlingung	
	Festigkeit	
	Biegelänge	
	Art der Biegung	
	Seilwerkstoff	
	Rillenformen	
	Schmierung	
	Geschwindigkeit	
	Beschleunigung	

Abbildung 2.16: Untersuchungsstand laufender Stahldraht und HM-HT-Faserseile in Anlehnung an [181]

In der Vergangenheit wurde bereits an einzelnen Untersuchungen punktuell die prinzipielle Machbarkeit der Anwendung des Berechnungsansatzes nach Feyrer auf laufende Faserseile aufgezeigt.

Feyrer und Vogel berichten in [63] von Dauerbiegeversuchen an hochfesten Faserseilen mit einem mittleren Durchmesser von $d_m = 12,5$ mm. Die verwendeten Seile bestehen aus einer Mischung der Werkstoffe Polyester, ENKA⁴⁰, Polyethylen, Dyneema SK60 und ENKA 855 T und werden in den Versuchen über Prüfscheiben mit $D/d = 12,5, 25$ und 63 gebogen. Mit Hilfe einer improvisierten Klemmenkombination aus je 3 Aluminiumpressklemmen nach DIN 3093⁴¹ und

⁴⁰ ENKA bezeichnet ein zellulosisches Endlos Garn

⁴¹ DIN 3093 ist heute durch DIN EN 13411-3 [43] ersetzt

Schraubklemmen nach DIN 1142⁴² wird ein Seilstück mit Schlaufen versehen und einer statischen Zugprüfung unterzogen. Die ergebende Seilbruchkraft beträgt $F_w = 53$ kN. Da der Bruch bei den eingesetzten Klemmverbindungen stets an der Endverbindung eintritt bezeichnet dieser Wert jedoch lediglich die Bruchkraft der Endverbindung selbst und nicht die des Seils, welche vermutlich deutlich höher liegen sollte. Auf Grundlage dieser Bruchkraft wird die durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2 zwischen $48,6$ N/mm² und $312,5$ N/mm² systematisch variiert, wobei die höheren Lasten bereits über der Donandkraft S_D liegen. Bei der Durchführung der Versuche wird darauf geachtet, dass die Temperatur im Faserseil nicht über $T_{Grenz} = 40$ °C steigt, weshalb die Versuche in einem sehr breiten Frequenzspektrum zwischen $f_{min} = 5$ 1/min und $f_{max} = 50$ 1/min durchgeführt werden. Die ermittelten Biegewechselzahlen werden mittels des Ansatzes der Lebensdauerformel nach Feyrer und Regressionsrechnung zusammengefasst sowie die Standardabweichung zu $lg s = 0,12$ und das Bestimmtheitsmaß zu $B = r^2 = 0,991$ ermittelt. Die sehr kleine Standardabweichung $lg s$ und das hohe Bestimmtheitsmaß B bescheinigen eine sehr gute Annäherung der ermittelten Gleichung an die aus den Biegeversuchen ermittelten Ergebnisse. Die prinzipielle Anwendbarkeit des Ansatzes zur Berechnung der Seillebensdauer nach Feyrer mittels Regressionsrechnung wurde somit belegt. Im weiteren Verlauf der Veröffentlichung [63] wird der Ansatz zur Heranziehung des Kriteriums Seildurchmesser zur Bestimmung der Ablegereife vorgestellt, weiter verfolgt und die Empfehlung gegeben einen höheren Anteil an hochfesten Fasern im Seil einzusetzen.

Über „Dauerbiegeversuche an gedrehten und geflochtenen Faserseilen aus hochfesten Polyethylenfasern“ wird in [168] berichtet. Vogel untersucht dabei sowohl gedrehte als auch geflochtene Faserseile aus Dyneema SK 60 und Dyneema SK 75 mit einem Seilnennendurchmesser $d_n = 8$ mm. Da in typischen Anwendungen hochfester Faserseile bereits sehr kleine Scheibendurchmesser D eingesetzt werden, wählt Vogel ein extrem kleines Verhältnis von $D/d = 10$ für seine Versuche. Auch in dieser Untersuchung wird die Biegefrequenz individuell so eingestellt, dass die Seilgrenztemperatur $T_{Grenz} = 40$ °C nicht überschritten wird. Die Ergebnisse werden mittels Regressionsrechnung und Lebensdauerberechnungsmodell nach Feyrer zusammengefasst und ausgewertet. Vogel stellt dabei zudem zwei weitere Ansätze zu Berechnungsmodellen auf. Die erzielten Lebensdauern der geflochtenen und der gedrehten Seile befinden sich demnach in ähnlichen Bereichen, was mit der geringen Faser-Faser-Reibung begründet wird [168].

Allerdings fehlen den vorgenannten Untersuchungen teilweise Angaben zu den Prüfbedingungen wie beispielsweise Biegelänge und Geschwindigkeit oder die

⁴² DIN 1142 ist heute durch DIN EN 13411-5 [42] ersetzt

Versuche wurden mit nicht vergleichbaren Parametern wie beispielsweise verschiedenen Materialien, Macharten oder Rillenformen durchgeführt.

Heinze beschreibt in „Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus Polymerfasern“ [78] seinen systematischen Ansatz zu grundlegenden Untersuchungen an hochfesten Fasern, Garnen und Seilen. Hierzu stellt er eigene Geflechte her, wodurch einzelne Parameter wie Thermofixierung, Beschichtung oder die Wahl des Flechtwinkels individuell variiert werden können. Zur besseren Dokumentation der Seilparameter und damit zur besseren Vergleichbarkeit wird ein neues Bezeichnungssystem für Faserseile vorgeschlagen. Neben einer Vielzahl an Versuchen zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten werden auch Dauerbiegeversuche an HM-HT-Faserseilen durchgeführt. Dabei wird in Anlehnung an Vogel [168] auf eine maximale Oberflächentemperatur $T_{Grenz} = 40 \text{ °C}$ geachtet. Hierfür wird für die Versuche mit gleichsinniger Biegung eine konstante Biegegeschwindigkeit von $v_{eff} = v_{max}/\sqrt{2} \approx 10 \frac{m}{min} \approx 0,167 m/sec$ festgelegt. Die Effektivgeschwindigkeit v_{eff} unterscheidet sich dabei auf Grund des sinusförmigen Bewegungsablaufs von der Maximalgeschwindigkeit v_{max} . Hieraus ergibt sich eine relativ geringe Biegefrequenz von $f_B = 12 \text{ 1/min}$, was auf die Verwendung von Faserseilen mit einem Nenndurchmesser von $d_n = 6 \text{ mm}$ in Kombination mit einem definierten Seilhub von $h = 360 \text{ mm}$ und der definierten Grenztemperatur an der Seiloberfläche von $T_{Grenz} = 40 \text{ °C}$ zurück zu führen ist.

In „Dimensionierung je nach Einsatzfall“ [77] berichtet Heinze über eine Untersuchung bezüglich der Biegegeschwindigkeit von hochfesten Faserseilen mit einem Durchmesser von $d = 10,54 \text{ mm}$. Hierbei wird die Geschwindigkeit in den sehr niedrigen Grenzen zwischen $v_{min} \approx 3 \text{ m/min}$ ($= 0,05 \text{ m/s}$) und $v_{max} \approx 36 \text{ m/min}$ ($= 0,60 \text{ m/s}$) variiert. Diese sehr langsamen Geschwindigkeiten können als Laborwerte angesehen werden, da reale Einsatzfälle laufender Seile, speziell laufender Faserseile, deutlich höhere Laufgeschwindigkeiten erfordern. Bezogen auf eine Biegewechselzahl von $N_{14,4} = 14 \text{ 1/min}$ ergeben sich bei der Untersuchung sowohl Lebensdauerzu- als auch -abnahmen, wobei die ertragenen Biegewechselzahlen ober und unter einem Optimum von $v \approx 20 \text{ m/min}$ jeweils abfallen. Heinze begründet die Abnahme der Seillebensdauer bei höheren Biegegeschwindigkeiten mit einer höheren Reibarbeit, die im Seil verrichtet werden muss. Bei niedrigeren Biegegeschwindigkeiten wird die Lebensdauerabnahme mit Kriechvorgängen im Faserseil begründet, die dann auf Grund längerer Betriebszeiten mehr an Einfluss gewinnen [77]. Dies führt zu Deformation des Seils in der Seilscheibe und zu einem ungleichmäßigeren Tragverhalten im Seil, was wiederum zum seilschädigenden Aufschieben von Fasern führen kann. Untersuchungen mit ähnlich kleinen Biegegeschwindigkeiten werden von Mammitzsch durchgeführt [106].

Gleichzeitig wird darin empfohlen weiterführende Biegeversuche an hochfesten Faserseilen unter Vergrößerung der Biegelänge, der Seilgeschwindigkeiten und der Biegefrequenzen durchzuführen.

Einen Überblick über die wichtigsten Systemparameter im Dauerbiegeversuch und deren Forschungsstand in Anlehnung an [77] gibt Abbildung 2.17.

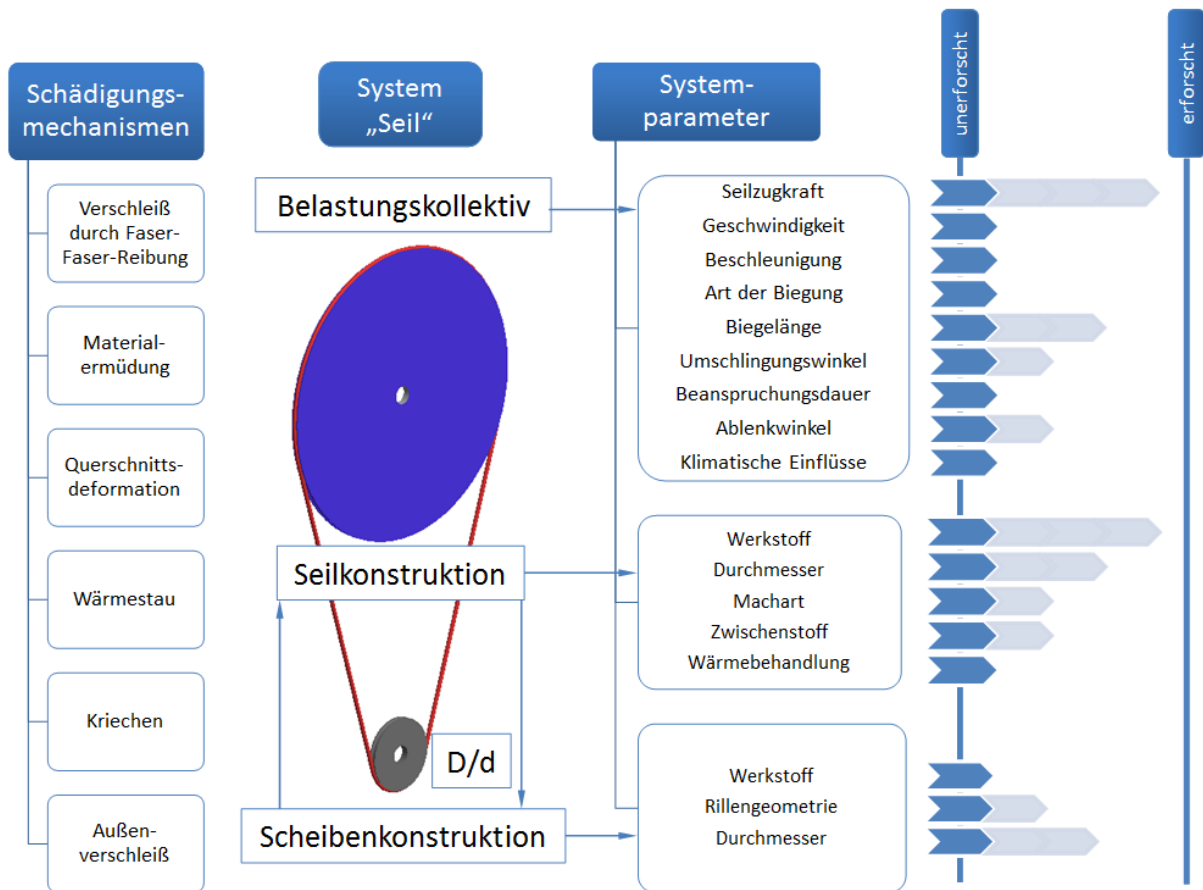


Abbildung 2.17: Schädigungsmechanismen und Systemparameter laufender, hochmodularer Faserseile im Dauerbiegeversuch nach [77]

2.4.3. Verschleißverhalten von Faserseilen

Wird ein Seil des Durchmessers d über eine Scheibe mit Durchmesser D gebogen, so stellt sich unter Vernachlässigung der Wendungen der Fasern nach Verreet ein Zustand ein, bei dem sowohl eine Druck- wie auch eine Zug-Zone vorliegt [165].

Durch die Wendung, die beim Flechten bzw. Schlagen von Seilen entsteht, liegen die Fasern gleichmäßig in der Zug- und Druckzone des Seils verteilt, was einen Ausgleich der Spannungen und Dehnungen unter den einzelnen Fasern bewirkt. Hierzu finden Relativbewegungen zwischen den Fasern und Garnen statt, die zu abrasivem Verschleiß der einzelnen Fasern im Seilinneren führen und somit die

Lebensdauer laufender Faserseile begrenzen [46]. Dieser Verschleiß erstreckt sich über die Einsatzzeit des Seils und ändert somit die mechanischen Eigenschaften des Seils über der Seillebensdauer. Durch die anwachsende Schädigung der Fasern nimmt die Belastung des noch tragenden Seilquerschnitts kontinuierlich bis zum Bruch zu. Auf Grund der geringen Quersteifigkeit passen sich Faserseile beim Lauf über Scheiben der Rillenform an, was bei einem üblicherweise vorhandenen Rundrillenübermaß $r > d/2$ zu einer Ovalisierung des Seils in der Rille führt [116]. Durch die nun größere Berührfläche des Seils mit der Scheibe werden somit zwar die Pressungen im Rillengrund stark vermindert, die Struktur des Faserseils jedoch gestört. Die Folgen sind Klemmungen und Verfestigungen von Litzen, was wiederum die zum Spannungsausgleich nötigen Relativbewegungen im Faserseil verhindert [78]. Es kommt zu Aufschiebungen einzelner Fasern und ganzer Faserbündel. Die Fasern knicken aus und werden hierbei mechanisch beschädigt. Kriechempfindliche Fasern sind hierfür über die Einsatzzeit besonders gefährdet, da die Fasern aufgrund der Querpressung im Faserseil lokal verjüngt werden und somit verstärkt zum Ausknicken neigen. Daraus leitet sich ab, dass eine starke Ovalisierung des Seils in der Rille zur Steigerung der Seillebensdauer möglichst vermieden werden sollte. Dieser Forderung lässt sich durch Wahl eines optimalen r/d -Verhältnisses, d.h. durch Auswahl eines möglich passenden Rillengrundradius r , zumindest teilweise entgegenkommen.

2.4.4. Seilschlupf und Verschleiß laufender Seile

Je nach Drehrichtung der Scheibe gilt das Prinzip der getriebenen oder der treibenden Scheibe. In jedem Fall erfolgt die Kraftübertragung zwischen den beiden Seiltriebkomponenten reibschlüssig. Die Schadensbildung im Stahlseil erfolgt dabei nicht nur auf Grund von Zug-, Biege- und Pressungsbeanspruchung sondern auch in Folge zusätzlicher Verschleißvorgänge in der Kontaktzone zwischen Scheibe und Seil [11]. Ursächlich hierfür ist unter anderem der sogenannte Seilschlupf, der sich nach Molkow⁴³ [119] wie folgt aufteilt:

- Der Dehnungsschlupf beschreibt den Ausgleich der Wegdifferenz, die durch unterschiedliche Dehnungen der beiden Seilstränge (in Folge unterschiedlicher Seilzugkräfte) entsteht. Dehnungsschlupf wird auch als „Seilschleichung“ bezeichnet [11].
- Durch unterschiedliche Eindringtiefen des Seils in die Seilrille läuft das Seil auf unterschiedlichen Wirkdurchmessern. Dies wird als scheinbarer Laufradiuschlupf bezeichnet, da keine tangentielle Relativbewegung

⁴³ Molkow beschreibt in seiner Arbeit [119] den Schlupf zwischen Treibscheibe und Seil. Auf Grund der Umkehrbarkeit der Verhältnisse ist die Anwendung seiner Beschreibung auch für getriebene Scheiben zulässig.

zwischen Scheibe und Seil entsteht. Er tritt vorwiegend bei Keil- oder Sitzrillen auf, existiert jedoch auch bei Rundrillen. Bereits Donandt [47] stellte fest, dass der Laufradiuschlupf bei getriebener Scheibe höher ist als bei treibender Scheibe, was auf die niedrige Seilzugkraft beim Auflaufen des Seils auf die Scheibe zurückgeführt werden kann. Beim Umlauf des Seils um die Scheibe erhöht sich die Zugkraft stetig, was zu einer Abnahme des Wirkdurchmessers führt.

- Gleitschlupf bezeichnet die wichtigste Art von Schlupf, die durch Gleiten des Seils über die komplette Auflagefläche entsteht. In diesem Fall ist der Haftreibungskoeffizient zwischen Scheibe und Seil überschritten.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass Molcow seine Ergebnisse ebenfalls durch experimentelle Untersuchungen an einem eigenkonstruierten, aufwändigen Prüfstand erlangte [119]. Alle Versuche wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 0,8 \text{ m/s}$ durchgeführt, wobei Einflüsse durch dynamische Beschleunigung, Geschwindigkeit, Langzeitwirkung oder Verschleißverhalten der Stahlseile nicht berücksichtigt wurden.

Briem stellt dar, wie sich der einseitige sowie der gleichmäßig umseitige Verschleiß an der Oberfläche bzw. am Umfang von Stahldrahtseilen auf die Minderung des tragenden Seilquerschnitts auswirkt [14, 15]. Dies führt zu einer erhöhten Zug- und Biegebeanspruchung der einzelnen Drähte und damit zu einem vorzeitigen Ausfall des Seils.

Wie bereits erwähnt ist das Verschleißverhalten von laufenden Faserseilen durch Abrasion der Fasern und Garne geprägt. Nach Berner ist der Umfang des Verschleißes an Stahlseilen u.a. von der verrichteten Reibarbeit W_{Rb} abhängig [11], die sich aus der Reibungskraft F_{Rb} und dem Reibweg s zusammensetzt. Dies kann analog auf Faserseile übertragen werden. Demnach gilt

$$W_{Rb} = F_{Rb} * s \quad (2.10)$$

Wobei sich der Reibweg s aus den einzelnen Komponenten aus Laufradiuschlupf in Längs- und Radialrichtung, Dehnschlupf und Gleitschlupf zusammensetzt.

$$s = 2\vec{s}_R + \vec{s}_L + \vec{s}_D + \vec{s}_G \quad (2.11)$$

Hieraus wird deutlich, wie komplex sich die Zusammenhänge beim Seilverschleiß in der beschriebenen Anwendung verhalten und, dass hierbei keine analytische Untersuchung möglich ist. Die Untersuchung des Seilverschleißes in Seiltrieben kann somit nur experimentell erfolgen.

2.4.5. Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer

Feyrer beschreibt in [59], dass der Beschleunigung eines Stahlseils bei der Lebensdauerberechnung Rechnung getragen werden muss. Hierfür führt er den Faktor f_{S4} ein, der für relativ niedrige Lastgeschwindigkeiten zwischen 0,3 und 1,6 m/s eine Lebensdauerminde rung von 5 bis 20 % vorsieht. Bei diesen Werten handelt es sich ausdrücklich um Schätzwerte. Zudem vermischt Feyrer dabei die separat zu betrachtenden Einflüsse von Beschleunigung und Laufgeschwindigkeit gänzlich und nimmt lediglich an, dass sich die Seilkraft durch den Beschleunigungsvorgang erhöht, was zu einer niedrigeren Lebensdauer führt. Die Beschreibung solcher dynamischer Seilkräfte beschreibt Heptner in [79]. Onur variiert in [129] die Geschwindigkeiten bei Dauerbiegeversuchen an drehungsfreien und nicht-drehungsfreien Stahldrahtseilen, wobei nur relativ langsame Geschwindigkeiten abgedeckt werden. Hierbei kann er einen Zusammenhang der Biegefrequenz und der Seillebensdauer erkennen, die er auf den Austritt von Seilschmierstoff zurückführt.

In modernen Seiltrieben werden die o.g. Grenzen jedoch bei weitem überschritten. So fahren die Aufzüge des „Guangzhou CTF Finance Center“ in China mit bis zu 20 m/s in das 95. Stockwerk des 530 m hohen Wolkenkratzers [76]. Verreet, Teissier et al. beschreiben in [6] die Entwicklung eines seilgetriebenen Katapults für eine Attraktion im Euro Disney Land, Paris. Auf Grund der sehr kurzen Zykluszeit und der hohen Dynamik des Seiltriebs im „Space Mountain“ bezeichnen die Autoren die Attraktion provokant als eine „120 Millionen Dollar teure Seilprüfmaschine“. Das Seil beschleunigt den Zug bei jedem Abschuss in knapp 2 Sekunden unter einer Beschleunigung von 1,3 g (ca. 12,8 m/s²) auf über 50 km/h (ca. 14 m/s). Nur durch regelmäßiges Versetzen des Seils und damit der höchstbeanspruchten Stelle wird eine Seillebensdauer von 120.000 Zyklen erreicht, was einer Einsatzdauer von ca. 3 Monaten entspricht.

Beim Einsatz von Kunstfaserseilen geht die Beschreibung dynamischer Vorgänge oft mit der Entstehung von Wärme im Seilinneren einher. Bosman untersucht in [12] den Zusammenhang zwischen der dynamischen Zugschwellbeanspruchung von Mooringlines aus Polyester und der wärmeergebenden Hysterese im Seilinneren im Hinblick auf die Seillebensdauer. Demnach sind die Hysterese und der Verschleiß im Seil auf die dynamischen Reibungsvorgänge zwischen den Filamenten, Garnen und Litzen zurückzuführen.

Untersuchungen zum Einfluss der Laufgeschwindigkeit von Garnen werden in [78] vorgestellt. Hierbei werden Garne aus Dyneema SK75, Technora T221 und

Vectran HT in einem Garn-Abrasionsprüfstand ähnlich ASTM⁴⁴ D 6661 [7] untersucht, vgl. Abbildung 2.16 [157]. Hieraus ergibt sich, dass die Lebensdauer der Garne bei höheren Geschwindigkeiten teils deutlich zunimmt. Dies wird auf die veränderten Reibverhältnisse bei höheren Geschwindigkeiten und damit dem Übergang von Haft- zu Gleitreibung erklärt. Allerdings ist zu beachten, dass die Versuche lediglich mit Garnen und nicht mit Seilen durchgeführt wurden. Zudem wurden nur relativ geringe Geschwindigkeiten zwischen 1,1 und 6,6 m/min (0,02 – 0,11 m/s) bei sehr geringen Belastungen durchgeführt. Die Geschwindigkeit in den Versuchen war dabei nicht konstant, sondern wurde sinusförmig über einen Kurbeltrieb aufgebracht. Demnach durchliefen die Garne beim Test ebenfalls alle Geschwindigkeiten zwischen 0 m/s und der maximalen Prüfgeschwindigkeit v_{max} . Die Übertragbarkeit dieser überraschenden Ergebnisse auf reale Seiltriebe ist somit nicht unbedingt gegeben.

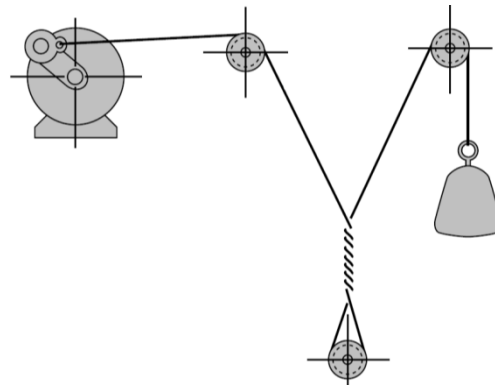


Abbildung 2.18: Garn-Abasionstest nach ASTM D 6661 [157]

2.5. Ablegereifeerkennung

Als Ablegereife wird der Zustand definiert, ab dem ein Seil nicht mehr sicher betrieben werden kann. Dafür kann es mehrere Gründe geben, die in der Fachliteratur, wie zum Beispiel DIN ISO 4309 für Kranseile [87], ISO 4344 für Aufzugsseile [85] oder DIN EN 12927-6 und -7 für Seilbahnseile [39] [40], aufgelistet sind. Entsprechend den Kriterien für Stahldrahtseile gelten für Faserseile beispielsweise die VDI 2500 [161] und die ISO 9554 [32]. Als Ablegekriterien für Faserseile finden sich darin:

- Äußerer Abrieb (Übermäßiger Abrieb (>5%) zeigt sich durch den Verlust großer Teile tragender Fasern an der Außenseite des Seils)

⁴⁴ ASTM bezeichnet die ASTM International (ursprünglich American Society for Testing and Materials), eine internationale Standardisierungsorganisation mit Schwerpunkt Prüf- und Analyseverfahren

- Innerer Abrieb (Nach Kontakt mit grobkörnigem Material, das dann bis in die Mitte des Seils vordringen kann.)
- Schnitte, Durchscheuerungen und andere mechanische Schäden (>5%)
- Chemische Schädigung
- Schädigung durch Sonnenlicht (UV-Einstrahlung)
- Schädigung durch Wärme (z.B. beim reibungsbehafteten Lauf über Poller)
- Ruckartige Belastungen

Allerdings sind diese Ablegekriterien auf Grund ihrer schwammigen Formulierungen in der Praxis oft nicht oder nur schwer anwendbar. Darüber hinaus fehlt es an praxistauglichen Methoden zur zerstörungsfreien Beurteilung des inneren und äußeren Seilzustands wie beispielsweise der Magnetinduktiven Prüfung bei Stahlseilen [41]. Vogel und Wehking weisen in [172] auf diesen Mangel hin und fordern schärfere Ablegekriterien.

Eine Hilfestellung zur optischen Klassifizierung des Zustands synthetischer Faserseile bietet der „Inspection & Retirement Pocket Guide“ der Firma Samson Rope [142]. Durch den Vergleich des Erscheinungsbilds eines Seils mit abgedruckten Bildern⁴⁵ lässt sich der Verschleißgrad grob einordnen und eine Handlungsempfehlung ableiten. Der Pocket Guide kann jedoch ausschließlich für offene Faserseile aus HMPE angewandt werden und liefert keinen konkret erfassbaren Messwert.

Ansätze zur zerstörungsfreien Prüfung durch Einbringen von zusätzlichen Sensoren wurden in Wehking [178], Huntley [84] und Teufelberger [158] bereits vorgestellt bzw. erfolgreich umgesetzt. Allgemeine Ablegekriterien für Faserseile sind dadurch jedoch nicht entstanden.

Im Rahmen des ZIM-Forschungsprojekts „Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik“ an der Universität Stuttgart [179] wurde bereits an einem geeigneten Verfahren zur Erkennung der Ablegereife von Faserseilen geforscht und ein Prototypengerät aufgebaut, das den äußeren Seilzustand optisch erfasst und bewertet. Die Ergebnisse aus diesem Projekt erscheinen recht vielversprechend, weshalb es in einem weiteren ZIM-Projekt, das aktuell an der Universität Stuttgart behandelt wird („RBG 3“⁴⁶), weiter verfolgt wird [177].

⁴⁵ Der „Abrasion Comparator“ ist eine Art bildgebundene „Abrasions-Vergleichslehre“ mit Zustandsbewertung über einen Farbcode, der den Verschleißgrad über gering (grün) über mittel (gelb) bis ablegereif (rot) klassifiziert.

⁴⁶ RBG = Regalbediengerät; ein schienengeführtes Bediengerät im Hochregallager

2.6. Vergleich von HM-HT-Faserseilen und Stahldrahtseilen

Der Begriff der „hochfesten“ Faser bzw. der HM-HT-Faser beinhaltet bereits die wichtigste Eigenschaft, die den synthetischen Fasern zum Durchbruch verholfen hatte: Ihre hohe Festigkeit. Mit Zugfestigkeiten von bis zu 4.000 N/mm² sind sie Stahldrähten mit maximal 2160 N/mm² [33] weit überlegen.

Einige weitere wichtige Eigenschaften hochfester Faserseile liegen buchstäblich auf der Hand. So verfügen HM-HT-Faserseile gegenüber Stahldrahtseilen bei gleicher oder gar höherer Zugfestigkeit eine um 75 bis 80 % geringere Seilmasse [149]. Bezogen auf die Seilmasse sind HM-HT-Faserseile somit bis zu 15 Mal zugfester als Stahlseile. Abbildung 2.19 gibt eine Übersicht über die Zugfestigkeit, die spezifische Masse sowie die feinheitensbezogene Höchstzugkraft von HM-HT-Fasern und Stahlseilen.

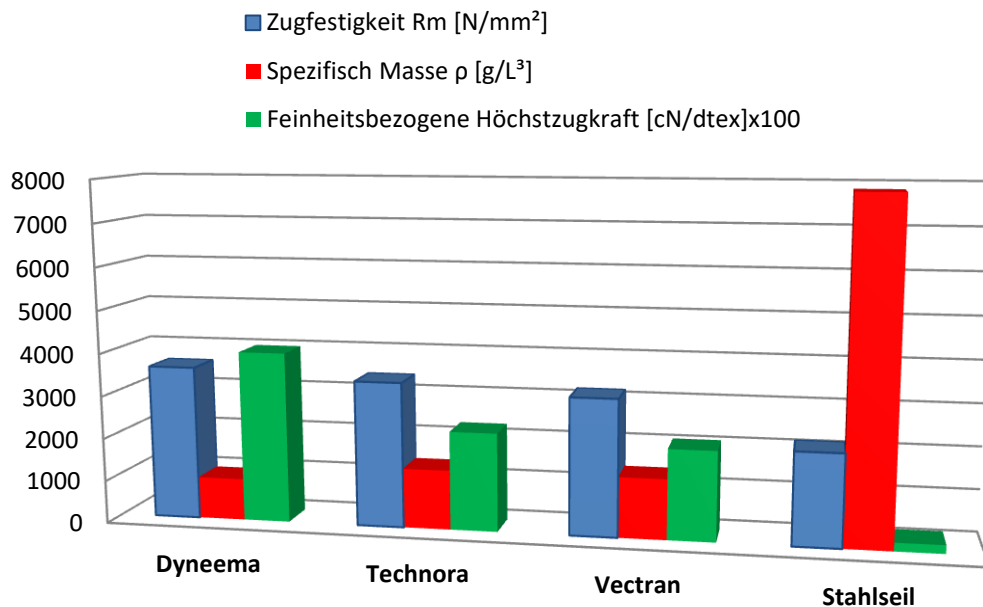


Abbildung 2.19: Vergleich der Zugfestigkeit und spezifischer Masse von HM-HT-Seilen gegenüber Stahlseilen

In Abbildung 2.20 werden die Reißlängen⁴⁷, das heißt die Längen, ab denen ein Seil unter der Last seines eigenen Gewichts bricht, miteinander verglichen.

⁴⁷ Die Reißlänge L_R eines Werkstoffs bezeichnet die Länge, bei der ein frei hängender, homogener Querschnitt durch die Last seines Eigengewichts in der Einspannstelle reißt. Die Reißlänge errechnet sich über die Festigkeit R_m , die Dichte ρ sowie den Ortsfaktor g über den Zusammenhang $L_R = \frac{R_m}{\rho * g}$.

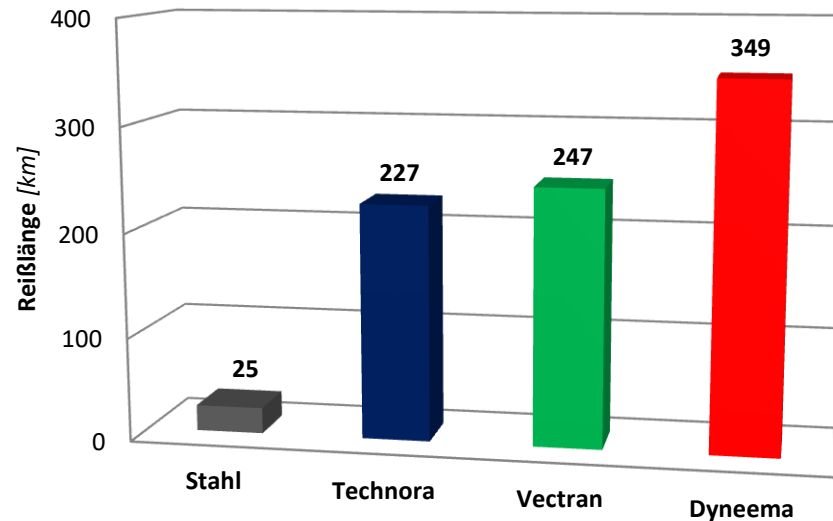


Abbildung 2.20: Reißlängen verschiedener Seilmaterialien

Durch ihre geringe spezifische Masse bieten Seile aus HM-HT-Fasern nicht nur Vorteile im Betrieb sondern bereits im Handling, beim Transport oder der Montage.

Unterschiedliche hochfeste Faserseile bestehen nicht immer aus dem gleichen Werkstoff, wie dies bei Stahldrahtseilen der Fall ist [38, 45]. Vielmehr kommt eine Vielzahl an verschiedenen Materialien mit nochmals verschiedenen Beschichtungen zum Einsatz. Anders als beim Seildraht, dem ein konkreter Werkstoff zugeordnet ist, können sich unter dem Begriff „Faser“ die unterschiedlichsten Materialien einordnen. Sowohl unter dem Begriff „Faser“ wie auch unter „Draht“ versteht man längliches, biegeweiches Gebilde mit relativ geringer Querausdehnung. Nach DIN EN 10624 [38] beträgt der kleinstmögliche Drahtdurchmesser 0,2 mm für unlegierte Stähle bzw. 0,12 mm für nichtrostende Stähle während Fasern hochfester Faserseile üblicherweise zwischen 2 – 60 μm im Durchmesser aufweisen [19]. Bei Vergrößerung des Durchmessers von Seilen wird bei Stahldrahtseilen im Allgemeinen die Konstruktion und damit die Anzahl der Drähte in einem gewissen Rahmen konstant gehalten und der Drahtdurchmesser entsprechend angepasst. Bei Faserseilen hingegen müssen entsprechend mehr Fasern zu Garnen zusammengefasst werden. Der Durchmesser der einzelnen Fasern bleibt dabei konstant während sich ihre Anzahl erhöht. Aus tribologischer Sicht bleibt die Anzahl der Berührflächen der Drähte im Seil damit gleich während sich die Anzahl der Berührflächen der Fasern im Seil wesentlich erhöht.

Laut Feyrer soll die Querbelastrung eines Förderseils⁴⁸ aus Stahldraht beim Lauf über eine Seilrolle höchstens 10 % der kleinsten Seilzugkraft im Beharrungszustand betragen [59]. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich ein Verhältnis von Scheibendurchmesser D zu Seildurchmesser d von ca. $D/d = 40$. Um den benötigten Bauraum sowie die Antriebsstränge fördertechnischer Anlagen wie beispielsweise Regalbediengeräten (RBG) vor allem vor dem Hintergrund kleiner bewegter Massen und niedriger Produktionskosten so klein wie möglich zu gestalten wird ein möglichst kleines D/d -Verhältnis angestrebt. Wie Wehking im Abschlussbericht des AiF-Forschungsprojekts 15370 / N1 „Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik“ [179] berichtet, werden in am Markt verfügbaren Regalbediengeräten bereits D/d -Verhältnisse von 25 bis 28 für Seiltriebe mit Stahldrahtseilen unter Inkaufnahme einer verringerten Seillebensdauer angeboten. Durch die Verwendung hochfester Faserseile lässt sich das Verhältnis von Scheibendurchmesser D zu Seildurchmesser d mit nur moderaten Einbußen an Seillebensdauer weiter reduzieren, wie in [179] mit einem $D/d = 18$ dargelegt. Dies liegt in der Feinheit der Fasern gegenüber Stahldrähten sowie der geringen Faser-Faser-Reibung begründet. Nach DIN EN ISO 9554 [37] sollte für Faserseile ein D/d -Verhältnis von 5 nicht unterschritten werden. Rost verwendet in seiner Arbeit [141] zu technischen Muskeln nach dem „DoHelix“-Prinzip sogar Prinzipien, bei denen der Scheibendurchmesser annähernd den Durchmesser der verwendeten Faserseile beträgt, also $D/d = 1$. Aus seinen Untersuchungen und Recherchen leitet Rost zudem den Bedarf an Untersuchungen an dünnen Seilen mit einem Durchmesser von $d = 1 - 2 \text{ mm}$ ab [141].

Förderseile aus Stahldraht bestehen stets aus geschlagenen Konstruktionen. Durch ihren helixförmigen Aufbau entsteht unter einer Zugbelastung S ein Drehmoment M . Im unverdrehten Zustand besteht zwischen S und M ein proportionaler Zusammenhang [59]. Aufgrund des Eigengewichts des Seils m ist die Zugkraft S in einem senkrecht hängenden Seil nicht konstant. Folglich entsteht in jedem Längeninkrement dx des Seils ein Moment M , das zur Verdrehung des Seils führt, was das Tragverhalten der einzelnen Litzen und Drähte stört und zu einem vorzeitigen Ablegen des Seil führen kann [175]. Faserseile hingegen können neben geschlagenen Konstruktionen auch aus geflochtenen Konstruktionen bestehen [161]. Diese geflochtenen Seile sind auf Grund ihres symmetrischen Aufbaus drehungsfrei, weshalb keinerlei Verdrehung unter Last entsteht.

Wie unter Abschnitt 2.3.5 bereits kurz erwähnt neigen vor allem Fasern aus HMPE dazu unter Last zu Kriechen [74]. Dieser Retardationsvorgang kann prinzipiell in drei

⁴⁸ Unter einem Förderseil ist ein laufendes (Litzen-)Seil zu verstehen, das sowohl Trag- wie auch Zugaufgaben übernimmt.

Stadien unterteilt werden, vgl. Abbildung 2.21. Bereich I stellt das primäre Kriechen dar. In diesem Bereich steigt die plastische Dehnung rasch an bis die Dehngeschwindigkeit wieder stark abfällt. Der Bereich II wird als stationäres Kriechen bezeichnet. Die Dehngeschwindigkeit verhält sich hier relativ konstant auf geringem Niveau. In Bereich III treten massive Schädigungen der Fasern auf, die zu einem schnellen Wachstum der Dehngeschwindigkeit und zum Versagen des Seils, dem Bruch, führen.

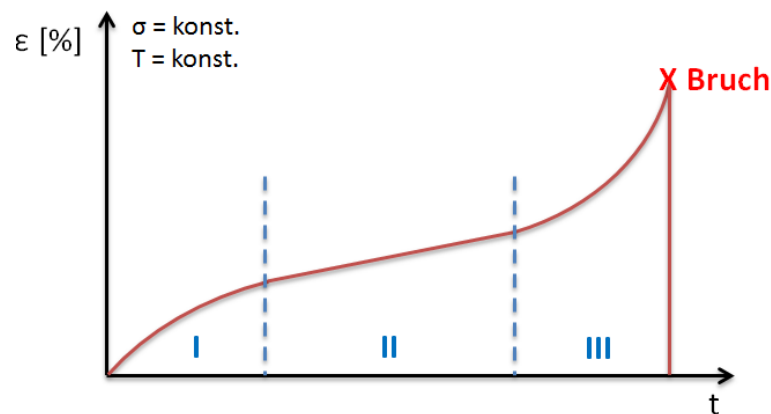


Abbildung 2.21: Drei Stadien des Kriechvorgangs von Polymeren

Besonders empfindlich sind HM-HT-Fasern, allen voran HMPE-Fasern, gegenüber Erwärmung [99]. Bei schwellerer Belastung sowie beim Lauf über Scheiben kommt es zu Reibvorgängen zwischen den einzelnen Fasern, was wiederum zur Erwärmung der Fasern und zu Abrasion führt. Zudem entsteht durch Schwingungen der Fasern im Seil Dissipationswärme. Aramidfasern weisen einen sehr hohen Faser-Faser-Reibwert auf, weshalb sie mit Finishern⁴⁹ behandelt werden [114]. Der quantitative Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer ist bislang jedoch nicht grundlegend erforscht.

HM-HT-Fasern neigen auf Grund Ihrer geringen Querdruckstabilität unter Druckbelastung schnell zum Ausknicken. Dadurch werden die einzelnen Fasern geschädigt und können ineinander Verhaken [74] [75] [120]. Ursächlich hierfür ist, dass die Molekülketten in Faserquerrichtung hauptsächlich über Nebervalenzbindungen verknüpft sind, die gegenüber den kovalenten in Faserlängsrichtung deutlich schwächer sind. Dies begründet auch die Knickempfindlichkeit bei Druckbeanspruchung [108]. Unter Zugbeanspruchung findet das Risswachstum deshalb auch nicht vorrangig in Richtung der größten

⁴⁹ Finisher sind Beschichtungen, die auf die Fasern aufgebracht werden um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Dabei werden die Fasern beispielsweise hydrophobiert (Entzug von Wasser) oder silikoniert (Minderung der Faser-Faser-Reibung)

Hauptspannung sondern entlang der Faser statt. Hierbei brechen die Nebervalenzbindungen auf Grund der betragsmäßig kleinen Schubspannungen vor den stabilen kovalenten Bindungen der Längsfasern. Erst an Kettenenden springt der Riss in Faserquerrichtung über. Der verbleibende tragende Restquerschnitt versagt unter Gewaltbruch [108].

In Tabelle 2.3 sind nochmals die wichtigsten Eigenschaften von Stahldrahtseilen, HM-HT-Faserseilen sowie Naturfaserseilen miteinander verglichen.

	Naturfaserseil	Stahldrahtseil	HM-HT-Faserseil
Sicherheit / Redundanz	→	↑	→
Hohe Zugfestigkeit	↓	↑	↑
Unempfindlichkeit	↓	↑	→
geringe Eigenmasse	↑	↓	↑
	↑ = gut	→ = mittel	↓ = schlecht

Tabelle 2.3: Bewertung der Eigenschaften verschiedener Zugelemente

Um verschiedene Vorteile von Stahldrahtseilen und HM-HT-Faserseilen zu kombinieren sind Sonderkonstruktionen, sogenannte „Hybridseile“, entwickelt worden, deren hochfester Faserkern durch verschleißfeste Stahldrahtlitzen geschützt wird [136, 139].

2.7. Einsatz von HM-HT-Faserseilen

Die Verbreitung hochfester Faserseile ist trotz vieler vorteilhafter Eigenschaften und der Verfügbarkeit seit vielen Jahren der Verbreitung von Stahldrahtseilen noch immer weit unterlegen. Grund hierfür ist neben dem Mangel an standardisierten Ablegekriterien der lückenhafte Forschungsstand und die mangelnde Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der hochfesten Faserseile. Der Mangel an Vergleichbarkeit der verschiedenen Forschungsergebnisse rührt hier zum einen aus der unterschiedlichen Variation von einer Vielzahl an einflussreichen Parametern und zum anderen aus der nicht immer vollständigen Dokumentation aller Versuchsparameter.

Im Sport-, im Kleinfischer- sowie im Offshorebereich sind HM-HT-Faserseile bereits seit vielen Jahren im Einsatz und haben sich dort etabliert. Viele bedeutende

Hersteller von hochfesten Faserseilen haben ihren Ursprung in der Produktion von Tauwerken für den maritimen Einsatz. Der industrielle Einsatz von hochfesten Faserseilen ist vergleichsweise jung. Die Motivation hierbei resultiert daraus, dass etablierte Zugelemente in bestimmten Anwendungen mehr und mehr an ihre Grenzen stoßen.

In der Offshoreindustrie werden Seile zur Verankerung schwimmender Bohr- und Förderplattformen genutzt⁵⁰. Die Höhendifferenz beträgt dabei derzeit bis zu ca. 3000 m, zukünftig sogar noch mehr [50]. Auf Grund der enormen Höhenspannung, die hierbei bei der Verwendung von Stahlseilen auf Grund deren hohen Eigenmasse auftritt⁵¹, werden bereits heute bei vielen dieser Tiefseeanwendungen Mooring Lines aus HM-HT-Fasern eingesetzt [8, 69].

Zum Heben schwerer Lasten werden Rundschnuren und Tragschlaufen, die bis dato aus Stahlseilen gefertigt wurden und nur von mehreren Personen gleichzeitig unter enormen Kraftaufwand angelegt werden konnten, aus HMPE-Faserseilen eingesetzt, die nun von einer einzelnen Person getragen werden kann [155].

Prinzipiell finden HM-HT-Faserseile in einer breiten Palette verschiedenster Aufgabengebiete ihre Anwendung. Sie dienen für Reepschnüre und Bandschlingen genauso wie für Fangleinen für Gleitschirmflieger, für Startwinden von Segelfliegern, zum Ziehen von Lasten in der Forsttechnik oder zum Verlegen von Tiefseekabeln. Weit verbreitet sind sie bereits in maritimen Anwendungen wie zur Befestigung von Segeln an Booten oder für Fischernetze und Angelschnüre. Zur Rettung von Personen werden Longlines aus Dyneema in der Luftrettung verwendet [2, 9].

In den letzten Jahren rücken immer mehr Anwendungsbereiche, bei denen das Interesse besteht bislang verwendete Stahlseile durch HM-HT-Faserseile zu ersetzen, in den Fokus. Als Vorreiter ist hierbei die Schindler AG, Ebikon, Schweiz zu nennen, die bereits im Jahr 2000 ein Aramidfaserseil zum Einsatz in Aufzügen vorgestellt hat [147]. Zur Minimierung der Faser-Faser-Reibung sind Zwischenschichten im Seil eingebracht. Darüber hinaus sind Kohlenstofffasern in das Seil mit eingebracht, über deren Widerstands- und Durchgangsmessung eine Aussage über den Seilzustand getroffen werden kann. Dazu sind die Kohlenstofffasern so ausgelegt, dass sie vor den Seilfasern brechen [178]. Abbildung 2.22 zeigt das von Schindler eingesetzte Aramidseil.

⁵⁰ sog. „Mooring Lines“

⁵¹ vgl. Abschnitt 2.6 Vergleich von HM-HT-Faserseilen und Stahldrahtseilen



Abbildung 2.22: Aramidseil der Firma Schindler für den Einsatz in Aufzügen

Ein weiterer Einsatz von hochfesten Faserseilen wird in Lift-Report 2014 [102] beschrieben. Hierbei sollen ebenfalls hochfeste Fasertragseile in Transport- und Personenaufzügen eingesetzt werden.

Zur Bauma 2016⁵² präsentierte die Firma Teufelberger Seil Ges.m.b.H. ihr neues hochfeste Faserseil „soLITE“, das in Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr⁵³ speziell für Mobilkrane entwickelt wurde [158]. Laut Hersteller verfügt das soLITE über drei unabhängige Systeme zur Erkennung der Ablegereife: Eine sich über die Lebensdauer ändernde Farbkodierung, ein elektronisches Condition Monitoring System sowie über externe Datenerfassung am Kran selbst.

Bereits seit dem Jahr 2014 betreibt die amerikanische Manitowoc Crane Group Mobilkrane der Grove RT770E-Reihe mit hochfesten Faserseilen vom Typ KTM100⁵⁴ des ebenfalls amerikanischen Herstellers Samson [148]. Samson setzt dabei auf ein offenes Geflecht aus Dyneema-Fasern. Handhabung, Installation, Inspektion und Ablegekriterien werden dabei in einem eigenen Handbuch beschrieben und bauen auf dem „Samson Pocket Guide“ [142] auf [143].

Auf Grund der immer weiter wachsenden Fördertiefen und dem damit verbundenen hohen Eigengewicht der verwendeten Stahlseile gibt es aktuell Anstrengungen hochfeste Faserseile auch in Schachtförderanlagen einzusetzen, bei denen leicht große Tiefen erreicht werden können. Dabei werden die Seile Geschwindigkeiten von bis zu $v = 18$ m/s ausgesetzt [181]. Das grundsätzliche Lebensdauerverhalten der Seile bei solch hohen Geschwindigkeiten ist bislang jedoch noch gänzlich unerforscht.

⁵² Die Bauma ist die weltweit größte und wichtigste Messe der Baumaschinenbranche und findet alle 3 Jahre auf dem Gelände der Messe München statt.

⁵³ Die Liebherr-Unternehmensgruppe ist ein international tätiges Unternehmen mit Schwerpunkt Baumaschinen.

⁵⁴ KTM100 ist ein Markenname der Fa. Samson für ein Faserseil aus Dyneema®. Früher wurde das Faserseil unter dem Markennamen KZ-100 vertrieben.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Versuchsseile

Im Rahmen dieser Arbeit sollen verschiedene Seile getestet werden, die nicht auf speziellen Sonderkonstruktionen basieren sondern frei am Markt erhältlich und in Standardanwendungen weit verbreitet sind. Die Auswahl der Versuchsseile umfasst dabei alle drei üblichen hochfesten Polymerfasertypen UHMWPE, Aramid und LCP. Dabei wird Dyneema® SK78 als Vertreter der Gruppe der UHMWPE, Technora® T221 aus der Gruppe der Aramide und Vectran® HT als aromatisches Polyester ausgewählt. Im Allgemeinen besteht großes Interesse den kompletten Durchmesserbereich laufender Faserseile, das heißt von ca. 1 mm bis 60 mm abzudecken. In Bezug auf die Anwendung in parallelkinematischen Seilrobotern kommen jedoch hauptsächlich Faserseile mit Durchmessern von ca. 2 mm bis 6 mm zum Einsatz. Zudem haben dickere Versuchsseile sowohl einen höheren Versuchs- wie auch Materialaufwand zur Folge, was die Anzahl der durchführbaren Versuche deutlich einschränkt. Aus diesen Gründen werden im Rahmen dieser Arbeit Faserseile mit Nenndurchmesser $d_n = 2$ mm und 6 mm betrachtet. Von jedem der drei ausgewählten Materialien wird im Durchmesser 2 mm die gleiche Konstruktion eines offenen, 12-strängigen Geflechts ausgewählt.

Vorversuche am IFT haben gezeigt, dass mit HM-HT-Faserseilen aus Vectran HT die höchste Lebensdauer im Biegeversuch erzielt werden kann. Aus diesem Grund wird zusätzlich zu dem bereits ausgewählten Vectran 12er-Geflecht mit Nenndurchmesser 2 mm ein ebenfalls offenes 12er-Geflecht mit Nenndurchmesser 6 mm gewählt, das sowohl in Machart, Material wie auch in der Beschichtung dem Vectran 2 mm-Geflecht entspricht und somit die Möglichkeit zum direkten Vergleich eröffnet. Gemäß dem Herstellungsprozess verlaufen jeweils sechs der Garne rechts- und die anderen sechs Garne linksgängig, was zu einem drehungsfreien, jedoch nicht perfekt runden Seil führt.

Weitere am IFT durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass von biegeoptimierten, gelegten HM-HT-Faserseilen der Machart „Wire Rope Construction“⁵⁵ eine nochmals gesteigerte Lebensdauer bei Biegebeanspruchung zu erwarten ist [127, 179]. Bei dieser Machart werden die Garne ähnlich wie bei Stahldrahtseilen miteinander verdreht, was dazu führt, dass weniger Kreuzungspunkte und dafür mehr Linienberührungen im Seilinneren auftreten. Zur Stabilisierung werden Seile dieser Konstruktion zumeist mit einem schützenden Mantel umflochten [125]. Auf Grund dieser hohen Erwartungen hinsichtlich der

⁵⁵ vgl. Abschnitt 2.3.1 Definition und Macharten

Seillebensdauer wird ein weiteres Versuchsseil aus Vectran HT mit 6 mm Nenndurchmesser und eben der vorgenannten Konstruktion mit aufgenommen.

Die teils angegebenen, teils eigenbestimmten Kennwerte der fünf ausgewählten Versuchsseile sind in Tabelle 3.1 detailliert aufgelistet. Die erste Stelle der Seilbezeichnung bezieht sich dabei auf den Faserwerkstoff (bzw. die Machart), die zweite Stelle beschreibt den Seilnenndurchmesser.






Seilbezeichnung	D2	T2	V2	V6	M6
Herstellerbezeichnung	D-pro	TechnaOne	VectraOne	VectraOne	MegaTwin Vectran
Abbildung					
Seilkonstruktion	geflochten, 12-fach	geflochten, 12-fach	geflochten, 12-fach	geflochten, 12-fach	Kernmantel; Kern gedreht, 4Litzen8Garne Mantel geflochten
Faserwerkstoff	UHMWPE; Dyneema SK78	Aramid; Technora T221	aromatisches Polyester; Vectran HT	aromatisches Polyester; Vectran HT	aromatisches Polyester; Vectran HT
Beschichtung	LCS	Geoflex	Geoflex	Geoflex	Kern: Geoflex
thermofixiert/verstreckt	ja	nein	nein	nein	nein
d_n [mm]	2	2	2	6	6
d_{ist} [mm]	1,55	2,125	2,025	5,85	5,8 Kern:4,3
F_w [daN] (laut Hersteller)	410	390	420	3444	1667
Metergewicht [g/100m] laut Hersteller: nach Messung:	180 172	400 338	400 350	2.800 2.485	2.800 2.494 (ges.) 1.145 (Kern)
Feinheit [tex] laut Hersteller: nach Messung:	1.800 1.720	4.000 3.380	4.000 3.500	28.000 24.850	28.000 24.940 (ges.) 11.450 (Kern)
Flecht-/Schlaglänge [mm]	14,0	14,1	14,2	42,3	77,0
Flecht-/Schlagwinkel [°] (bzgl. d_n)	24,2	24,0	23,9	24,0	--
Flecht-/Schlagwinkel [°] (bzgl. d_{ist})	19,2	25,3	24,1	23,5	19,4

Tabelle 3.1: Kennwerte der ausgewählten Versuchsseile

Alle fünf ausgewählten Seile sind herstellerseitig mit dem marktüblichen Coating⁵⁶ beschichtet worden, wobei für die Seile aus Technora und Vectran eine sogenannte „Geoflex“ Beschichtung der Fa. Geo. Gleistein & Sohn GmbH verwendet wurde, die

⁵⁶ Die Beschichtung von Faserseilen wird im internationalen Sprachgebrauch als „Coating“ bezeichnet

speziell für laufende Seile entwickelt wurde. Das Versuchsseil aus Dyneema wurde nach dem „LIROS Coating System“ beschichtet, was ebenfalls die Abriebfestigkeit des Seils erhöhen soll.

Die nach DIN EN ISO 2307 [36] nachgemessenen Flechtlängen betragen bei allen 12er-Geflechten ca. das 7,0-fache des Seilnennendurchmessers. Die realen Durchmesser weichen dagegen teils merklich von den angegebenen Nennendurchmessern ab. Die Bestimmung der realen Durchmesser erfolgte dabei unter Prüflast gemäß DIN EN ISO 2307 [36], Anhang A mittels selbstanlegendem Dickenschneidmessgerät⁵⁷. Die Abweichung des realen Durchmessers des Dyneema-Seils lässt sich mit der thermischen Verstreckung nach dem Flechtprozess erklären. Dabei wird das verflochtene Seil axial gelängt, was gleichzeitig mit einer Verjüngung in radialer Richtung verbunden ist.

Von jedem der fünf Seiltypen werden jeweils nur Prüflinge aus der gleichen Charge verwendet, um eventuelle Unterschiede im Produktionsprozess ausschließen zu können.

3.2. Versuchseinrichtungen

Für die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Versuche werden verschiedene Prüfmaschinen eingesetzt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Zum einen handelt es sich um Prüfmaschinen, die bereits am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart vorhanden sind, zum anderen wurde eigens für die Aufgabenstellung dieser Forschungsarbeit eine neuartige Prüfmaschine konzipiert, konstruiert und gebaut, welche in Kapitel 3.6.1 detailliert beschrieben wird.

Zur Durchführung herkömmlicher Biegewechselversuche werden hauptsächlich die Dauerbiegemaschine BM12^{58,59} des Instituts für Fördertechnik und Logistik eingesetzt, die speziell für kleine Seildurchmesser konzipiert ist [171]. Versuche mit höheren Lasten werden auf der institutseigenen Dauerbiegemaschine BM4 durchgeführt.

Für dynamische Zugschwellversuche sowie zur Ermittlung der Bruchkraft wird die am IFT vorhandene 75kN-Zugschwellprüfmaschine mit hydraulischem Zylinder eingesetzt.

⁵⁷ vgl. Abbildung 3.5, Seite 57, Abschnitt 3.3.3 „Durchführung der Dauerbiegeversuche“

⁵⁸ BM steht für die Abkürzung Biegemaschine.

⁵⁹ Die nachstehende Zahl bezieht sich auf die institutseigene, chronologische Nummerierung der vorhandenen Dauerbiegemaschinen

3.3. Dauerbiegeversuche

3.3.1. Versuchseinrichtungen für Dauerbiegeversuche

Bei den eingesetzten Dauerbiegemaschinen handelt es sich um den Typ „Stuttgart“⁶⁰, bei dem ein Versuchsseil über eine große Antriebsscheibe sowie eine kleinere Prüfscheibe gelegt wird. Die Prüfscheibe, deren Rotationsbewegung über das Versuchsseil erzeugt wird, ist vertikal verschiebbar gelagert und mit einem Gewichtsteller, der mittels stählerner Gewichtsplatten belastet wird, verbunden. Je nach Baugröße kann diese Verbindung bei kleineren Prüflasten direkt (vgl. BM12) oder bei größeren Prüflasten über eine definierte Hebelübersetzung (BM4) realisiert werden. Die Bewegung wird über einen Elektromotor erzeugt und mittels einer Schubstange in Form einer oszillierenden Bewegung auf die Antriebsscheibe und damit auf das Versuchsseil übertragen. Für eine detaillierte Beschreibung der Dauerbiegemaschinen mit Abbildungen sei an dieser Stelle auf Feyrer & Hemminger [62] verwiesen. Abbildung 3.1 zeigt die eingesetzte Dauerbiegemaschine BM12 für kleine Seildurchmesser mit direkter Zugkraftaufbringung.

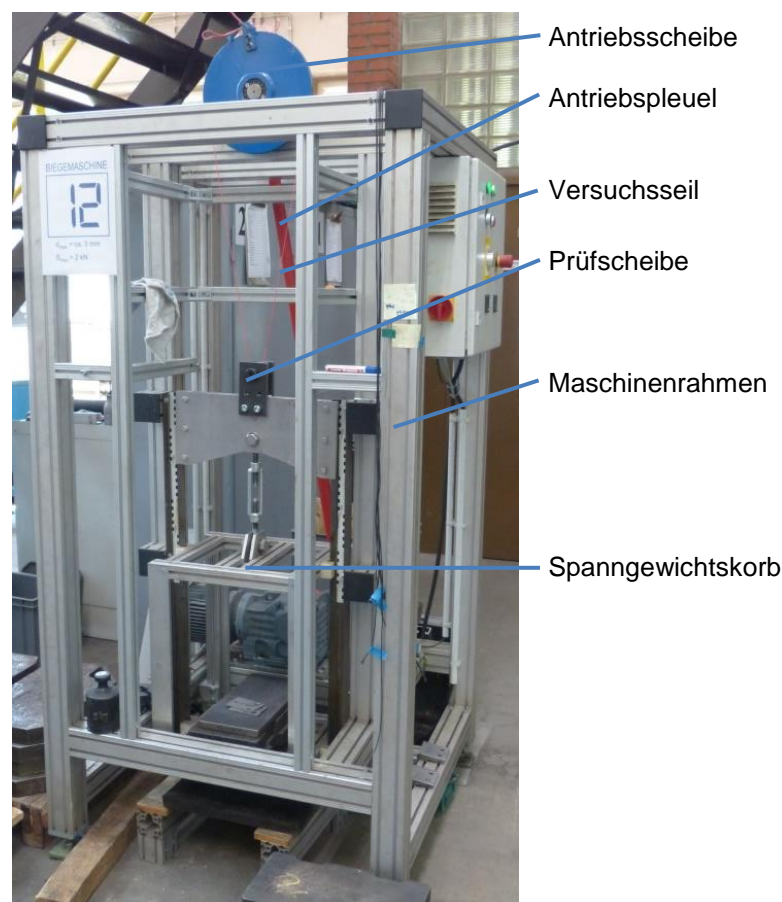
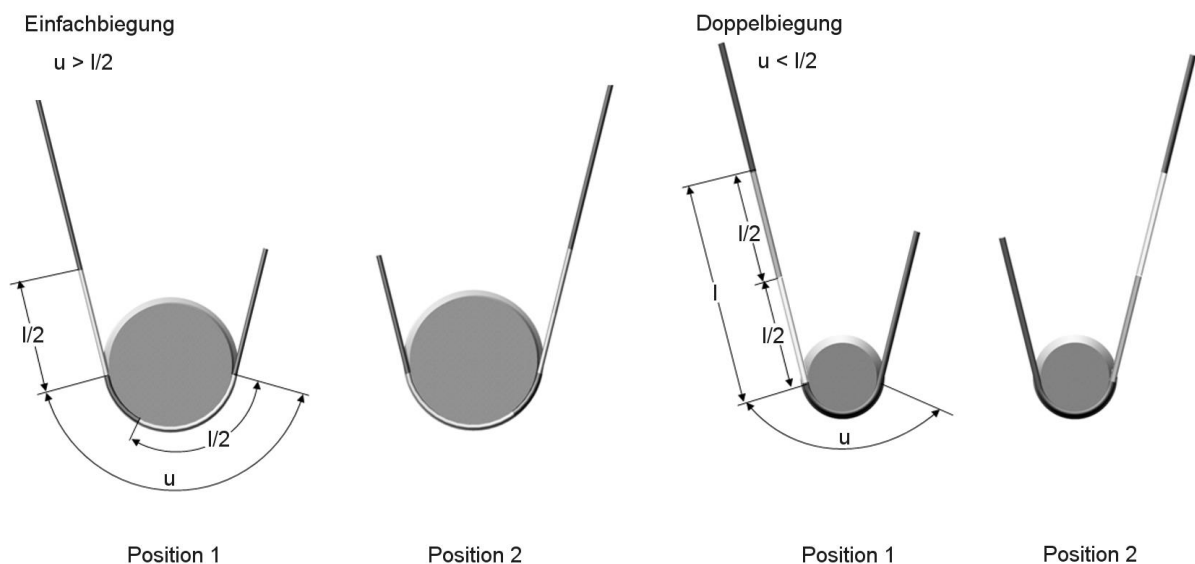


Abbildung 3.1: Seildauerbiegemaschine BM12 für kleine Seildurchmesser

⁶⁰ Das Funktionsprinzip der am IFT eingesetzten Dauerbiegemaschinen hat sich über viele Jahre bewährt. Die nach Feyrer aufgestellte Gleichung zur Berechnung der Lebensdauer laufender Seile beruht auf einer Vielzahl nach diesem Funktionsprinzip durchgeführten Biegeversuche [59, 62]

Die Hubbewegung der Prüfmaschine kann durch das Verstellen des Wirkradius der Pleuelstange stufenlos eingestellt werden. Je nach Prüfmaschine und Prüfkonfiguration können somit sogenannte Einfachbiegungen und Doppelbiegungen durchgeführt werden. Bei einer Einfachbiegung läuft die Biegezone des Seils pro Motorumdrehung einmal auf die Prüfscheibe auf und wieder von ihr ab. Folglich wird sie dabei einmal vom geraden in den gekrümmten Zustand und wieder zurück in den geraden Zustand überführt. Bei einer Doppelbiegung hingegen umläuft die Biegezone die Prüfscheibe pro Motorumdrehung einmal komplett und läuft komplett wieder zurück. Die Biegezone erfährt somit die Zustände gerade-gebogen-gerade-gebogen-gerade. Sie erfährt dabei genau doppelt so viele Wechsel vom geraden in den gekrümmten Zustand wie bei der Einfachbiegung. [25, 128, 162]. Schematisch wird für eine Einfachbiegung das Kurzzeichen \frown und für eine (gleichsinnige)⁶¹ Doppelbiegung das Kurzzeichen $\smile\smile$ verwendet. Abbildung 3.2 zeigt schematisch eine Einfach- und Doppelbiegung, jeweils am Anfang einer Motorumdrehung (jeweils linke Abbildung) und nach einer halben Motorumdrehung (jeweils rechte Abbildung).



Seilhub: h

Biegelänge: $l = 2h$

Umschlingungsbogen: $u > h$

Seilhub: h

Biegelänge: $l = h - u$

Umschlingungsbogen: $u < h$

Abbildung 3.2: Schematische Darstellung von Einfach- und Doppelbiegung
[150, 175]

⁶¹ Eine gleichsinnige Doppelbiegung wird einfach nur als „Doppelbiegung“ bezeichnet. Eine gegensinnige Doppelbiegung wird als „Gegenbiegung“ bezeichnet. Eine gegensinnige Einfachbiegung kann auf Grund der Definition nicht existieren.

Nach DIN 15020 liegt eine Gegenbiegung vor, wenn der Winkel α_{BE} zwischen den Biegeebenen benachbarter Scheiben größer als 120° ist und die Biegezone beide Scheiben überläuft [25]. Laut Untersuchungen von Müller [123], die eine deutliche Reduktion der Lebensdauer von Stahldrahtseilen bei Gegenbiegung im Vergleich zur Einfachbiegung aufzeigen, ist nach DIN 15020 eine Gegenbiegung bei der Lebensdauerberechnung eines Seiltriebs mit Stahlseil mit Faktor 2 zu multiplizieren [25]. Feyrer zeigte in [63] jedoch auf, dass der schädigende Einfluss der Gegenbiegung je nach Durchmesser Verhältnis und Seilzugkraft stark schwankt.

Zur Durchführung der Dauerbiegeversuche werden zwei Dauerbiegemaschinen des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart eingesetzt. Für Dauerbiegeversuche an Faserseilen mit Seilnenndurchmesser $d_n = 2 \text{ mm}$ wird die Biegemaschine BM12 (vgl. Abbildung 3.1), für Versuche an Seilen mit Nenndurchmesser $d_n = 6 \text{ mm}$ wird die Biegemaschine BM4 verwendet. Beide Maschinen arbeiten grundsätzlich nach dem gleichen, oben beschriebenen Funktionsprinzip⁶² und unterscheiden sich hauptsächlich in ihren Leistungskennwerten. Die wesentlichen Kennwerte der beiden eingesetzten Dauerbiegemaschinen sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Bezeichnung	BM 4	BM 12
Seilzugkraft S [N] max.	6.000	2.000
Hub h [mm] max.	768	280
Durchmesser Antrieb D_A [mm]	500	300
Anzahl Prüfstellen	2	1
Drehzahl U [1/min] max.	47	56
Art der Kraftaufbringung	Einfache Hebelübersetzung	Direkt

Tabelle 3.2: Kennwerte der eingesetzten Dauerbiegemaschinen⁶³

⁶² Das Funktionsprinzip der am IFT eingesetzten Dauerbiegemaschinen (s. Abschnitt 3.3) wird bereits seit vielen Jahrzehnten angewandt und hat sich über die Zeit bewährt. Eine Vielzahl an nach diesem Prinzip gefahrenen Versuche bilden die Grundlage für die Seillebensdauerberechnungsmethode nach Feyrer [59].

⁶³ Die Kennwerte der BM4 stammen aus [62], die der BM 12 aus [171]

3.3.2. Versuchsscheiben

Zur Durchführung aller beschriebenen Versuche wird stets die gleiche Rillengeometrie eingesetzt. Entgegen der Auslegung von Seilscheiben und deren Rillen für Stahlseile⁶⁴ existiert für Gestaltung von Seilscheiben für Faserseile bislang kein allgemeingültiges Regelwerk. Aus diesem Grund sind bestehende Untersuchungen an biegebeanspruchten Faserseilen bislang auch mit den unterschiedlichsten Scheiben- und Rillengeometrien durchgeführt worden. Erste systematische Untersuchungen zur Rillengeometrie liefert Kretschmer [97]. Zur Dimensionierung und Ausgestaltung der in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Versuchsscheiben wurden Erkenntnisse vorhergehender Arbeiten mit dem Ziel zur Gestaltung einer möglichst optimalen Rillengeometrie ausgewertet und zusammengefasst. Die Parameter der Versuchsscheiben wurden entsprechend der folgenden Kriterien und Überlegungen gewählt.

Die verwendeten Versuchsscheiben werden aus Vergütungsstahl gefertigt. Als Rillengeometrie wird eine **Rundrille**, die nach Berner [11], DIN 15061 [26] und Kretschmer [97] die höchste Seillebensdauer erwarten lässt, gewählt.

Wie in Abschnitt 2.4.3 und bei Wehking [179] beschrieben fördert äußere Abrasion das Verschleißverhalten hochfester Faserseile. Im Gegensatz zu Stahlseilen, die zumeist mit gehärteten Rillen kombiniert werden [59], ist somit bei der Kombination Seilrille / Faserseile das Seil der Hauptträger des Verschleißes. Nach Wehking [179] führt eine raue Rillenoberfläche zu einem signifikanten Verlust an Seillebensdauer auf Grund der äußeren Abrasion. Um diesen Verschleiß gering zu halten wird die **Oberflächengüte** hochwertig gewählt. Unter gleichzeitiger Beachtung wirtschaftlicher Überlegungen wird ein Mittenrauwert von $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ festgelegt.

Der **Rillenöffnungswinkel** γ ist der Winkel, der sich zwischen den beiden Flanken der Seilrille ausbildet⁶⁵. Für Stahlseile wird er in einer Vielzahl an Dokumenten und Untersuchungen unterschiedlich quantifiziert. So schreibt DIN 15061 [26] einen Winkel von mindestens 45° vor, während andere Länder zwischen 35° (USA) und 52° (Großbritannien) liegen [164]. Prinzipiell besteht bei zu großem Öffnungswinkel γ die Gefahr, dass das Seil zu wenig gestützt wird und damit zu stark ovalisiert, was wiederum zu erhöhtem Verschleiß und geringerer Lebensdauer führt. Auf der anderen Seite sollte der Rillenöffnungswinkel γ auch nicht zu klein gewählt werden. Beim Lauf von Seilen ist es praktisch kaum zu vermeiden, dass das Seil, bevor es den Rillengrund erreicht, zuerst auf eine Rillenflanke aufläuft. Durch die Reibung zwischen Seil und Scheibe wird eine kombinierte Wälz- und Gleitbewegung verursacht, unter der sich das Seil in den Rillengrund bewegt und dort zum Liegen

⁶⁴ vgl. DIN 15061 [26]

⁶⁵ vgl. Abbildung 3.3

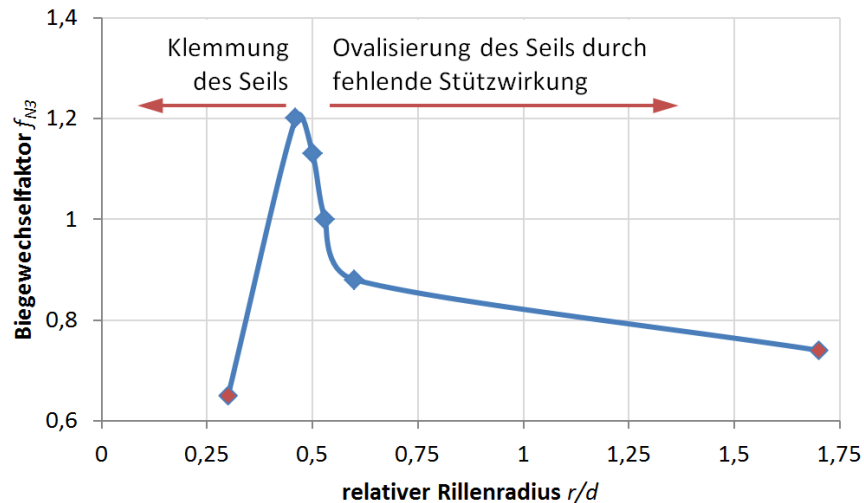


Abbildung 3.4: Abhängigkeit der Seillebensdauer von Faserseilen N vom relativen Rillenradius r/d i.A.a. [77]

Trotz eines Optimums der Seillebensdauer bei $r/d = 0,5$ wird in den meisten Seiltrieben ein Verhältnis von $r/d = 0,53$ realisiert [162]. Dies hängt zum einen mit der Forderung, das Seil keinesfalls in der Rille zu klemmen, zum anderen mit einem tolerierten Seildurchmesserübermaß von max. 5 % bzw. 6 % nach ISO 4344 [85] zusammen. Bei Faserseilen, die gegenüber Stahlseilen eine geringe Quersteifigkeit aufweisen, fällt die Ovalisierung in der Rille wesentlich stärker aus. Michael und Vogel untersuchten diese Ovalisierung bei Faserseilen in Kombination mit Rundrillen systematisch [116]. Durch die ausgeprägte Ovalisierung von Faserseilen in Rundrillen verstärkt sich die innere Abrasion im Seil. Zudem ändert sich das Tragverhalten der einzelnen Fasern untereinander wesentlich. Aus diesem Grund ist es aus Ansicht des Autors sinnvoll das Faserseil in der Rille so gut als möglich zu stützen, jedoch ohne es dabei zu klemmen. Aus dieser Forderung heraus wird ein relativ kleines Verhältnis von Rillenradius zu Seildurchmesser von $r/d = 0,51$ gewählt.

Seiltriebe werden unter anderem durch Verhältnis von Seilscheibendurchmesser D zu Seilenddurchmesser d , dem **D/d -Verhältnis**, charakterisiert. Im Allgemeinen wirkt sich ein kleines D/d -Verhältnis schädlich auf die Seillebensdauer aus, während der Seilscheibendurchmesser D nach ökonomischen Gesichtspunkten und oft auch auf Grund des vorhandenen Bauraums möglichst klein gehalten werden soll. um ein vernünftiges Mindestmaß an Seillebensdauer zu erreichen wird bei technischen Anwendungen ein D/d -Verhältnis von 25 bei der Verwendung von Stahlseilen üblicherweise nicht unterschritten [179]. Durch die großen Trommel- und Scheibendurchmesser werden große Drehmomente erzeugt, die wiederum einen entsprechend großzünftig dimensionierten Antriebsstrang erfordern.

Parameter	Wert
Material	Stahl
Rillenart	Rundrille
Oberflächengüte R_a	1,6 μm
Seildurchmesser d	2 mm, 6 mm
Rillenöffnungswinkel γ	60°
Relativer Rillradius r/d	0,51
Scheiben-/ Seildurchmesser D/d	15

Tabelle 3.3: Kennwerte der verwendeten Seilscheiben

Beim Einsatz biegeweicher Fasereile lässt sich das D/d -Verhältnis deutlich reduzieren [179]⁶⁶. Vogel verwendet in [168] ein extrem kleines D/d -Verhältnis von 10. Der größte Teil bisheriger Untersuchungen wählt diesen Wert etwas größer, z.B. $D/d = 12,5$ [176]. Um das Verhältnis von D/d entsprechend der realitätsnahen Anwendungen, beispielsweise im IPAnema Seilroboter, möglichst klein zu wählen und gleichzeitig nicht in die Gefahr zukommen sich dem Sprungpunkt bzw. der Donand-Kraft zu stark zu nähern, wird das D/d -Verhältnis auf 15 festgelegt. Die Parameter der eingesetzten Prüfscheibe sind in Tabelle 3.3 nochmals gesammelt dargestellt.

3.3.3. Durchführung der Dauerbiegeversuche

Der komplette Ablauf der Dauerbiegeversuche ist von der Probenkonfektionierung bis zum Ende des jeweiligen Versuchs über alle durchgeführten Versuche hinweg gleichbleibend. Somit können Einflüsse, die über Unterschiede bei der Versuchseinrichtung entstehen können, ausgeschlossen werden. Die einzelnen Schritte zum Auflegen der Seile auf die Biegemaschinen sind:

- Kontrolle der Biegemaschine auf Abweichungen.
- Säubern der Rille der Versuchsscheibe.
- Gewichtskorb anheben und sichern.
- Versuchsseil um Antriebsscheibe und Versuchsscheibe führen und miteinander verknoten⁶⁷. Hierbei wird darauf geachtet dem Seil keine Verdrehung aufzuzwingen.
- Knoten am Bolzen der Antriebsscheibe gegen Verschieben sichern.

⁶⁶ vgl. Abschnitt 2.6 Vergleich von HM-HT-Fasereilen und Stahldrahtseilen

⁶⁷ Zum Verknoten der teilweise sehr glatten Fasereile hat sich der „dreifache Spierenstich“ bewährt.

- Gewichtskorb absenken.
- Anfangsparameter: Achsabstand a , Korbposition und Seildurchmesser d (in zwei orthogonalen Achsen) messen.
- Seilhub h markieren.
- Umdrehungsgeschwindigkeit einstellen.
- Maschine starten.
- In festgelegten Intervallen Korbposition x (Dehnung), Temperatur T und Seildurchmesser d in der Biegezone messen.
- Ablegen des Versuchsseils nach dessen Bruch.

Das Versuchsende ist erreicht, wenn das Seil gebrochen ist. Bei ummantelten Seilen bezieht sich der Bruch ausschließlich auf den Bruch des tragenden Kerns. Dies ist u.a. daran erkennbar, dass sich das Versuchsseil überproportional stark und extrem schnell dehnt, sodass trotz Verwendung von Biegemaschinen mit großem Spannweg nicht genügend Weg zum Nachspannen des Versuchsseils vorhanden ist.

Zu Beginn sowie in festgelegten Zeitabständen werden die Seilst Durchmesser d_{ist} in der Biegezone gemessen und festgehalten. Hierzu werden jeweils zwei um 90° zueinander versetzte Messungen durchgeführt. Die Messungen erfolgen sowohl mittels konventionellem Seilmessschieber⁶⁸ sowie eines selbstanlegenden Messschiebers mit Messuhr⁶⁹, s. Abbildung 3.5.

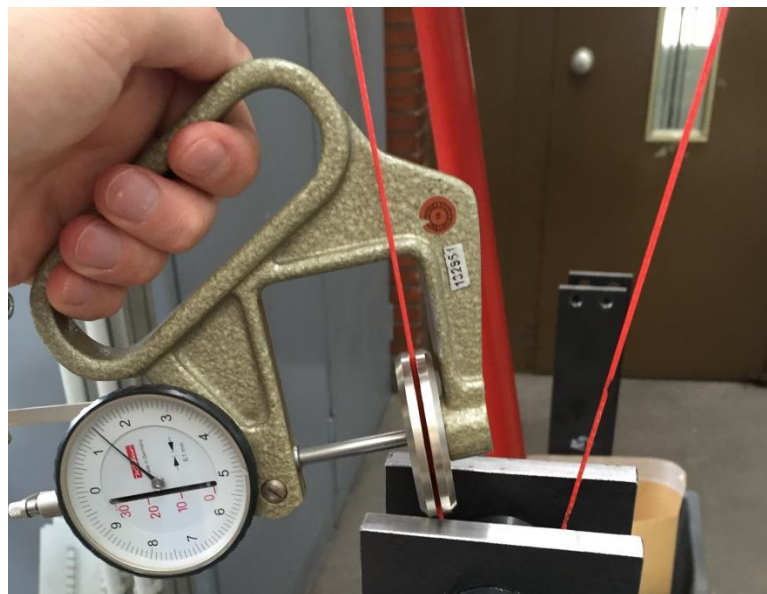


Abbildung 3.5: Selbstanlegender Messschieber mit breiten Messbacken für Faserseile - „Dickenschnellmessgerät“

⁶⁸ Ein Seilmessschieber ist ein (Digital-)Messschieber mit breiten Messbacken, die sich an der Seiloberfläche anlegen und somit sicherstellen, dass der Hüllkreisdurchmesser, welcher dem Seildurchmesser entspricht, gemessen wird.

⁶⁹ sog. Dickenschnellmessgerät

Dieses kalibrierte Messgerät hat gegenüber dem konventionellen Seilmessschieber den Vorteil, dass die Kraft zum Anlegen der Messbacken an das Seil über eine eingebaute Feder erzeugt wird. Die Anpresskraft, die beim Anlegen der Messbacken auf den querdruckempfindlichen Seilkörper aufgebracht wird, ist somit für jede Messung am gleichen Seildurchmesser weitestgehend konstant und unabhängig vom Bediener. Daneben wird in den gleichen Zeitabständen die Oberflächentemperatur des Seils gemessen und dokumentiert. Dabei wird darauf geachtet, dass die Seiltemperatur stets unter dem in [63, 168] festgelegten Wert von $T_{Grenz} = 40 \text{ °C}$ bleibt. Zudem wird der Zustand des Seils in und neben der Biegezone visuell und taktil geprüft und eventuell auftretende Veränderungen oder Auffälligkeiten dokumentiert⁷⁰.

3.3.4. Versuchsaufstellung

Mit der Auswahl der fünf verschiedenen Versuchsseile, mit denen

- drei verschiedene Materialien (Dyneema, Technora, Vectran) in
- zwei unterschiedlichen Durchmessern (2 mm und 6 mm) sowie
- zwei unterschiedlichen Macharten (offenes 12er Geflecht und ummantelte Wire Rope Construction)

abgedeckt werden⁷¹, sind bereits werkstoff-, durchmesser-, sowie konstruktionsbedingte Auswirkungen auf die jeweilige Seillebensdauer verknüpft. Bei der Durchführung von Standard-Biegeversuchen sollen nun aufgrund der großen Palette an Einflussparametern nur ausgewählte Parameter variiert werden.

Für die „dünnen“ Seile mit Nenndurchmesser $d_n = 2\text{mm}$ werden folgende Parameter zur Variation festgelegt:

- Durchführung von Dauerbiegeversuchen mit drei verschiedenen Materialien
 - Dyneema,
 - Technora,
 - Vectran
- mit sieben verschiedenen durchmesserbezogenen Seilzugkräften
 - $\frac{S}{d^2} = 92,8 \text{ N/mm}^2$,
 - $\frac{S}{d^2} = 139,2 \text{ N/mm}^2$,
 - $\frac{S}{d^2} = 185,6 \text{ N/mm}^2$,
 - $\frac{S}{d^2} = 232,0 \text{ N/mm}^2$,

⁷⁰ Zur Dokumentation ist es hilfreich den Seilzustand neben Notizen auch fotodokumentarisch festzuhalten.

⁷¹ vgl. Abschnitt 3.1 Versuchsseile

- $\frac{S}{d^2} = 278,4 \text{ N/mm}^2$,
- $\frac{S}{d^2} = 324,8 \text{ N/mm}^2$,
- $\frac{S}{d^2} = 371,0 \text{ N/mm}^2$.

Bei mindestens dreifacher Durchführung dieser Versuche ergeben sich hieraus mindestens 63 Dauerbiegeversuche, die mit Seilen mit Nenndurchmesser $d_n = 2 \text{ mm}$ durchgeführt werden müssen.

Für die beiden Seile mit Nenndurchmesser $d_n = 6 \text{ mm}$ soll ebenfalls die Seilzugkraft variiert werden. Nach Vorversuchen hat sich jedoch gezeigt, dass bereits bei Seilzugkräften von $S/d^2 = 278,4 \text{ N/mm}^2$ der Sprungpunkt der Seile überschritten ist, die Lebensdauern stark abfallen und somit die Aussagekraft der anderen Variationsparameter nicht mehr gegeben ist. Aus diesem Grund wird die

- durchmesserbezogene Seilzugkraft zu

- $\frac{S}{d^2} = 92,8 \text{ N/mm}^2$
- $\frac{S}{d^2} = 139,2 \text{ N/mm}^2$
- $\frac{S}{d^2} = 185,6 \text{ N/mm}^2$

festgelegt.

Zudem werden folgende Parameter variiert, um deren Einfluss auf die Lebensdauer qualitativ zu erfassen:

- Biegelänge
 - $l = 10 * d$,
 - $l = 30 * d$,
 - $l = 60 * d$,
 - $l = 100 * d$.
- Art der Biegung
 - Gleichsinnige Biegung,
 - Gegensinnige Biegung.
- Achsabstand bei gegensinniger Biegung
 - $15 * d$,
 - $18 * d$,
 - $26 * d$.

Hieraus ergeben sich insgesamt 48 Versuche bei jeweils dreimaliger Wiederholung⁷².

Zudem wurden in Vorversuchen Biegeversuche an Dyneema SK 75 12er-Geflechten mit Nenndurchmesser $d_n = 2,5$ mm durchgeführt. Seile dieser Machart werden beim aktuellen IPAnema Seilroboter der Generation 3.2 eingesetzt.

3.4. Zugschwellversuche

3.4.1. Zugschwellprüfmaschine

Zur Durchführung von experimentellen Zugschwellversuchen und Zugversuchen wird die am Institut für Fördertechnik und Logistik vorhandene Zugschwellprüfmaschine mit einer statischen Höchstzugkraft von 75 kN und einer Kalibrierung entsprechend ISO 7500 Klasse 1⁷³ verwendet.

Am oberen Ende der Prüfmaschine befindet sich ein Querhaupt, das während der Versuchsdurchführung unverschieblich mit dem Maschinenrahmen verbunden ist. Vor Versuchsbeginn kann dieses feste Querhaupt mittels lösbarer Klemmverbindung stufenlos versetzt werden. Somit ist die Länge der Prüflinge in den Grenzen des Maschinenrahmens frei wählbar.

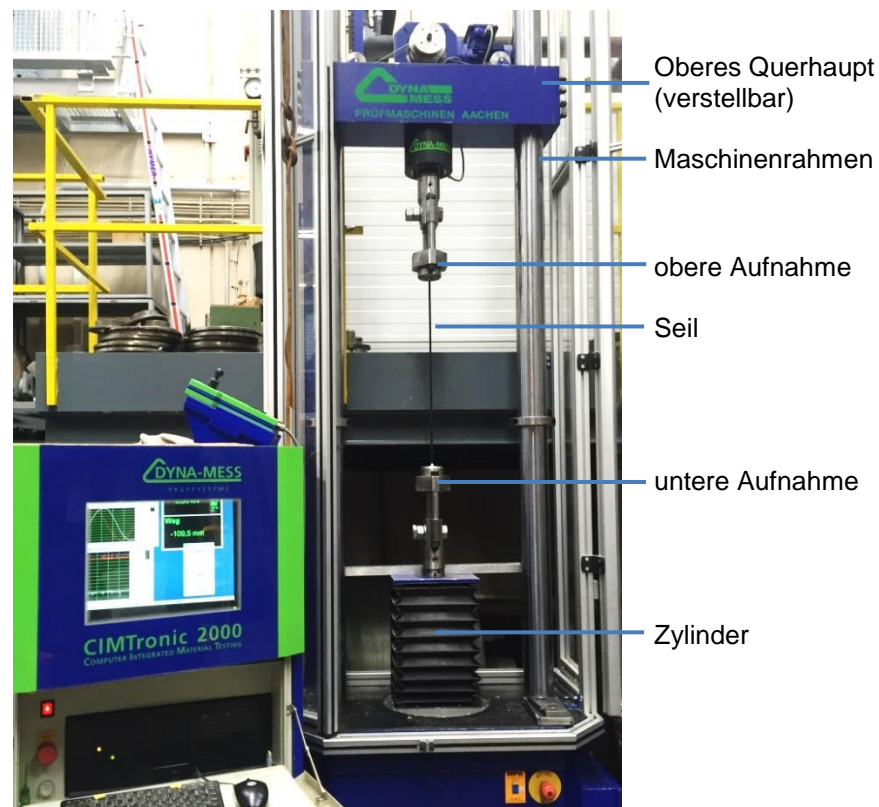


Abbildung 3.6: Zugschwellprüfmaschine mit 75 kN statischer Höchstzuglast

⁷² Die Konzeption dieser Versuchsmatrix entstammt dem Autor. Die Durchführung der Versuche erfolgte in der projektbezogenen und vom Autor eng betreuten Studienarbeit B. Franck [65].

⁷³ Klasse 1 entspricht der höchsten Anforderungsklasse nach EN ISO 7500-1 [88]

Der Zugzylinder ist im unteren Teil der Maschine untergebracht und wird durch eine Hydraulikpumpe versorgt. Kraftaufnahmen und Wegmesseinrichtung sind in der Prüfmaschine integriert. Abbildung 3.6 zeigt die eingesetzte Zugschwellprüfmaschine.

3.4.2. Vorbereitung der Zugschwellversuche

Um die Prüflinge in die Prüfmaschine einbauen zu können benötigt es einer geeigneten Endverbindung. In der Werkstoffprüfung wird hier oft auf die Verwendung von Schulterproben [35] zurückgegriffen, da diese auf Grund der Verjüngung in der Probenmitte nicht an der Einspannstelle versagen und somit ein verfälschender Einfluss der Seilendverbindung ausgeschlossen werden kann. Bei Seilen, die als Endlosmaterial produziert werden, ist die Herstellung solch einer Probe mit veränderlichem Querschnitt praktisch ausgeschlossen. Zudem würde die Verwendung speziell angefertigter Probenkörper die Vergleichbarkeit zu Versuchen mit endlos gefertigtem Seil stören.

Zur Durchführung von Zugversuchen mit Drahtseilen hat es sich seit vielen Jahrzehnten bewährt einen metallischen Kegelveguss gemäß DIN EN 13411-4 [44] als Seilendverbindung einzusetzen. Dabei werden die Drähte eines Seils am Seilende zu einem Besen aufgefächert und die Zwischenräume in einer Kegelform mit flüssigem Metall verfüllt. Bei Beaufschlagung des Seils mit Zugkraft bildet das Vergussmaterial über die schrägen Wandflächen des Kegels Querkraft auf die einzelnen Drähte aus und hält diese somit reibschlüssig fest. Bei der Durchführung von Zugversuchen liegt die Bruchlast des metallischen Kegelvegusses über der Bruchlast des Seils selbst, sodass der Bruch auf der freien Seilstrecke⁷⁴ eintritt.

Als Seilendbefestigung zur Durchführung von Zugschwellversuchen mit Stahldrahtseilen haben sich spezielle Kunststoffseilvergüsse („Wire lock“) als vorteilhaft in Bezug auf den Einfluss auf die Seillebensdauer bewährt, da diese elastischer sind und somit den Anforderungen bei dynamischen Zugschwellversuchen besser genügen [13]. Untersuchungen am IFT haben jedoch ergeben, dass sich diese Art von Seilendverbindung nicht mit ausreichender Zufriedenheit auf hochfeste Faserseile übertragen lässt. Ein Grund hierfür ist die schwierigere Benetzung der sehr feinen Fasern und damit Haftungsprobleme zwischen Vergusswerkstoff und Faser.

DIN EN ISO 2307 [36] empfiehlt für die Zugprüfung von Faserseilen mit einem Nenndurchmesser $d_N < 20\text{mm}$ die Befestigung mittels Umschlingungsklemmen und Spannbacken. Dabei wird ein Großteil der aufgebrachten Zugkraft durch die

⁷⁴ Die freie Seilstrecke beschreibt den Bereich eines Seils, in dem kein Einfluss einer Seilendverbindung oder sonstigen Befestigung herrscht.

Umschlingungen abgebaut [36]. Die Restzugkraft an der nachgelagerten Spannbacke muss dabei so klein werden, dass der Bruch des Seils nicht mehr an der schwächenden Endbefestigung „Spannbacke“ eintritt. Der Abbau der Zugkraft an der Umschlingungsscheibe entspricht der Formel nach Euler [53]-Eytelwein [54]:

$$F_Z \leq F_K * \mu_K * e^{\mu\alpha} \quad (3.1)$$

Allerdings liegt die Bruchkraft der Seilendverbindung mit Umschlingungsscheibe unterhalb der Bruchkraft des Seils, weshalb der Bruch nicht in der freien Seillänge, sondern am Auflaufpunkt des Seils auf die Scheibe eintritt. Des Weiteren finden während des Versuchs Setzbewegungen auf der Scheibe statt, was zu Relativbewegungen zwischen den Fasern führt. Dies ist für statische Zugprüfungen an Faserseilen nicht ausschlaggebend, führt aber dazu, dass der Einsatz von Umschlingungsscheiben für dynamische Untersuchungen ungeeignet ist.

Bislang existieren keinerlei Empfehlungen und somit auch keinerlei Normen für die Erstellung einer Endverbindung für Faserseile zur Durchführung von Zugschwellversuchen an Faserseilen.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine andere Art der Seilendverbindung für Faserseile zur Durchführung von Zugschwellversuchen erprobt und angewandt⁷⁵. Als Basis hierfür dienen die bereits bekannten und erforschten kegeligen Endverbindungen für Stahldrahtseile. Diese werden jedoch entsprechend den spezifischen Eigenschaften hochfester Faserseile modifiziert und weiter entwickelt.

Fächert man ein Stahlseil, wie in DIN EN 13411-4 [44] beschrieben, zu einem Besen auf, bei dem sich die Drähte größtenteils nicht mehr berühren, so verbleiben die biegesteifen Drähte ohne Vorspannung und unabhängig von der Orientierung im Raum in dieser Ausrichtung. Die aufgefächerten Garne biegeweicher Faserseile legen sich unter Einwirkung ihrer Gewichtskraft aneinander an und verbleiben nicht in ihrer auseinandergefächerten Ausrichtung. Dies führt dazu, dass sich die aufgefächerten Garne eines Faserseils in einer Form zur Erstellung eines Kegelvergusses nicht gleichmäßig verteilen und somit weder einheitlich mit Vergussmasse umschlossen werden können, noch gleichmäßig zum Tragen kommen. Untersuchungen im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekt HIKE⁷⁶ (FOR 981), dass sich unter anderem mit der

⁷⁵ Die Konzeption und Erprobung der 2K-Kegelendverbindung wurde vom Autor durchgeführt. Die Herstellung der Vergüsse und Durchführung von Zugschwellversuchen erfolgte nach Unterweisung in die Produktionsmethodik im Rahmen der vom Autor entworfenen und eng betreuten Studienarbeit [93].

⁷⁶ HIKE ist die Abkürzung für Hybride Intelligente KonstruktionsElemente

Das Faserseil (1) tritt über eine dem Seildurchmesser angepasste Hülse (2) in die Vergussform (5) ein. Um zu verhindern, dass Vergussmaterial aus der Form austritt, ist die Hülse mit Dichtwerkstoff (3) verfüllt. Das Seil wird über die Hülse zentriert und koaxial geführt. Im Bereich der Vergusskammer ist das Faserseil bereits zu einem Besen⁷⁷ aufgefächert (4), bevor die 12 Garne die Vergussform über eine Scheibe mit symmetrisch angeordneten Bohrungen, dem sogenannten Garnhalter (6), wieder die Vergussform verlassen. Eine ähnliche Form des Garnhalters, allerdings für Drähte beim Verguss von Stahlseilen, wird in [5] in Form von zwei Lochplatten beschrieben. Nach dem Austritt aus der Vergussform werden die einzelnen Litzen über Klemmen mit der nötigen Vorspannkraft vorgespannt (7). Anschließend kann die Form geschlossen und das Vergussmaterial über eine zentrale Bohrung im Garnhalter injiziert werden. Nach der Erprobung verschiedener Vergussmaterialien stellt sich ein Epoxidharz L mit zugehörigem Härter L des Herstellers R+G [135] mit einer Aushärtezeit von 24 Stunden als am geeignetsten heraus, weshalb es für die Durchführung der weiteren Versuche verwendet wird.

In Abbildung 3.8 sind fertig ausgehärtete und bereits teilweise entformte Kunststoff-Kegelvergüsse dargestellt, wobei die Abbildung rechts einen misslungenen Kegelverguss zeigt, bei dem die Vorspannung versagt hatte, weshalb die Garne unregelmäßig orientiert vorliegen.

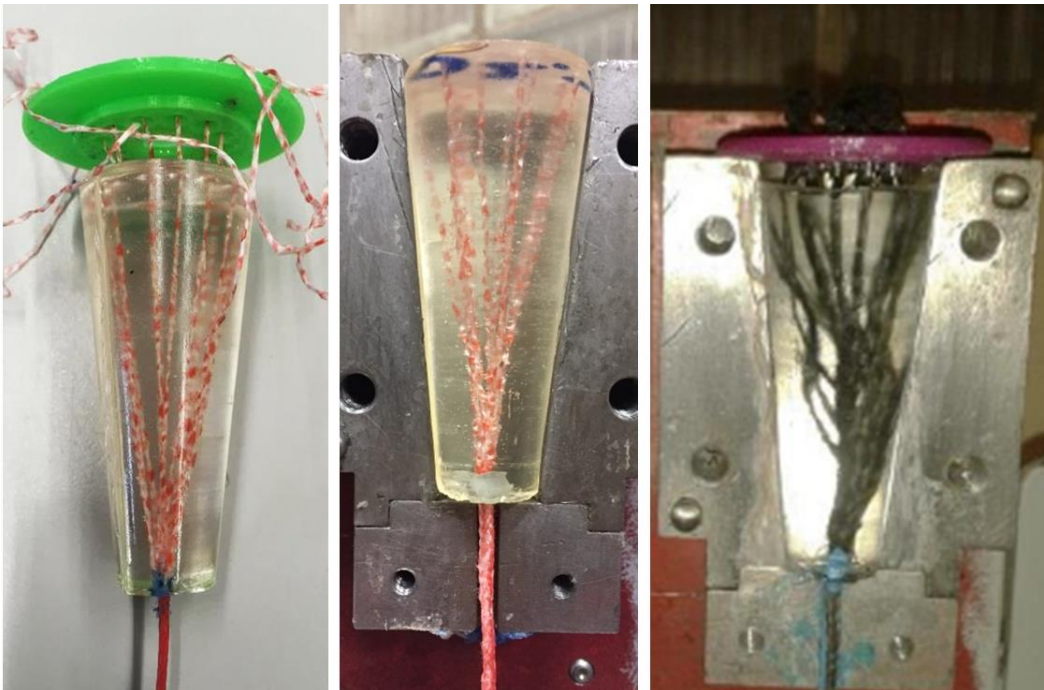


Abbildung 3.8: Ausgehärteter Kunststoff-Kegelverguss mit (Links, Mitte) und ohne Vorspannung (Rechts)

⁷⁷ Das Gebilde, das sich durch Auffächern von Drähten oder Garnen ergibt, wird auf Grund seiner Erscheinungsform als „Besen“ bezeichnet, vgl. [44]

Zur Aufnahme der Prüfkörper in die vorgestellte Zugschwellprüfmaschine⁷⁸ werden konische Aufnahmen⁷⁹ verwendet, in die sich die Kunststoff-Kegelvergüsse mittels konischer Halbschalen formschlüssig einsetzen lassen.

Die Länge der Prüflinge wird für alle Versuche identisch gewählt. Nach Chaplin [22][23] wird eine freie Länge zwischen den Seilendverbindungen von mindestens dem Zehnfachen der Schlaglänge empfohlen. Auf Grund der geringen Seildurchmesser wird die freie Länge L der Prüflinge jedoch auf das Hundertfache des größten Seildurchmessers festgelegt. Hieraus ergibt sich eine freie Länge der Prüflinge von

$$L = 100 * d_{max} = 100 * 6 \text{ mm} = 600 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Die Prüflänge von $L = 600$ mm entspricht zudem gut den Einstellmöglichkeiten der eingesetzten Zugschwellprüfmaschine.

3.4.3. Durchführung der Zugschwellversuche

Sämtliche Belastungen, denen ein Seil während eines Zugschwellversuchs unterliegt, haben Einfluss auf die Lebensdauer des Seils. Feyrer untersucht in [59] durch systematische Variation der Parameter den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Lebensdauer zugschwellbelasteter Stahlseile und fasst sie in einer Gleichung zusammen. Durch diese Vorgehensweise wird eine möglichst genaue Untersuchung verschiedener, sich teilweise gegenseitig beeinflussender Parameter, ermöglicht. Durch die Wahl der Prüfmethode kann die Anzahl der für belastbare Aussagen notwendigen experimentellen Versuche klein gehalten werden. Im Vergleich zu Mehrstufenschwingversuchen⁸⁰ erlauben Einstufenschwingversuche⁸¹ bei der Variation mehrerer Parameter eine wesentlich bessere Vergleichbarkeit der experimentell erzielten Ergebnisse. Hieraus resultiert die Entscheidung alle Zugschwellversuche als Einstufenschwingversuche durchzuführen. Der dynamische Zuglastanteil wird in Form einer ungedämpften, sinusförmigen Schwingung auf die zu prüfenden Seile aufgebracht. Nach Merziger und Wirth wird die erzeugte Schwingung mit folgender Gleichung (3.3) beschrieben [112]:

$$S(t) = S_m + \left(S_a * \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right) + \delta \right) \quad (3.3)$$

⁷⁸ vgl. Abschnitt 3.4.1 Zugschwellprüfmaschine

⁷⁹ vgl. Abbildung 3.6: Zugschwellprüfmaschine mit 75 kN statischer Höchstzuglast

⁸⁰ Mehrstufenschwingversuche bestehen aus aneinandergereihten Einstufenschwingversuchen mit veränderlichen Parametern.

⁸¹ Der Einstufenschwingversuch dient zur Bestimmung der Schwingfestigkeit eines Bauteils

Unter Verwendung der zuvor vorgestellten Versuchsseile unterschiedlicher Materialien, Konstruktionen und Durchmesser⁸² sollen zur Durchführung der Zugschwellversuche vor dem Forschungshintergrund der hochdynamischen Beanspruchung zudem die folgenden Parameter variiert werden.

Aus einer Vielzahl an Untersuchungen an zugschwellbelasteten Seilen ist bekannt, dass sowohl die durchmesserbezogene Schwingweite $2S_o/d^2$ sowie die durchmesserbezogene Unterlast S_u/d^2 bzw. die **durchmesserbezogene Ober- und Unterlast S_o/d^2 und S_u/d^2** einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer haben. Aus diesem Grund werden die Zugschwellversuche bei zwei unterschiedlichen Belastungen gefahren, die der Versuchsmatrix in Abbildung 3.9 entnommen werden können. Die durchmesserbezogene Ober- und Unterlast S_o/d^2 und S_u/d^2 orientiert sich dabei stets am gleichen Anteil der vom Hersteller angegebenen Mindestbruchkraft F_{min} und wird zum einen zu 15 % / 30 % F_{min} und zum anderen zu 30 % / 50 % F_{min} festgelegt. Die Mindestbruchkräfte der drei untersuchten Seile mit Nenndurchmesser $d_n = 2$ mm liegen zahlenmäßig äußerst nah beieinander, weshalb es hier zulässig ist die Versuche bei identischen Ober- und Unterlasten zu durchzuführen.

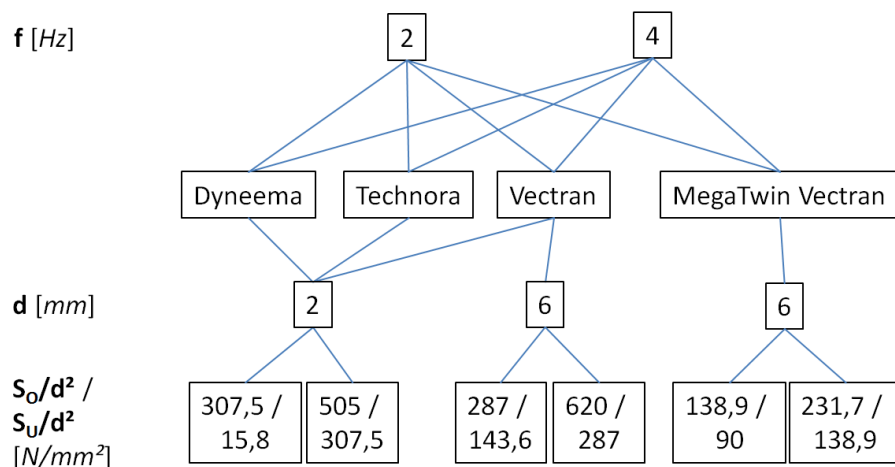


Abbildung 3.9: Versuchsmatrix zur Durchführung der Zugschwellversuche

Zur Untersuchung des dynamischen Einflusses bei der Durchführung der Zugschwellversuche wird zudem die **Prüffrequenz f [Hz]** variiert. Dabei soll die Prüffrequenz möglichst hoch gewählt werden, um der zu untersuchenden hohen Dynamik gerecht zu werden. Nach der Belastungsgrenze der Zugschwellprüfmaschine und deren Reglern wird die maximal mögliche Prüffrequenz von $f_{max} = 4$ Hz als Obergrenze gewählt. Die untere Prüffrequenz wird zu 50 % der oberen Prüffrequenz zu $f_{min} = 2$ Hz gewählt. Wie bei allen Versuchen an HM-HT-

⁸² vgl. Abschnitt 3.1 Versuchsseile

Faserseilen wird dabei darauf geachtet, dass die Seiltemperatur die kritische Grenztemperatur von $T_{Grenz} = 40 \text{ °C}$ nicht übersteigt⁸³. Dies wird während der kompletten Versuchslaufzeit überwacht und dokumentiert.

Das Versuchsende wird so festgelegt, dass der Versuch entweder bei Erreichen des Ablegekriteriums Seilbruch oder nach Überschreiten des Zeitfestigkeitsbereichs beendet wird. Als Zeitfestigkeit wird dabei $N \geq 0,5 * 10^6$ Schwingspiele festgelegt.

3.5. Ermittlung der Bruchkraft

Um neben anderen Kennwerten die Bruchkraft eines Seils zu ermitteln, werden sogenannte Zugversuche durchgeführt. Das Ergebnis eines Zugversuchs wird in einem Kraft-Weg-Diagramm bzw. in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Zur Einleitung der Kraft in das Seil kommen dabei Seilendbefestigungen zum Einsatz. Hierzu stehen beim Einsatz von Stahlseilen eine Vielzahl lösbarer und unlösbarer Seilendbefestigungen zur Auswahl [166]. Zur Ermittlung der Bruchkraft eines Seils muss die Bruchkraft der Seilendbefestigung die Bruchkraft des Seils übersteigen. Diese Forderung wird beim Einsatz von Stahldrahtseilen ausschließlich vom Kegelveguss nach DIN EN 13411-4 [44] erfüllt. Als Vergussmasse kann hierbei neben bestimmten Metalllegierungen auch spezielles 2-Komponenten-Kunstharz eingesetzt werden. Die Herstellung von Kegelvegüssen ist aufwändig und bedarf einem großen Zeitaufwand, Fachwissen sowie spezieller technischer Geräte und Apparaturen. Wie in Abschnitt 3.4.2 bereits ausgeführt existiert für Faserseile bislang keine äquivalente Seilendbefestigung, die 100 % der Bruchkraft des Seils ertragen kann, weshalb sich zumeist mit der in DIN EN ISO 2307 [36] beschriebenen Verwendung von Umschlingungsklemmen⁸⁴ beholfen wird.

Im Rahmen des Forschungsprojekts HIKE wurde dieser Mangel⁸⁵ erkannt und eine Seilendverbindung entwickelt, die 100 % der Seilbruchkraft ertragen kann [182]. Die Herstellung sowie der Einsatz der HIKE Endverbindung im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden im Folgenden Abschnitt erläutert.

3.5.1. Vorbereitungen zur Ermittlung der Bruchkraft

Wie bereits in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, werden sämtliche Zugschwellversuche im Rahmen dieser Arbeit mit der eigens entwickelten Epoxidharz-Kegelvebindung in Anlehnung an DIN EN 13411-4 [44] durchgeführt. Es wird vermutet, dass die Epoxidharz-Kegelvebindung ein gutes Verhältnis zwischen wirklicher Bruchkraft des Seils und ermittelter Bruchkraft ergeben wird. Zur Absicherung der erzielten

⁸³ vgl. Abschnitt 3.3.3 Durchführung der Dauerbiegeversuche

⁸⁴ „Chors de Chasse“

⁸⁵ Michael bezeichnet in [113] die Endverbindung als „Maßstab für die Dimensionierung textiler Zug- und Tragelemente“

Ergebnisse werden zusätzlich Prüfkörper mit HIKE-Endverbindung angefertigt und einer Bruchkraftprüfung unterzogen. Die Systematik und die Einteilung der zur Ermittlung der Mindestbruchkraft eingesetzten Seilendverbindungen ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

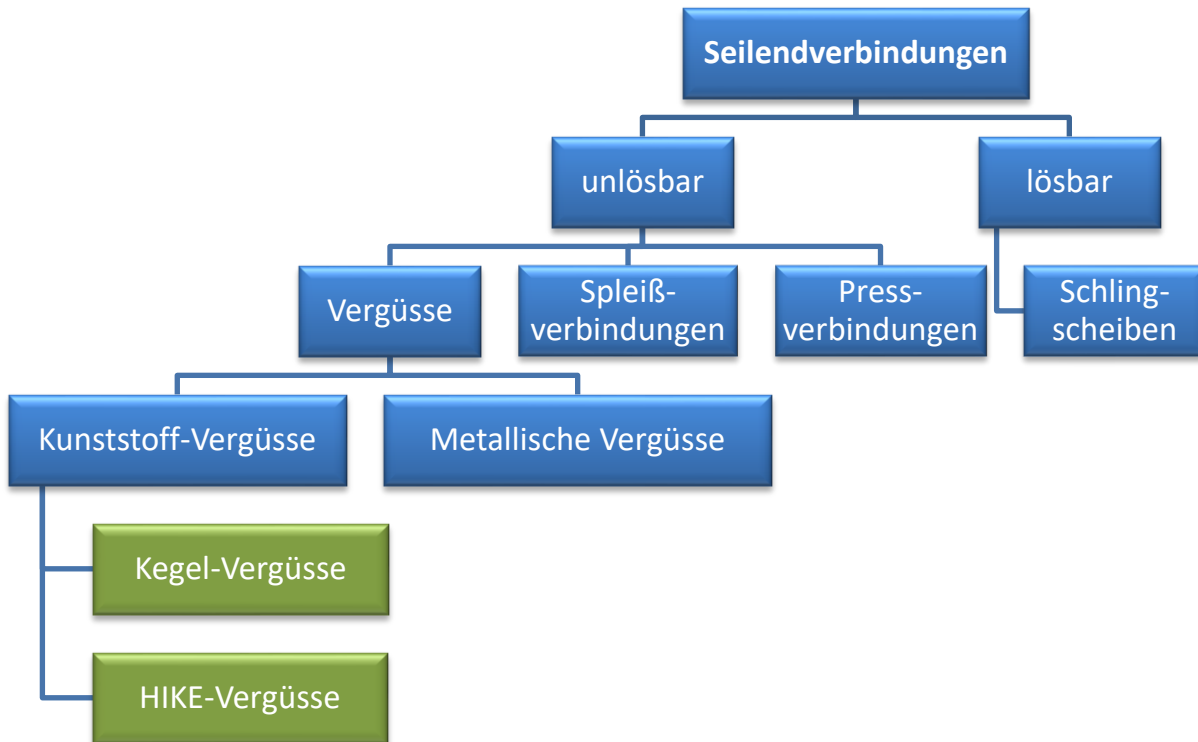


Abbildung 3.10: Systematik der für Versuche zur Ermittlung der Mindestbruchkraft eingesetzten Seilendverbindungen

Bei der Seilendverbindung des HIKE-Vergusses handelt es sich um eine patentierte, angegossene, monolithische Seilendverbindung, deren Funktion über eine neuartige Geometrie in Kombination mit einem speziellen Harz realisiert wird. Die Verbindung zur umgebenden Struktur wird nicht über eine den Verguss umfassende, massive Kegelhülse, sondern über eine kleine eingegossene Hülse in Kombination mit einem externen Bolzen realisiert. Abbildung 3.11 zeigt einen fertig ausgehärteten und bereits entformten HIKE-Verguss an einem hochfesten Faserseil mit Nenndurchmesser von $d_n = 2$ mm.



Abbildung 3.11: HIKE-Verguss an einem 2 mm HM-HT-Faserseil

3.5.2. Durchführung der Versuche zur Ermittlung der Bruchkraft

Nach DIN EN 12385-1 ist die wirkliche Bruchkraft F_w^{86} eines Seils die Kraft, bei der keine weitere Erhöhung der Kraft auf das Seil erfolgen kann, das Seil die anliegende Kraft nicht mehr ertragen kann und es zum Bruch des Seils kommt [34].

Die Durchführung von Zugversuchen an Chemiefasenseilen wird in DIN EN ISO 2307 [36] beschrieben. Dabei ist nach Tabelle 1 für Seile mit Nenndurchmesser $d_N \leq 10 \text{ mm}$ eine effektive Mindestlänge der Prüflinge von $L_U = 400 \text{ mm}$ festgelegt. Zur Messung der Bruchkraft ist die Prüfgeschwindigkeit mit $250 \pm 50 \text{ mm/min}$ festgelegt. Diese Bestimmung rührt aus der Entstehung der Norm, bei der die Festlegungen hauptsächlich für Chemiefasern mit sehr großen Dehnungen, wie sie beispielsweise im Bergsport verwendet werden, erfolgten. In Anbetracht der sehr geringen Dehnungen von HM-HT-Fasenseilen und der Tatsache, dass während eines Zerreiversuchs Setzvorgänge im Seil stattfinden, die Zeit benötigen, erscheint dem Autor die in [36] festgelegte Prüfgeschwindigkeit als deutlich zu groß. Bei der Verwendung dieser hohen Prüfgeschwindigkeit besteht die Gefahr die Prüfergebnisse, vor allem bei der Verwendung sehr dünner Seile, zu verfälschen. Dementsprechend wird für alle Zerreiversuche eine Prüfgeschwindigkeit von 10 % der in [36] maximal möglichen Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min, d.h.

$$0,1 * 300 \text{ mm/min} = 30 \text{ mm/min} \quad (3.4)$$

festgelegt und angewandt. Um auch bei den Prüflingen, die vor dem Zerreiversuch keiner Zugschwellbelastung ausgesetzt waren, ein bruchkraftbegünstigendes Setzverhalten zu ermöglichen werden diese vor der Durchführung des Zerreiversuchs einer dreimaligen zyklischen Schwellung zwischen 10 % und 30 % der F_w -Angabe des Herstellers ausgesetzt.

3.6. Hochdynamikversuche

3.6.1. Hochdynamikprüfstand und Prüfmethodik

In Seiltrieben werden laufende Seile üblicher Weise mit konstanten Geschwindigkeiten verfahren. Hierzu wird der Seiltrieb auf eine gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt, die dann bis zum Verzögerungsvorgang zu Ende des Bewegungsablaufs beibehalten wird. Im Dauerbiegeversuch, wie er standardmäßig zur experimentellen Bestimmung der Seillebensdauer durchgeführt wird, werden klassischer Weise Koppelgetriebe mit Schubkurbelantrieb eingesetzt. Hierbei dreht die Antriebsmaschine mit konstanter Drehzahl, was zu einer sinusartigen Bewegung

⁸⁶ F_w = Wirkliche Bruchkraft. Die F_w beschreibt die experimentell bestimmte Last, die das Bauteil tatsächlich in Prüfstandsbedingungen erträgt.

der Antriebs- bzw. Prüfscheibe führt, bei der sich Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck ständig über der Position der Kurbelschwinge ändern. Abbildung 3.12 zeigt den prinzipiellen Bewegungsablauf einer klassischen Dauerbiegemaschine mit Schubkurbelantrieb.

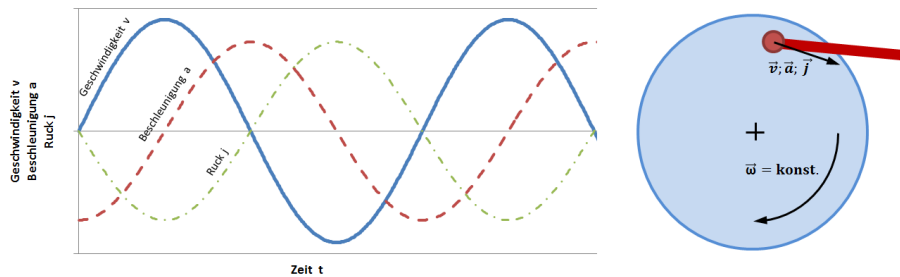


Abbildung 3.12: Bewegungsablauf bei klassischen Dauerbiegemaschinen mit Schubkurbelantrieb

Aus Biegelänge und Biegefrequenz kann lediglich eine mittlere Geschwindigkeit v_{eff} eingestellt werden, die jedoch zu keinem Zeitpunkt konstant anliegt. Es gilt:

$$v_{eff} = 2 * f_b * l_b \quad (3.5)$$

Eine exakte Variation der Parameter Geschwindigkeit und Beschleunigung und damit eine detaillierte und praxisnahe Untersuchung dieser Parameter ist somit mit einer klassischen Dauerbiegemaschine mit Schubkurbelantrieb nicht möglich. Zudem lassen sich mit klassischen Dauerbiegemaschinen Biegegeschwindigkeiten von maximal $v \approx 0,2$ m/s erreichen, was den in dieser Arbeit zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereich von schnelllaufenden Seilen von bis zu $v \approx 10$ m/s nicht einmal annähernd abdeckt. Die alleinige Variation der Seilbeschleunigung ist mit klassischen Dauerbiegemaschinen ohnehin nicht möglich. Aus diesen und weiteren, meist konstruktiven, Gründen wird am IFT im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens ein völlig neuartiger Prüfstand⁸⁷ konzipiert, konstruiert und erstellt, mit dem die hohen dynamischen Anforderungen bei der Prüfung schnelllaufender Faserseile vollumfänglich abgedeckt werden können. Abbildung 3.13 zeigt ein Modell dieses neuen Hochdynamik-Prüfstands.

⁸⁷ Der Prüfstand wurde vom Autor konzipiert und in der projektbezogenen und vom Autor betreuten Bachelorarbeit [20] konstruiert (verwendetes CAD-Programm: Autodesk Inventor 2014)

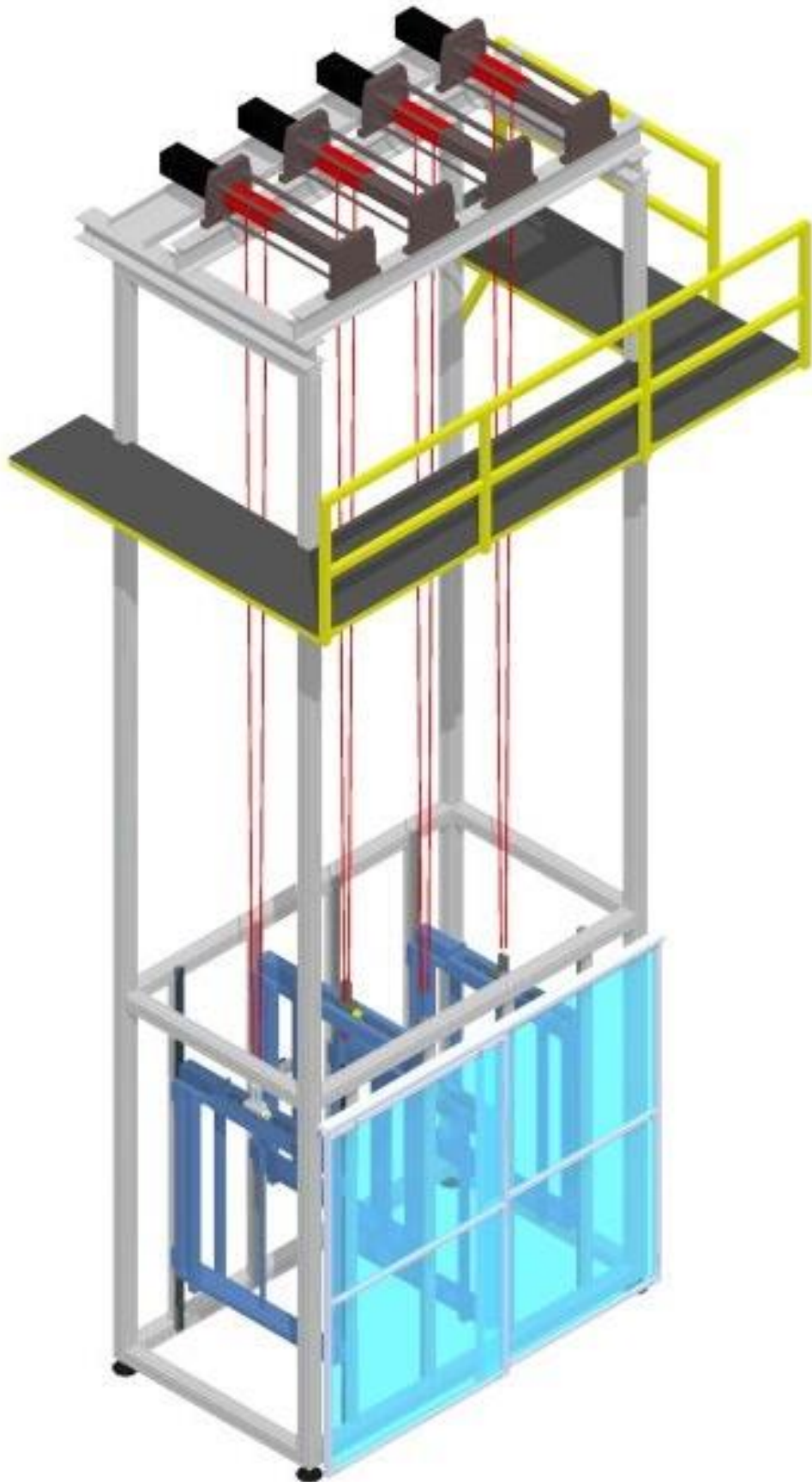


Abbildung 3.13: Modell des Hochdynamik-Prüfstands

Der Prüfstand verfügt über vier unabhängige Prüfstellen, wobei zwei der Prüfstellen zur Prüfung von Seilen mit Nenndurchmesser $d_n = 2$ mm und die anderen beiden für Seile mit $d_n = 6$ mm vorgesehen sind. Zur Minimierung des Platzbedarfs ist die Prüflänge der Seile in die Vertikale verlagert. Die Antriebe sitzen auf einem Maschinenrahmen, der in 6,50 m Höhe angebracht ist. Pro Prüfstelle treibt je ein Servomotor eine Winde an, auf der ein Seil einlagig getrommelt wird. Bei den Winden handelt es sich um originale Seilroboter-Winden, wie sie im IPAnema 3.2 des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung⁸⁸ eingesetzt werden [96]. Durch die Verwendung originaler Seilroboter-Komponenten wird die praxisnahe und anwendungsorientierte Forschung abermals unterstrichen. In Abbildung 3.14 ist zu ersehen, wie die vier Winden inklusive Antriebsstrang, d.h. Servomotor und Stirnradgetriebe auf der obersten Ebene des Hochdynamikprüfstands angebracht sind.



Abbildung 3.14: Windenantriebe des Hochdynamikprüfstands

Durch den Einsatz von kompakten Winden anstelle großer Antriebsscheiben, wie sie sonst in Dauerbiegemaschinen zur Einleitung der Bewegung in das Seil eingesetzt werden, wird das Trägheitsmoment antriebsseitig minimiert und somit eine hohe Dynamik begünstigt. Gleichzeitig wird auf Grund der hohen Prüfgeschwindigkeiten und damit verbunden der teils langen Beschleunigungs- und Bremswege eine große Prüflänge benötigt. Durch die Höhe des Prüfstands wird eine maximale Prüflänge zwischen Winde und Prüfscheibe von 4700 mm erreicht, was zur Folge hat, dass 2 x 4700 mm Seil zzgl. Endbefestigung gespeichert werden muss. Auch diese Forderung lässt sich durch den Einsatz von Winden optimal erfüllen. Das Seil wird auf die

⁸⁸ vgl. Abschnitt 2.1 Seilroboter

Seilwinde aufgetrommelt, verlässt sie nach einer gewissen Anzahl Windungen, läuft um eine Prüfscheibe, die auf einem Gewichtskorb im unteren Teil des Turms angebracht ist und läuft zurück auf die Winde, wo es wieder befestigt wird. Durch Drehung der Winde wird das Seil parallel auf- und abgespult und gleichzeitig einer Biegung um die Prüfscheibe unterworfen. Allerdings werden Ab- und Auflaufpunkt des Seils auf der Winde dabei axial verschoben, was ohne Kompensation zu Schrägzug des Seils an der Prüfscheibe führen würde. Der schädigende Einfluss solchen Schrägzugs ist beispielsweise von Schönherr [150] für Stahlseile und Novak, Winter & Wehking [127] für Faserseile nachgewiesen worden. Aus diesem Grund wird die Prüfscheibe analog zum Ab- und Auflaufpunkt des Seils auf der Winde axial verschoben. Die Prüfscheibe ist hierzu auf einem Lagerbock angebracht, der über eine Servomotor-Spindeltrieb-Einheit verfahren wird. Die Synchronisierung von Windenantrieb und diesem Verlege-Antrieb erfolgt über eine zentrale Steuereinheit. Der Gewichtskorb, auf dem die Prüfscheibenlagerung und Verlegeeinheit angebracht ist, wird dabei über reibungsarme Linearführungen gestützt. Abbildung 3.15 zeigt ein Detail dieser Konstruktion.

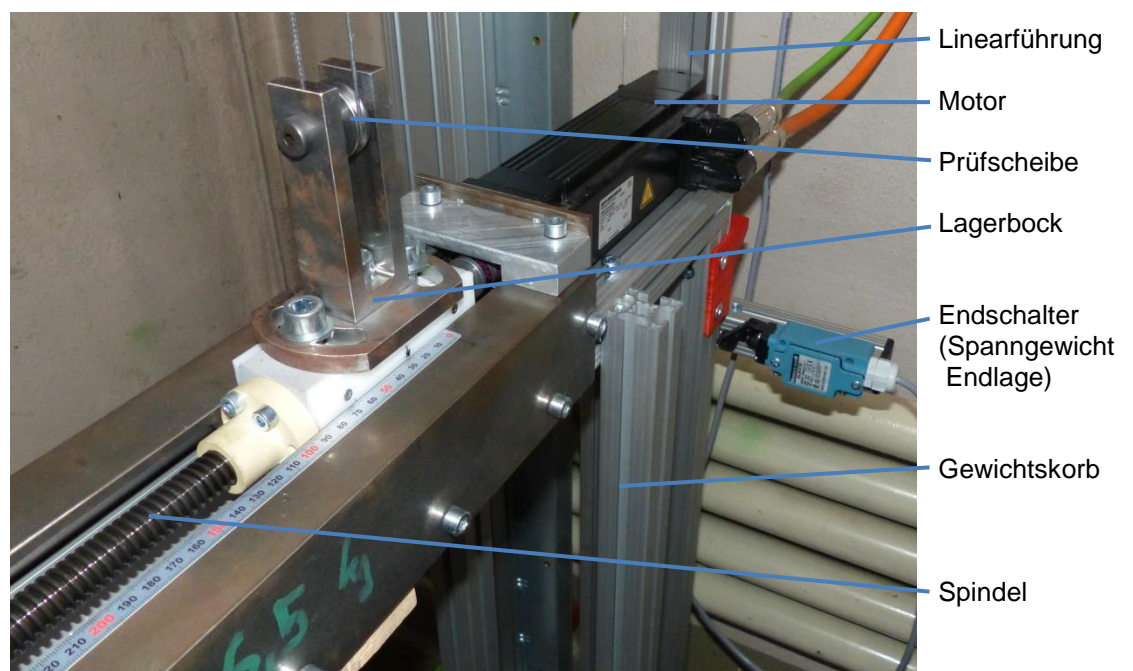


Abbildung 3.15: Verlegeeinheit zur Schrägzugkompensation mit Prüfscheibe

In Abbildung 3.16 ist der untere Teil des Prüfstands mit den vier Gewichtskörben mit jeweils Verfahrenheit, Linearführungen, Endschaltern und kompletter Prüfscheibenhalterung dargestellt.



Abbildung 3.16: Gewichskörbe des Hochdynamikprüfstands mit Linearführungen, Schrägzugkompensation und Prüfscheiben

Mit diesem Versuchsaufbau unterscheidet sich der Hochdynamikprüfstand von Standard-Dauerbiegemaschinen in zwei Punkten ganz wesentlich.

Zum einen lassen sich durch die Speicherung der Seile auf Winden sehr lange Biegelängen realisieren, bei denen trotz veränderlichem Ab- und Auflaufpunkt auf der Winde praktisch kein Schrägzug in den Versuchsablauf eingebracht wird.

Zum anderen ermöglicht das Antriebskonzept eine vollkommen variable Einstellung des Versuchsaufbaus. Der Bewegungsablauf der FU-gesteuerten⁸⁹ Antriebsmotoren lässt sich in der angeschlossenen Steuerung frei einprogrammieren. Hierzu werden die folgenden Parameter hinterlegt:

- Verfahrweg (des Seils) s in $[mm]$
- Nenn-Geschwindigkeit (des Seils) v_n in $[mm/s]$
- Nenn-Beschleunigung (des Seils) a_n in $[mm/s^2]$
- Ruck j in $[1/s^3]$

Der Verfahrweg s entspricht dabei dem Seilhub h (vgl. Abbildung 3.2) eines Standard-Dauerbiegeversuchs, wobei der Umschlingungswinkel u auf Grund der

⁸⁹ FU = Frequenzumrichter. Ein Stromrichter, der eine Eingangs-Wechselspannung in Frequenz und Amplitude variabel ändert.

langen Biegelängen um ein Vielfaches kleiner ist als h , was dazu führt, dass ausschließlich Doppelbiegeversuche durchgeführt werden. Es gilt

$$u \ll h \quad (3.6)$$

$$h = s \quad (3.7)$$

Das prinzipielle Bewegungsprofil, das mit diesen Einstellwerten erzeugt werden kann, ist in Anlehnung an [51] in Abbildung 3.17 dargestellt.

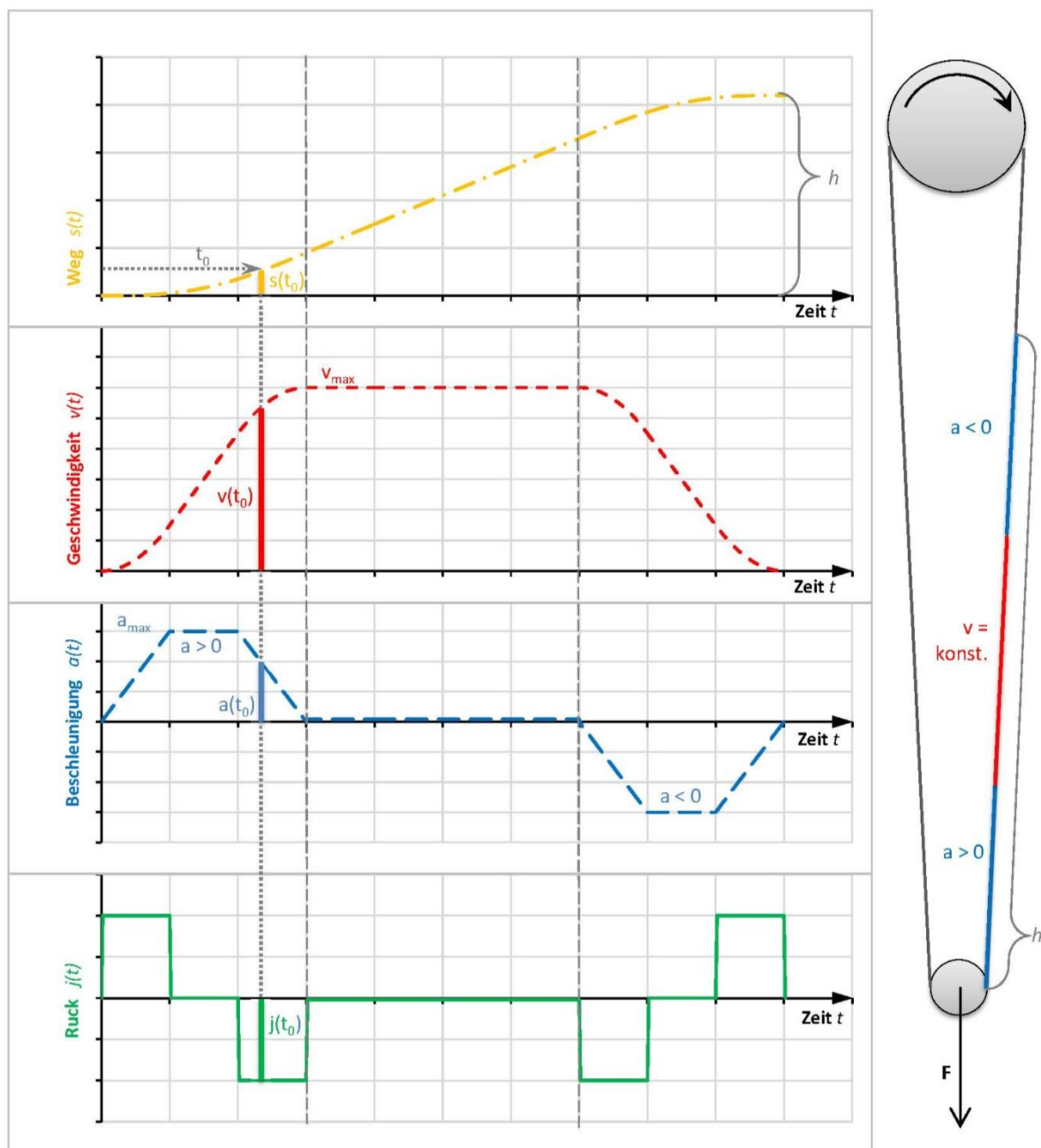


Abbildung 3.17: Veränderliches Bewegungsprofil des Hochdynamikprüfstands

Die jeweils nachfolgende Größe lässt sich aus Integration der darüber stehenden bilden. Es gilt

$$\vec{v}(t) = \frac{ds(t)}{dt} \quad (3.8)$$

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \vec{v} = \frac{d^2\vec{s}(t)}{dt^2} \quad (3.9)$$

$$\vec{j}(t) = \frac{d\vec{a}(t)}{dt} = \vec{a} = \frac{d^3\vec{s}(t)}{dt^3} \quad (3.10)$$

Um die Nennbeschleunigung a_n so schnell als möglich zu erreichen wird der Ruck j so groß wie möglich gewählt. Limitierender Faktor ist dabei die Einstellmöglichkeit des Regelkreises, der trotz einer elastischen Klauenkupplung im Antriebsstrang und sehr hoher Dynamik ein Überspringen der Antriebe vermeiden muss.

3.6.2. Parameter der Hochdynamikversuche

Das Hauptaugenmerk soll auf der Variation der beiden Parameter

- Nenn-Seilgeschwindigkeit v_n in $[mm/s]$ und
- Nenn-Seilbeschleunigung a_n in $[mm/s^2]$

liegen. Zudem sollen die Dynamikversuche mit den fünf in Abschnitt 3.1 vorgestellten Seilen durchgeführt werden, mit denen gleichzeitig drei unterschiedliche Seilwerkstoffe, zwei verschiedene Durchmesser sowie zwei unterschiedliche Konstruktionen abgedeckt werden.

Ein Großteil der klassischen Variationsparameter, wie beispielsweise durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2 oder Art der Biegung wird bereits mit den Standard-Dauerbiegeversuchen⁹⁰ aus Abschnitt 3.3.4 abgedeckt, weshalb diese in den Dynamikversuchen nicht weiter variiert werden sollen.

Zur Durchführung der Dynamikversuche soll zudem die gleiche Prüfscheibengeometrie wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben eingesetzt werden. Lediglich die Prüfscheibenlagerung wird auf Grund der hohen Dynamikanforderungen angepasst.

Gleichbleibende Parameter für alle durchzuführenden Dynamikversuche sind damit:

⁹⁰ Als Standard-Dauerbiegeversuch wird der Biegeversuch in einer konventionellen Dauerbiegemaschine (vgl. Abschnitt 3.3.1) bezeichnet.

Parameter	Wert	Einheit
Durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2	93	N/mm ²
Durchmesserverhältnis D/d	15	-
Relativer Rillenradius r/d	0,51	-
Trägheitsmoment Prüfscheiben		
J_{2mm}	11,45	kgmm ²
J_{6mm}	1413,27	kgmm ²
Temperatur Seiloberfläche T_O	< 40	°C

Tabelle 3.4: Konstante Versuchsparameter

Entsprechend der Aufgabenstellung des dieser Arbeit zu Grunde liegenden Forschungsvorhabens WE 2187/29-1 [180] und den maximalen Arbeitsbereichen parallelkinematischer Seilroboter [133] sollen die beiden Dynamikparameter Geschwindigkeit v und Beschleunigung a in weiten Bereichen von

- $v = 1 \dots 10 \text{ m/s}$
- $a = 10 \dots 100 \text{ m/s}^2$

variiert werden, wobei die Einflüsse dieser beiden verwandten Parameter unabhängig voneinander untersucht werden müssen. Für die beiden Versuchsparameter werden folgende Schritte festgelegt:

- $v_n = 1 \text{ m/s}$, $v_n = 3 \text{ m/s}$, $v_n = 5 \text{ m/s}$, $v_n = 7,5 \text{ m/s}$, $v_n = 10 \text{ m/s}$.

sowie

- $a_n = 10 \text{ m/s}^2$, $a_n = 50 \text{ m/s}^2$, $a_n = 100 \text{ m/s}^2$

Die kleinste Seilnennbeschleunigung übersteigt dabei bereits die Erdbeschleunigung⁹¹. In Kombination mit den fünf zuvor beschriebenen Seiltypen ergeben sich hieraus zunächst 75 Einzelversuche, die durch zahlreiche Wiederholungsversuche gestützt werden⁹². Falls sich Ergebnisse der Einzelversuche gegenseitig stützen und eine sehr geringe Streuung aufweisen, lässt sich die Versuchsanzahl auf ein Minimum beschränken.

⁹¹ $g = 9,81 \text{ m/s}^2 < a_{min} = 10 \text{ m/s}^2$

⁹² Bei den beiden Versuchen mit höchster Geschwindigkeit und niedrigster Beschleunigung ($v_n = 7,5 \text{ und } 10 \text{ m/s}$, $a_n = 10 \text{ m/s}^2$) übersteigt die sich ergebende Biegelänge l_b die im Hochdynamikprüfstand verfügbare freie Seillänge von 4700 mm, weshalb bei diesen beiden Versuchen die niedrigste Beschleunigung zu $a_n = 20 \text{ m/s}^2$ für $v_n = 7,5 \text{ m/s}$ bzw. $a_n = 30 \text{ m/s}^2$ für $v_n = 10 \text{ m/s}$ festgelegt und somit die Biegelänge l_b begrenzt wird.

Die Biegelänge der Versuche l_b setzt sich beziehend auf die Dynamikparameter aus einer Beschleunigungs- (und Verzögerungs-) strecke l_a und einer Strecke konstanter Geschwindigkeit $l_{v=k}$ zusammen.

$$l_b = 2 * l_a + l_{v=k} \quad (3.11)$$

Im Gegensatz zu Biegelänge mit konstanter Geschwindigkeit $l_{v=k}$ ergibt sich l_a aus den Prüfparametern Nenngeschwindigkeit v_n , Nennbeschleunigung a_n und Ruck j . Demnach lässt sich für die Versuche entweder die Gesamtbiegelänge l_b oder die Biegelänge mit konstanter Geschwindigkeit $l_{v=k}$ festsetzen. Da die beschleunigte Biegelänge l_b dem jeweiligen Beschleunigungsvorgang inhärent ist, ist es nach Ansicht des Autors sinnvoll die Biegelänge mit konstanter Geschwindigkeit $l_{v=k}$ für alle Versuche konstant zu halten. Der sich ergebende Bewegungsablauf und die Biegelänge sind in Abbildung 3.18 dargestellt.

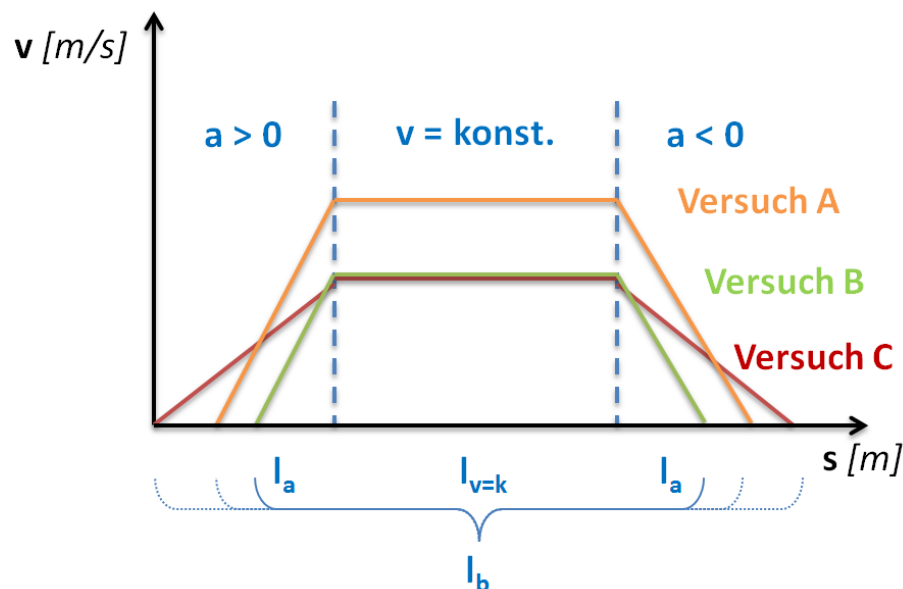


Abbildung 3.18: Schematische Zusammensetzung dreier verschiedener Gesamt-Biegelängen l_b mit $a_A = a_B > a_C$ und $v_A > v_B = v_C$

Aus der Drahtseilforschung ist bekannt, dass der Einfluss der Biegelänge auf die Lebensdauer laufender Seile statistischer Art ist und mit anwachsender Biegelänge drastisch abfällt [59, 162]. Es wird vermutet, dass sich dieser statistische Einfluss ähnlich auf die Lebensdauer laufender Faserseile auswirkt. Um einen eventuell verfälschenden Einfluss unterschiedlicher Biegelängen zu vermeiden werden daher alle Biegelängen so gewählt, dass sie ein Vielfaches des Seilnennendurchmessers betragen.

Zudem wird die Biegefrequenz konstant gehalten. Hierzu wird zunächst die minimale Prüffrequenz auf Grundlage der gewählten Dynamikparameter und der Haltezeit im Umkehrpunkt t_H bestimmt.

$$f_{n,Grenz} = \frac{1}{4 * \frac{v_n}{a_n} + 2 * \frac{l_{v=konst}}{v_n} + 2 * t_H} \quad (3.12)$$

Im Weiteren wird in Vorversuchen experimentell bestimmt, bis zu welcher Grenzfrequenz $f_{n,Grenz < 40^\circ C}$ die Seiltemperatur stets unter $40^\circ C$ bleibt. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 3.5 dargestellten Nenn-Prüffrequenzen $f_{n,Prüf}$ für die beiden Seildurchmesser. Je nach Einstellung der Dynamikparameter weichen die manuell nachgeprüften, realen Prüffrequenzen lediglich marginal von diesen Nenn-Prüffrequenzen ab.

Seildurchmesser d_n	Nenn-Prüffrequenz $f_{n,Prüf}$
2 mm	20,5 DBW/min
6 mm	6,0 DBW/min

Tabelle 3.5: Prüffrequenzen der Dynamikversuche

Die experimentell ermittelte Prüffrequenz von 6 DBW/min entspricht dabei genau dem Wert, der auch von Sloan et al. als optimale Prüffrequenz für Standard-Biegeversuche ermittelt wurde [153].

3.6.3. Durchführung der Hochdynamikversuche

Zur Durchführung der Hochdynamikversuche werden die zuvor getroffenen und beschriebenen Parameter am Prüfstand eingestellt und in der Steuerung hinterlegt. Nach Auflegen des jeweiligen Seils wird die Position (Höhe) des Spanngewichtskorbs notiert sowie die Oberflächentemperatur des Seils festgehalten. Anschließend wird der Versuch gestartet. Über den kompletten Versuchszeitraum werden die folgenden Werte überwacht und dokumentiert:

Die **Längung** des Versuchsseils wird über die Lage des Spanngewichtskorbs erfasst. Hierzu ist an jedem Spanngewichtskorb eine Millimeter-Skala angebracht, die die aktuelle Höhe des Korbs anzeigt. Hierbei ist zu beachten, dass sich die erfasste Längung auf die komplette Seillänge des Biegeversuchs inklusive ab- und aufgespultem Bereich bezieht.

Um ein Überhitzen der Versuchsseile ausschließen zu können, wird die **Oberflächentemperatur** T_O der Seile im Biegebereich mittels Kontaktthermometer

erfasst. Sollte eine Temperatur $\geq 40^\circ\text{C}$ erfasst werden, so ist der Versuch als ungültig zu betrachten und dementsprechend zu wiederholen.

Die reale **Prüffrequenz** $f_{r,Prüf}$ wird mit der zuvor berechneten Prüffrequenz (vgl. Tabelle 3.5) abgeglichen.

Darüber hinaus werden die Seile über den kompletten Versuchszeitraum **optisch** inspiziert.

Als **Versuchsende** wird der vollständige Bruch des Seils definiert. In diesem Fall betätigt das sich absenkende Spanngewicht einen Endschalter und der Antrieb wird abgeschaltet. Anschließend kann die erreichte Lebensdauer N_{DBW} dem Touchdisplay der Steuerung entnommen werden.

Zuletzt wird die **Lage des Bruchs** in der Prüflänge l_{Bruch} erfasst. Diese entspricht dem Abstand des Bruchs zum näherliegenden Umkehrpunkt, der zuvor markiert worden war. Damit wird gleichzeitig erfasst, ob der Bruch des Seils in der Zone konstanter Geschwindigkeit, einer Beschleunigungszone, einem Umkehrpunkt oder einem Übergangsbereich erfolgte. Bei Bruch in der Beschleunigungszone kann über die Lage des Bruchs und mithilfe der Kenntnis der Fahrkurve zudem festgestellt werden, welche Seilgeschwindigkeit in der Bruchzone durchfahren wurde.

4. Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zuvor in Kapitel 3 beschriebenen Versuche vorgestellt, diskutiert und zusammengefasst.

4.1. Dauerbiegeversuche

In diesem Abschnitt wird zuerst auf Ergebnisse eingegangen, die mit dem originalen Faserseil aus Dyneema mit $d_n = 2,5$ mm des IPAnema Seilroboters erzielt wurden. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der Biegeversuche mit den Seilen D2, T2 und V2 eingegangen. Zuletzt werden die Ergebnisse der Biegeversuche an den beiden 6 mm Seilen aus Vectran, V6 und M6, präsentiert.

4.1.1. Ergebnisse der Dauerbiegeversuche

Wie in Abschnitt 3.3 ausführlich beschrieben, wird eine Vielzahl an klassischen Dauerbiegeversuchen durchgeführt. Hierbei können wesentliche Eigenschaften und Kennwerte der untersuchten Seile gewonnen werden. Abbildung 4.1 zeigt die mittlere Lebensdauer eines Seils aus Dyneema bei verschiedenen Seilscheibendurchmessern und Seilzugkräften in doppellogarithmischer Darstellung.

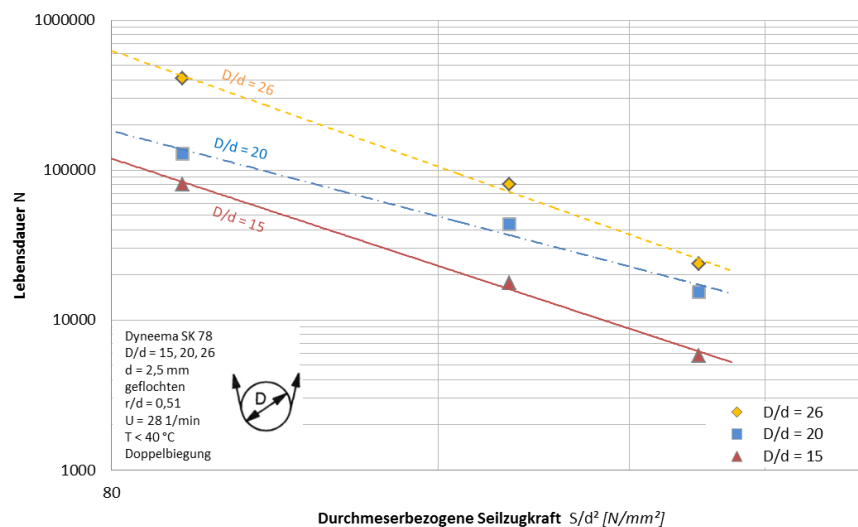


Abbildung 4.1: Lebensdauer eines Dyneema-Seils bei unterschiedlichen D/d-Verhältnissen⁹³

Die Grafik zeigt, dass die Lebensdauer bei zunehmender Zugbelastung exponentiell abfällt, was in logarithmischer Darstellung durch einen linearen Abfall der Kurve

⁹³ Die Biegeversuche wurden teilweise im Rahmen der vom Autor eng betreuten Bachelorarbeit B. Gerz [67] mit dem originalen Seil des IPAnema Seilroboters durchgeführt.

dargestellt wird. Auch der lebensdauerermindernde Einfluss eines kleineren Seilscheibendurchmessers D wird klar ersichtlich. Die Dehnung, die die Versuchsseile in diesen Biegeversuchen zeigen, ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

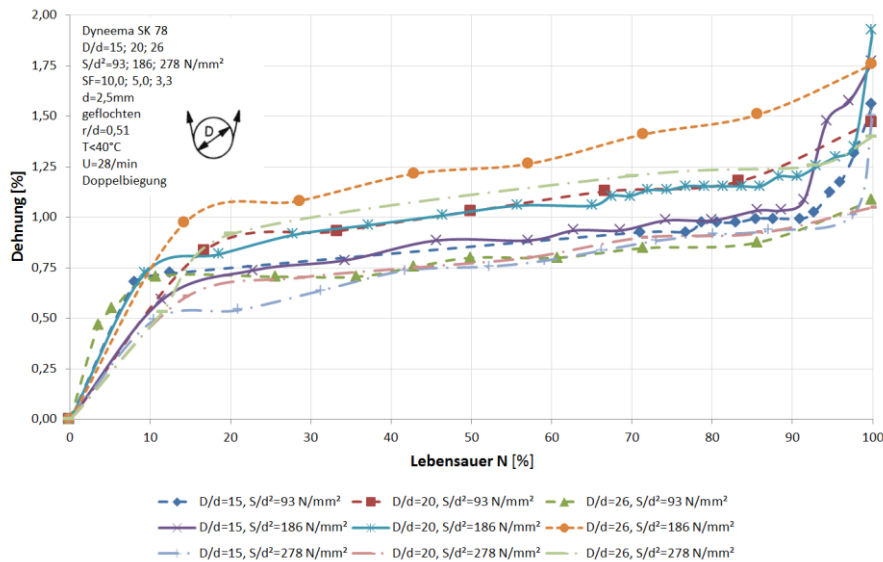


Abbildung 4.2: Dehnung im Biegeversuch

Nach einer anfänglich starken Dehnung, die nach 12-14 % der Lebensdauer erreicht ist, flacht die Dehnungskurve deutlich ab. Anschließend nimmt die Seildehnung über einen langen Zeitraum nur minimal zu, bis die Kurve kurz vor Lebensdauerende steil ansteigt. Zu erklären ist dieses Verhalten mit Setzbewegungen zu Versuchsbeginn, während über den langen Bereich geringer Dehnung Kriechvorgänge im Seil dominieren. Gegen Ende der Seillebensdauer nimmt die Anzahl an Garn- und Litzenbrüchen im Seil stark zu, was zu einer deutlichen Längung führt. Dieser Vorgang setzt sich bis zum Bruch des Seils fort. Die Dehnung der Seile geht mit einer Querkontraktion einher, was zu einer stetigen Abnahme des Seildurchmessers d_{ist} führt. Abbildung 4.3 zeigt die Veränderung des Seildurchmessers eines Faserseils aus Dyneema über die Lebensdauer im Biegeversuch. Neben der stetigen Durchmesserabnahme und der nicht perfekten Rundheit eines 12-fach geflochtenen Seils⁹⁴ ist die starke Durchmesseränderung zum Lebensdauerende ersichtlich. Zu erklären ist dieses Verhalten durch Auffaserungen im Biegebereich, die die Messung des Seildurchmessers stark beeinflussen. Diese Auffaserungen treten bei Faserseilen aus Dyneema vermehrt zum Lebensdauerende auf.

⁹⁴ vgl. Abschnitt 2.3.5

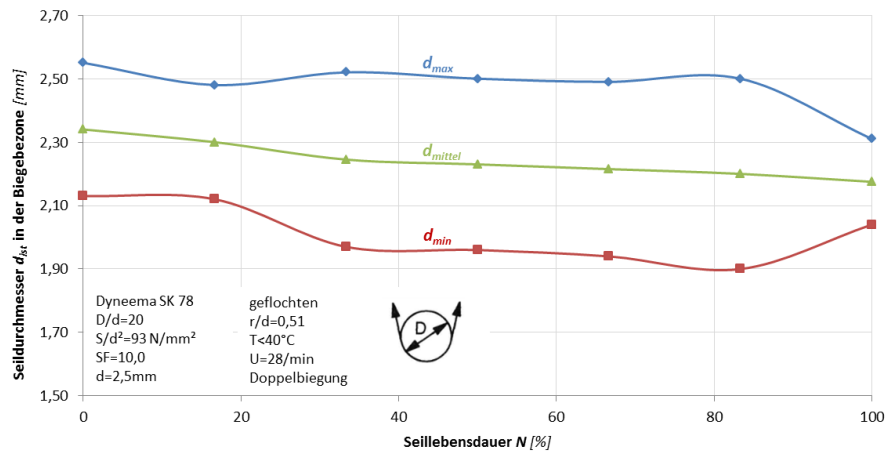


Abbildung 4.3: Durchmesser von Dyneema in der Biegezone über die Seillebensdauer⁹⁵

In Abbildung 4.4 sind die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche der in Tabelle 3.1 vorgestellten 2 mm-Versuchsseile D2, T2 und V2 unter Variation der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 dargestellt.

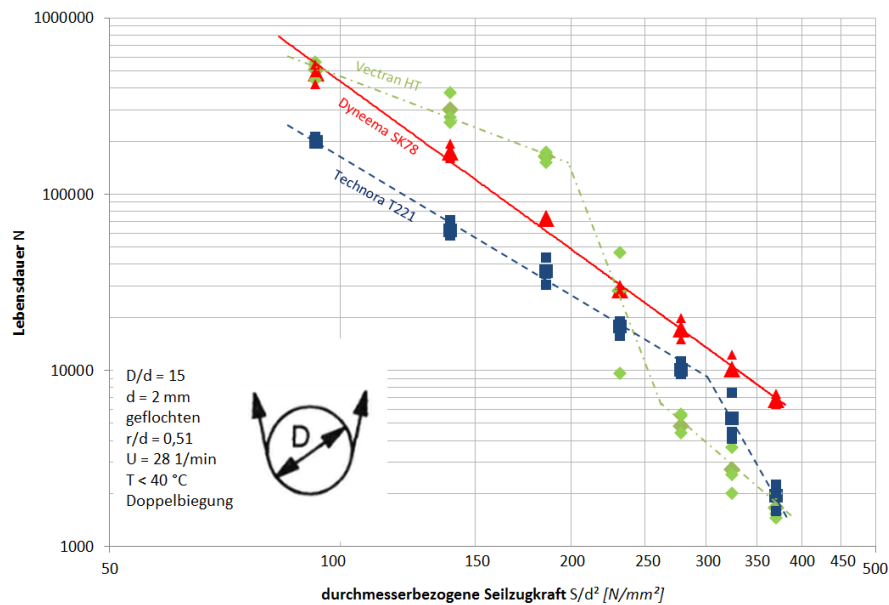


Abbildung 4.4: Lebensdauer N der Versuchsseile D2, T2 und V2 bei verschiedenen Seilzugkräften S/d^2 [N/mm²]

⁹⁵ Auf Grund der nicht perfekten Rundheit der Seile lassen sich an jeder Seilposition um den Umfang verschiedene Seildurchmesser messen. Die Punkte der blauen Kurve beschreiben den jeweils größten gemessenen Seildurchmesser d_{max} , die der roten Kurve den jeweils kleinsten gemessenen Seildurchmesser d_{min} . Die grüne Kurve beschreibt den arithmetischen Mittelwert.

Hierbei zeigt sich, dass der Sprungpunkt, an dem die Lebensdauerkurve stark einbricht, bei ansteigender Belastung zuerst vom Versuchsseils V2 aus Vectran erreicht wird. Der rapide Abfall beginnt ab einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 \approx 200 \text{ N/mm}^2$, flacht jedoch ab $S/d^2 \approx 270 \text{ N/mm}^2$ wieder deutlich ab.

Bei dem Versuchsseils T2 aus Technora tritt der Sprungpunkt erst ab $S/d^2 \approx 300 \text{ N/mm}^2$ auf. Hier ist im Bereich der untersuchten Seilzugkräfte keine erneute Abflachung der Lebensdauerkurve ersichtlich.

Das Versuchsseil D2 aus Dyneema zeigt im kompletten Betrachtungsbereich keinen Einbruch der Lebensdauerkurve und somit keinen Sprung- bzw. Donandtpunkt. Dies deckt sich mit Untersuchungen von Heinze [78], nach denen der Sprungpunkt bei Dyneema-Seilen erst bei wesentlich höheren Spannungszuständen zu erwarten ist.

Die Biegeversuche mit hoher Dynamik⁹⁶ (Hochdynamikversuche) sollen bei Lasten durchgeführt werden, die mit Sicherheit unter der Donandtkraft der jeweiligen Seile liegen. Aus diesem Grund wird die durchmesserbezogene Seilzugkraft der Versuche mit hoher Dynamik auf $S/d^2 = 93 \text{ N/mm}^2$ festgelegt, was der niedrigsten in Standard-Biegeversuchen untersuchten relativen Seilzugkraft entspricht.

Zusätzlich zu Biegeversuchen an Seilen mit Nenndurchmesser $d_n = 2 \text{ mm}$ werden Biegeversuche an den beiden Versuchsseilen mit Nenndurchmesser $d_n = 6 \text{ mm}$ (V6 und M6) durchgeführt. Die erreichten Lebensdauern N bei Variation der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 zeigt Abbildung 4.5.

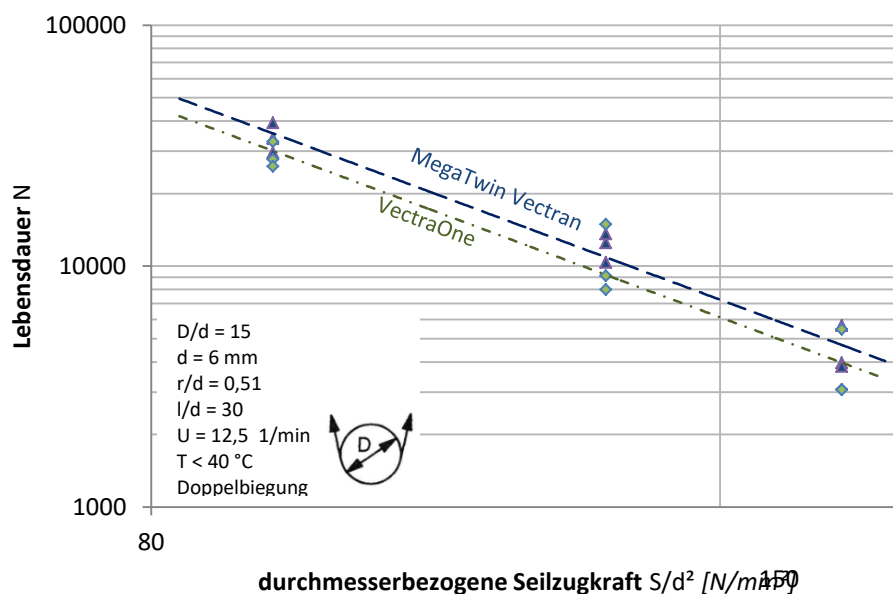


Abbildung 4.5: Lebensdauer N der Versuchsseile V6 und M6 unter verschiedenen Seilzugkräften

⁹⁶ vgl. Abschnitt 3.6 Hochdynamikversuche

Auch diese Biegeversuche werden deutlich unterhalb der Donandkraft S_D durchgeführt. Die Lebensdauerkurven der beiden Versuchsseile aus Vectran, V6 und M6, verlaufen hierbei annähernd parallel, wobei die Lebensdauer des Kern-Mantel-Geflechts M6 stets über der des offenen Geflechts V6 liegt. Hierbei ist zu beachten, dass die Bruchkraft bzw. die Feinheit⁹⁷ des Versuchsseils M6 ca. 50 % unterhalb der des Versuchsseils V6 liegt, woraus sich wesentlich bessere Biegeeigenschaften des Kern-Mantel-Geflechts in Wire Rope Construction gegenüber dem 12fach geflochtenen Seil ableiten lassen. Betrachtet man hierbei den inneren Aufbau der beiden Seile, so zeigt sich bei 12fach geflochtenen Seilen eine Vielzahl an Stellen, an denen sich Garne unter hoher Querpressung kreuzen. Bei der Wire Rope Construction hingegen liegen die Garne linienförmig nebeneinander, was zu wesentlich größeren Berührflächen und damit zu geringeren Pressungen zwischen den Garnen führt. Bei diesen günstigeren Pressungsverhältnissen schreitet der Abrasionsvorgang, der bei der Relativbewegung zwischen Garnen entsteht, mit verringerter Geschwindigkeit voran, was sich unmittelbar auf die Lebensdauer des Seils beim Lauf über Scheiben auswirkt. Die Anzahl der ertragbaren Biegewechsel und damit die Seillebensdauer nehmen zu.

In Abbildung 4.6 sind die Lebensdauern der Versuchsseile D2, T2, V2, V6 und M6 im Standard-Dauerbiegeversuch vergleichend gegenübergestellt.

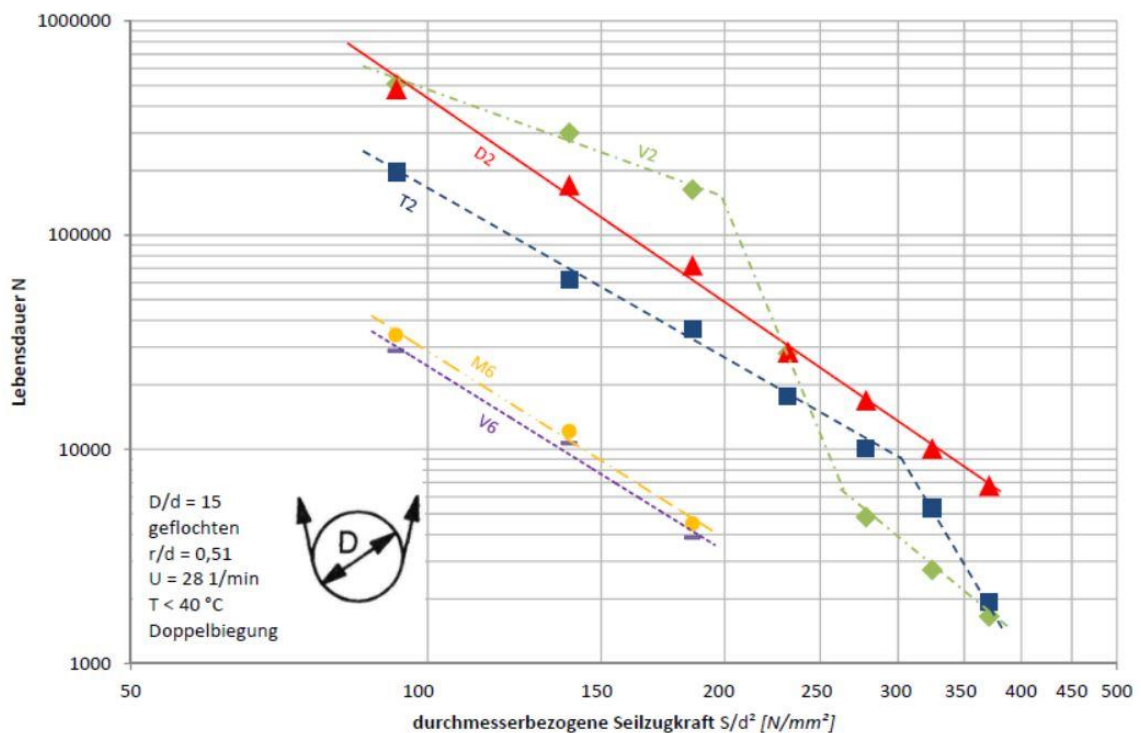


Abbildung 4.6: Vergleich der Lebensdauern der Versuchsseile D2, T2, V2, V6 und M6 im Standard-Biegeversuch

⁹⁷ vgl. Abschnitt 2.3.4: Faserseile - Begriffe und Definitionen bzw. Tabelle 3.1: Kennwerte der ausgewählten Versuchsseile in Abschnitt 3.1

Neben der Variation der Seilzugkraft werden mit den Versuchsseilen V6 und M6 zusätzlich Versuche zur Variation der Biegelänge durchgeführt. Die Biegefrequenz entspricht dabei der gleichen Frequenz wie bei den zuvor vorgestellten Biegeversuchen an 6 mm-Faserseilen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 4.7.

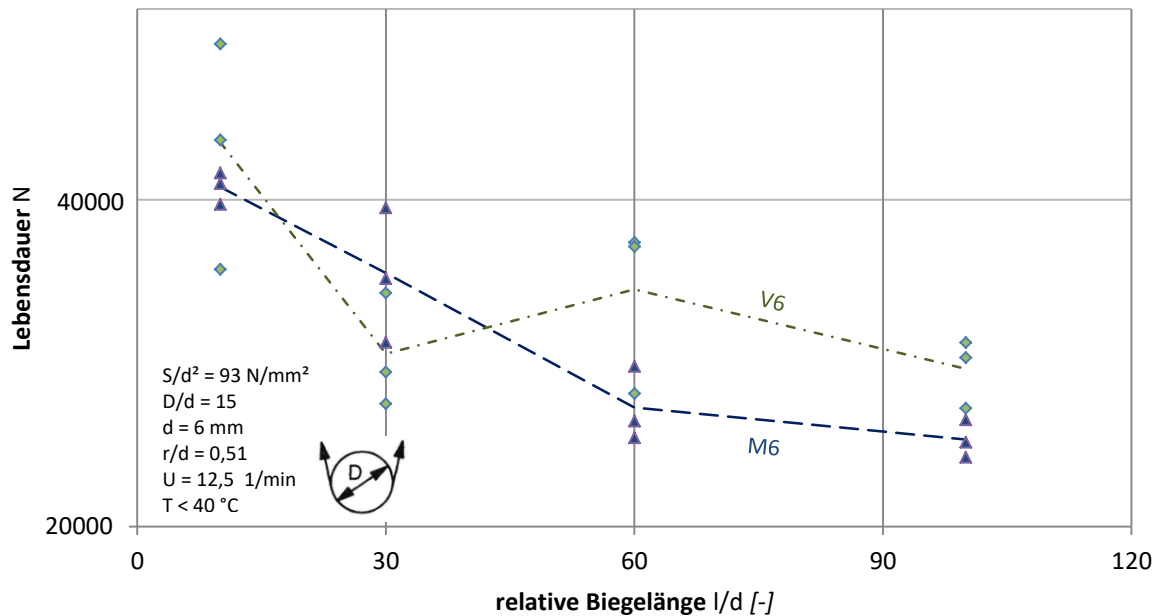


Abbildung 4.7: Lebensdauer N der Versuchsseile V6 und M6 in Abhängigkeit der relativen Biegelänge l/d

Hierbei zeigt sich, dass die Lebensdauer der Versuchsseile bei zunehmender Biegelänge abfällt⁹⁸. Dies ist auf die wachsende Wahrscheinlichkeit an Fehlern im Seilverbund zurückzuführen. Ein ähnliches Verhalten gilt laut Feyrer [59] für Drahtseile. Hierbei zeigt sich, dass der Einfluss der Biegelänge bereits ab einem Verhältnis von Biegelänge zu Seildurchmesser $l/d > 100$ stark abflacht. Dies deckt sich mit aus Biegeversuchen an Drahtseilen bekannten und bestätigten Erkenntnissen [59][89]. Demnach ist der Einfluss der Biegelänge auf die Seillebensdauer bei großen Biegelängen praktisch vernachlässigbar. Feyrer begründet dies für Drahtseile mit einer statistischen Betrachtungsweise. Demnach sind Fehlstellen, die zu einem vorzeitigen Versagen des Seils führen können, statistisch über die komplette Seillänge verteilt. Je länger die Seilstücke, die einer Biegebeanspruchung ausgesetzt werden sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ähnlich viele Fehlstellen in diesen Seilstücken befinden und somit eine ähnliche Lebensdauer erreicht wird [59]. Dieses Modell lässt sich analog auf Faserseile übertragen. Um den Einfluss der Biegelänge auf die

⁹⁸ Am Knickpunkt der Ausgleichsgerade des Versuchsseils VectraOne bei $l/d = 30$ ist zu erkennen, dass sich die Punkte der einzelnen Versuchsergebnisse durchdringen. Der leicht Knick kann somit als statistischer Ausreißer bezeichnet werden.

Lebensdauer zu minimieren ist das verwendete l/d -Verhältnis also möglichst groß zu wählen.

Darüber hinaus zeigt sich aus den durchgeführten Biegeversuchen, dass die Streuung der Versuchsergebnisse mit steigender Biegelänge ebenfalls abnimmt.

Die aus den Biegeversuchen errungenen Ergebnisse werden im Folgenden den Ergebnissen aus den Versuchen mit hoher Dynamik zu Grunde gelegt und als Referenz herangezogen.

4.1.2. Zusammenfassung der Dauerbiegeversuche

Im vorstehenden Kapitel werden die Ergebnisse von Dauerbiegeversuchen an HM-HT-Faserseilen beschrieben und ausgewertet. Neben dem im IPAnema eingesetzten 2,5 mm-Faserseil aus Dyneema werden vorrangig Biegeversuche an den Versuchsseilen D2, T2, V2, V6 und M6 vorgestellt.

Die Abhängigkeit der Seillebensdauer von Seilzugkraft, Seilscheibendurchmesser, Seilwerkstoff, Machart und Biegelänge wird qualitativ und quantitativ erfasst. Zudem können im untersuchten Lastbereich die Sprungpunkte der Seile T2 und V2 ermittelt werden.

Bis zum Erreichen des Sprungpunkts zeigen die Versuchsseile aus Vectran die höchste Lebensdauer. Nach dem abrupten Lebensdauerabfall beim Erreichen der Donandtkraft erreichen die Versuchsseile aus Dyneema die höchste Seillebensdauer. Im untersuchten Lastbereich kann für Dyneema kein Sprungpunkt identifiziert werden.

Bei den Biegewechseluntersuchungen der beiden 6 mm-Seile aus Vectran zeigt das Versuchsseil M6 trotz wesentlich geringerer Bruchlast durchweg höhere Lebensdauern als das Versuchsseil V6, was auf die Parallelität der Garne im Seilverbund und damit weniger abrasionsfördernde Garnkreuzungspunkte zurückzuführen ist.

Bei Vergrößerung der Biegelänge l sinkt die Lebensdauer der Versuchsseile logarithmisch ab. Ursächlich hierfür ist die statistisch höhere Wahrscheinlichkeit an Fehlstellen im untersuchten Seilbereich.

Die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche dienen als Grundlage für die Versuche mit hoher Dynamik und werden bei deren Auswertung als Referenz herangezogen⁹⁹. Ebenso dienen die erzeugten Bruchenden als Referenz bei der makro- und mikroskopischen Untersuchung der Bruchenden aus den Versuchen mit hoher Dynamik.

⁹⁹ vgl. Abschnitt 4.4

Zuletzt wird durch die Ergebnisse der Biegeversuche sichergestellt, dass sämtliche Versuche mit hoher Dynamik deutlich unterhalb des Sprungpunkts der Versuchsseile durchgeführt werden.

4.2. Zugschwellversuche

Die Beschreibung der Zugschwellversuche, deren Durchführung sowie der variierten Parameter ist in Kapitel 3.4 zu finden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zugschwellversuche dargelegt und zusammengefasst.

4.2.1. Ergebnisse der Zugschwellversuche

Im Vorgriff auf die Durchführung der Zugschwellversuche werden einzelne Zugschwellversuche mit der eigenkonstruierten Epoxy-Kegelverguss-Endverbindung¹⁰⁰ durchgeführt. Dabei können die folgenden Erkenntnisse errungen werden:

- Die eingesetzte Epoxid-Kegelverguss-Endverbindung eignet sich gut zur Durchführung von Zugschwellversuchen an Faserseilen.
- Auch bei hoher Belastung und hoher Prüffrequenz ist nur eine minimale Temperaturzunahme an der Seiloberfläche messbar. Die an der Seiloberfläche gemessene Grenztemperatur $T_{Grenz} = 40^{\circ}\text{C}$ wird in keinem Fall erreicht.
- Selbst nach weit über $N = 3 \times 10^6$ Lastwechseln tritt kein Bruch eines Versuchsseils ein. Zudem sind keine äußerlichen Anzeichen erkennbar, die auf ein baldiges Erreichen der Seillebensdauer hindeuten. Aus diesem Grund wird der Dauerfestigkeitsbereich der Versuchsseile auf $N = 0,5 \times 10^6$ Lastwechsel festgelegt. Seile, die diese Lebensdauer erreichen, werden als Dauerläufer gekennzeichnet und der Versuch wird abgebrochen.

Mit diesen in Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen können die Zugschwellversuche entsprechend den Angaben aus Abschnitt 3.4.3 und der Versuchsmatrix¹⁰¹ durchgeführt werden. Dabei zeigt sich, dass alle Versuche den Dauerfestigkeitsbereich von $N > 0,5 \times 10^6$ Lastwechseln erreichen und kein Seil vorzeitig durch Bruch versagt.

Die Dehnung der Versuchsseile wird über die komplette Versuchslaufzeit dokumentiert. Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.12. zeigen die mittlere Dehnung ϵ_m der fünf Versuchsseile.

¹⁰⁰ vgl. Abschnitt 3.4.2: Vorbereitung der Zugschwellversuche

¹⁰¹ vgl. Abbildung 3.9: Versuchsmatrix zur Durchführung der Zugschwellversuche

Für das Versuchsseils D2 ist dabei deutlich eine Abhängigkeit der Dehnung von der Prüffrequenz f sowie der Belastung zu erkennen.

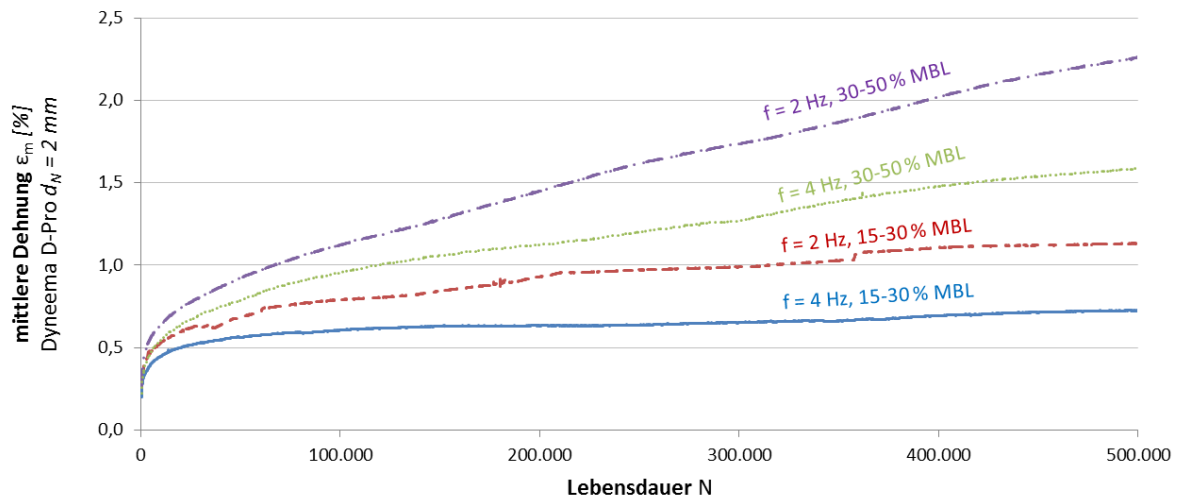


Abbildung 4.8: Dehnung des Seils D2 im Zugschwellversuch

Nach einem anfänglichen Setz- und Einfahrverhalten und nach Einstellen einer elastischen Anfangsdehnung verlaufen die Dehnungskurven annähernd linear. Die größte Dehnung zeigen dabei die Versuche mit hoher Last und niedriger Prüffrequenz während die Versuche mit niedriger Last und hoher Prüffrequenz nur eine sehr geringe Dehnung aufweisen.

Zu erklären ist dieses Verhalten mit dem Kriechverhalten von HMPE-Fasern unter Last. Das Abgleiten der langkettigen Moleküle findet dabei bei höheren Lasten stärker statt wie bei niedrigen Lasten. Zudem ist bei den Versuchen mit niedriger Prüffrequenz die verrichtete Arbeit, die sich als Flächenintegral unter der jeweiligen Kurve erkenntlich macht, größer wie bei den Versuchen mit höherer Prüffrequenz. Dies führt zu einem höheren Energie- bzw. Wärmeeintrag in das Seil, was wiederum eine stärkere Dehnung begünstigt. Zieht man hierzu noch in Betracht, dass Versuche mit niedriger Prüffrequenz eine höhere Versuchszeit benötigen, so erklärt dies die größeren Dehnraten bei niedrigen Prüffrequenzen.

Die Auswertung der Dehnraten der Versuche mit Technora und Vectran (T2, V2, V6 und M6) zeigen qualitativ ein sehr ähnliches Bild.

Bei diesen Versuchen stellt sich relativ schnell eine konstante Dehnung ein, die über den kompletten Versuchszeitraum sehr konstant beibehalten wird. Diese Dehnung ist dabei größtenteils unabhängig von Prüffrequenz und Belastung. Die betragsmäßig größte Dehnung wird von den Versuchsseilen T2 und V6 erzielt, die kleinste Dehnung stellt sich beim Versuchsseils M6 ein.

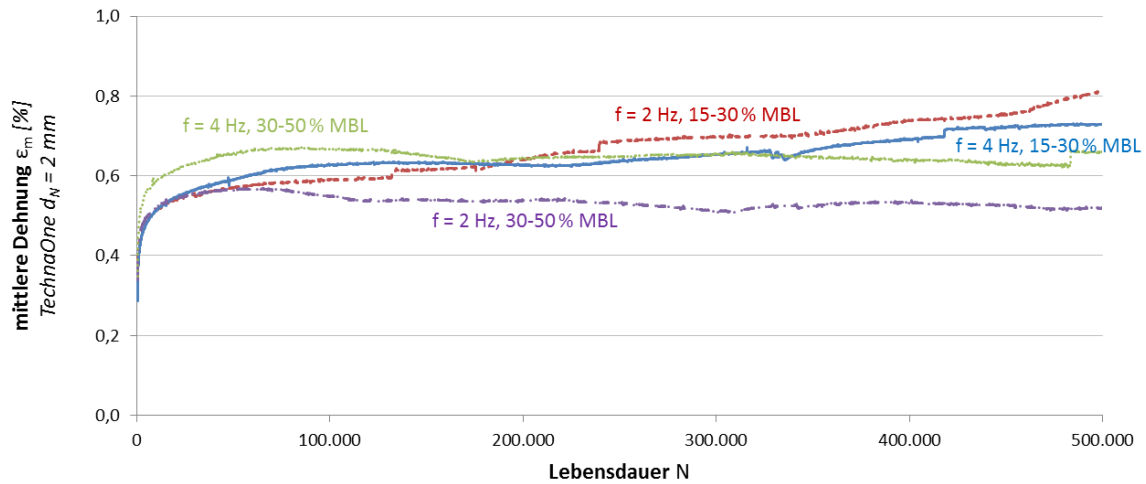


Abbildung 4.9: Dehnung des Seils T2 im Zugschwellversuch

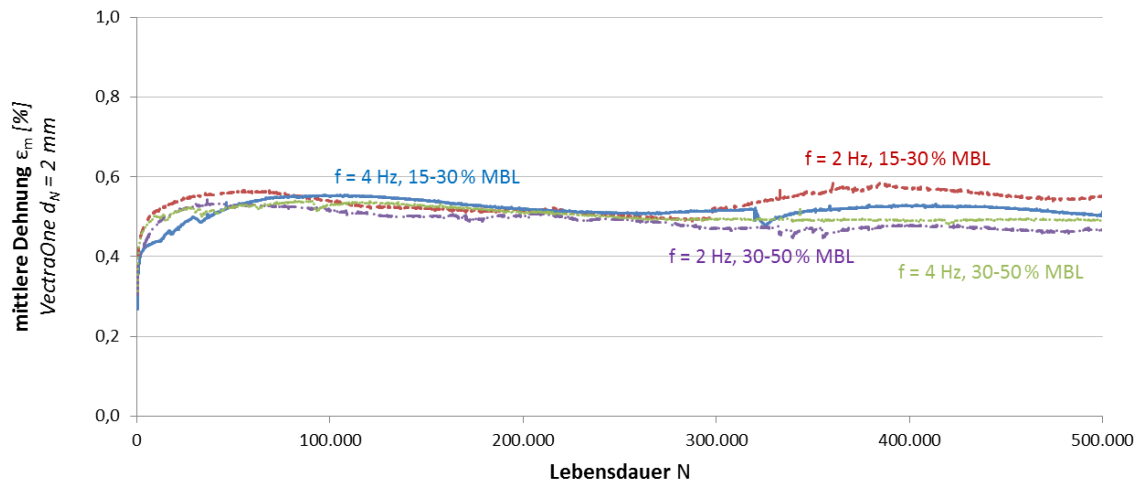


Abbildung 4.10: Dehnung des Seils V2 im Zugschwellversuch

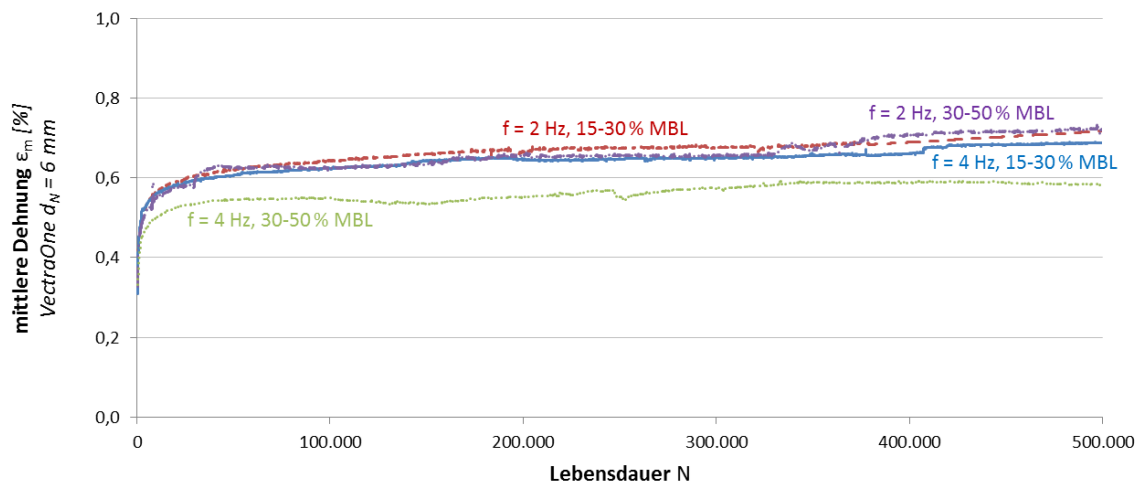


Abbildung 4.11: Dehnung des Seils V6 im Zugschwellversuch

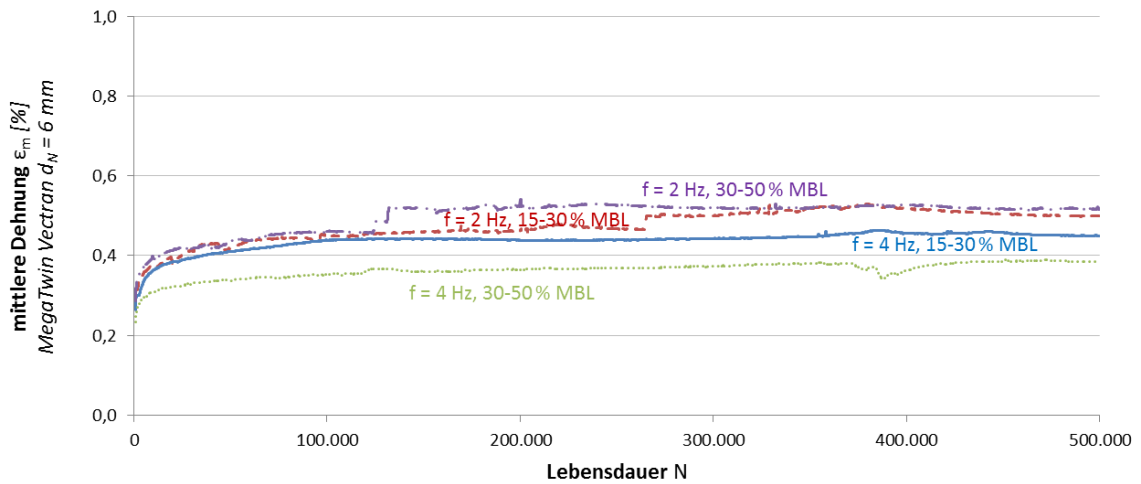


Abbildung 4.12: Dehnung des Seils M6 im Zugschwellversuch

Neben der Dehnung wird die Oberflächentemperatur der Versuchsseile während der Versuchslaufzeit überwacht. Nach Klöpfer [94] und Casey & Waters [21] ist bei der Durchführung von Zugschwellversuchen an Drahtseilen durch die inneren Reibungsvorgänge und die Dämpfungsarbeit im Seil mit einer deutlichen Temperaturerhöhung zu rechnen. Durch die gute Ableitung der Wärme an den Seilendverbindungen stellt sich die höchste Temperatur dabei in der Seilmitte ein.

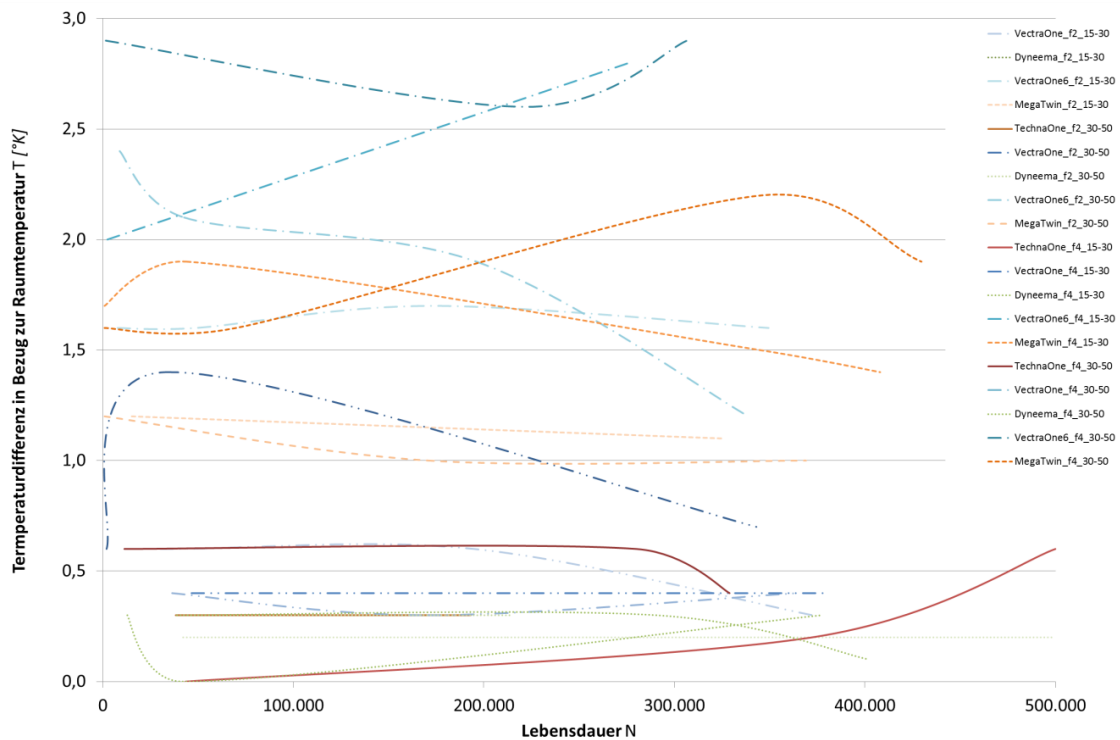


Abbildung 4.13: Temperaturverlauf der Versuchsseile D2, T2, V2, V6 und M6 im Zugschwellversuch bei verschiedenen Lasten und Prüffrequenzen

Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur der Versuchsseile in der Seilmitte in Bezug zur Raumtemperatur. Hieraus wird ersichtlich, dass die absolute Temperaturerhöhung im Vergleich zur Raumtemperatur sehr gering ausfällt und maximal 3 K beträgt. Die größte Erwärmung tritt bei den beiden dickeren Versuchsseilen V6 und M6 ein, während bei den Versuchen mit D2, T2 und V2 Temperaturerhöhungen von lediglich max. 1,5 K gemessen werden können. Eine weitere Temperaturerhöhung nach Einstellen einer Gleichgewichtslage, wie Klöpfer [94] dies an Stahlseilen feststellte, kann nicht beobachtet werden. Ursächlich hierfür sind unter anderem die betragsmäßig sehr niedrigen Messwerte, die kleine Messfläche auf den dünnen Seilen sowie die damit verbundene hohe Messunsicherheit.

Nach Klöpfer [94] besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Reib- und Dämpfungsarbeit, Temperaturerhöhung sowie der Lebensdauer von Drahtseilen. Legt man dieses Modell den in dieser Arbeit erlangten Versuchsergebnissen an HM-HT-Faserseilen zu Grunde, so lässt sich das Modell 1:1 übertragen. Durch geringe Reib- und Dämpfungsarbeit im Seil wird in nur sehr geringem Maße Wärmeenergie erzeugt. Zudem deutet die geringe Arbeit im Faserseil auf nur minimale Abrasionsvorgänge, was sich in der hohen Lebensdauer der Versuchsseile im Zugschwellversuch widerspiegelt.

Die leicht höhere Temperatur der dickeren Seile V6 und M6 kann mit dem schlechteren Verhältnis von Seilquerschnitt zu Seiloberfläche begründet werden. Bei zunehmendem Seildurchmesser liegen verhältnismäßig mehr Fasern im Seilinneren, weshalb die Wärme schlechter über die Seiloberfläche abgegeben werden kann. Zudem ist die Wärmeleitung von HM-HT-Fasern in transversaler Richtung wesentlich schlechter als in axialer Richtung. Ergebnis hiervon ist eine höhere Gleichgewichtstemperatur im Seil und damit verbunden eine höhere Seiloberflächentemperatur.

4.2.2. Zusammenfassung der Zugschwellversuche

Nach Durchführung und Auswertung der Zugschwellversuche an den fünf Versuchsseilen lässt sich zunächst festhalten, dass der eingesetzte Epoxid-Kegelverguss hervorragend für die Durchführung von Zugschwellversuchen an Faserseilen geeignet ist. Es kam zu keinerlei Versagen einer Endverbindung während der Zugschwellversuche. Davon abgesehen kam es zu keinem Bruch eines Versuchsseils während der Versuchszeit bis zum Erreichen des festgelegten Dauerfestigkeitsbereichs von $N = 500.000$ Lastwechseln.

Nur das Versuchsseil D2 zeigt eine zunehmende Dehnung, die sowohl last- wie auch zeitabhängig ist. Dies lässt sich auf die Kriechneigung von HMPE-Fasern zurückführen.

Die hohen Lebensdauern der Versuchsseile von $N > 500.000$ Lastwechseln spiegeln sich in dem nur sehr geringen Anstieg der Seiloberflächentemperatur von $T_{max} = 1,5$ K bei den Versuchsseilen D2, T2 und V2 und $T_{max} = 3,0$ K bei den Seilen V6 und M6 wieder.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die untersuchten Seile eine sehr geringe Empfindlichkeit gegenüber wechselnder Zugbelastung aufweisen und im Rahmen des definierten Dauerfestigkeitsbereichs keine Einbuße an Lebensdauer zu verzeichnen ist. Eine Verdopplung der dynamischen Prüffrequenz f von 2 Hz auf 4 Hz führt zu keinerlei Veränderung der Versuchsseile in Bezug auf deren Verschleiß und der Seillebensdauer.

4.3. Zugversuche

Zur Ermittlung der Bruchkraft bzw. der Restbruchkraft werden Zugversuche an allen fünf untersuchten Versuchsseilen durchgeführt. Neben den Versuchsseilen aus Abschnitt 4.2, bei denen durchweg innerhalb des festgelegten Dauerfestigkeitsbereichs von $N > 500.000$ Lastwechseln kein Bruch eingetreten war, werden auch Prüflinge ohne Vorbelastung untersucht.

Hierbei kommt neben der beschriebenen Epoxid-Kegelverguss-Endverbindung auch die am IFT entwickelte HIKE-Endverbindung¹⁰² zum Einsatz. Diese Versuche dienen gleichermaßen zur Überprüfung der von den Herstellern angegebenen Bruchlasten wie auch als Referenz für alle anderen Zugversuche.

4.3.1. Ergebnisse der Zugversuche

Die von den Seilherstellern angegebenen Bruchkräfte sind zur Referenz nochmals in Tabelle 4.1 dargestellt. Sie liegen dem obersten Balken (= 100 %) der Abbildungen 4.14 bis 4.18 jeweils zu Grunde.

Seilbezeichnung	D2	T2	V2	V6	M6
d_n [mm]	2	2	2	6	6
F_w [daN] (laut Hersteller)	410	390	420	3444	1667

Tabelle 4.1: Bruchkraft F_w der ausgewählten Versuchsseile

¹⁰² siehe Abschnitt 3.5.1

In Abbildung 4.14 bis Abbildung 4.18 sind die Ergebnisse der Zugversuche an den fünf unterschiedlichen Versuchsseilen dargestellt¹⁰³. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die erzielten Werte auf die Bruchkraft laut Datenblatt normiert und in Prozent angegeben. Die ermittelten Restbruchkräfte für die unterschiedlichen Versuche mit dem Versuchsseil D2 aus Dyneema zeigt Abbildung 4.14.

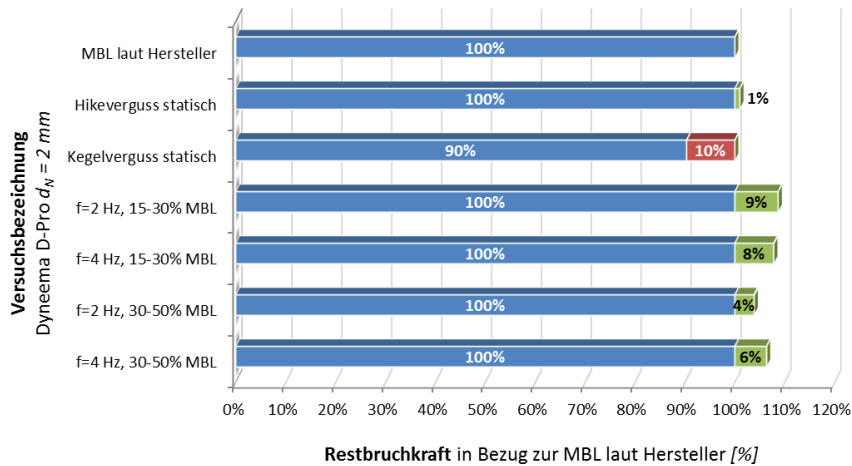


Abbildung 4.14 Restbruchkraft des Versuchsseils D2 ohne und mit Zugschwellbelastung

Hierbei fällt deutlich ins Auge, dass die Prüflinge aus den Zugschwellversuchen eine um 4 % bis 9 % höhere Restbruchkraft als die vom Hersteller angegebene F_w aufweisen. Die beiden Zugschwellversuche mit niedriger Last können dabei eine ausgeprägtere Steigerung der Restbruchkraft erzielen als die Versuche mit höherer Belastung. Die Versuche ohne Zugschwellbelastung können dagegen praktisch keine höhere Bruchkraft erzielen sondern bleiben im Falle des Kegelvergusses sogar noch hinter der angegebenen wirklichen Bruchkraft zurück. Hieraus lässt sich folgern, dass die Vorbelastung der Versuchsseile aus Dyneema im Zugschwellversuch keinen lebensdauerermindernden Einfluss ergeben hat. Vielmehr kann durch die schwellende Zugbeanspruchung eine Verfestigung der Seile und damit eine Erhöhung der Bruchkraft erzielt werden. Diese Steigerung der Bruchkraft lässt sich durch eine weitere Verstreckung der Seile während der Zugschwellversuche und damit einer weiteren axialen Orientierung der Kettenmoleküle in den Fasern begründen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Zugversuche an dem Versuchsseil D2 ergibt sich aus den Zugversuchen am Versuchsseil T2 aus Technora das folgende Bild.

¹⁰³ Für jedes der fünf Versuchsseile sind neben der Herstellerangabe zur Bruchlast jeweils ein Zugversuch mit HIKE-Endverbindung, ein Zugversuch mit Epoxy-Kegelverbindung sowie vier Zugversuche mit in Zug-Schwell-Versuchen vorbelasteten Probanden dargestellt.

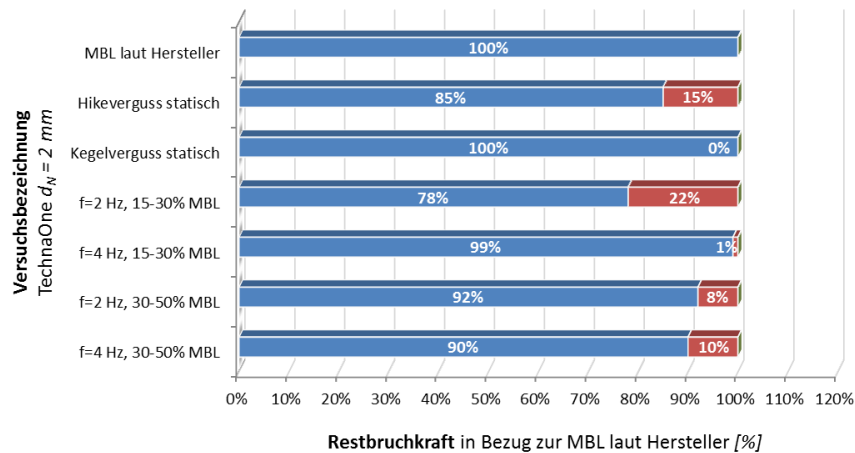


Abbildung 4.15 Restbruchkraft des Versuchsseils T2 ohne und mit Zugschwellbelastung

Die für das Versuchsseil T2 angegebene Mindestbruchlast von 390 daN¹⁰⁴ lässt sich ausschließlich im Zugversuch am Probanden ohne Vorbelastung erreichen. Die Prüflinge aus den Zugschwellversuchen erreichen dagegen nur 78 % bis 99 % des Referenzwertes. Im Mittel liegen sie um ca. 10 % zurück. Hieraus wird die Vorschädigung der Technora-Fasern durch die schwellende Zugbeanspruchung klar erkenntlich. Dies liegt zum einen an der Knickempfindlichkeit von Technora. So können sich einzelne Fasern beim Kontrahieren verhaken und im Weiteren unter Druckbeanspruchung ausknicken, was zum Bruch einzelner Fasern führt. Zum anderen begünstigt der erhöhte Reibwert die Faser-Faser-Reibung und damit die Abrasion zwischen den Fasern.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zugversuche der drei Versuchsseile aus Vectran vorgestellt und diskutiert. Abbildung 4.16 zeigt die ermittelten Werte für das 2 mm-Versuchsseil V2 aus Vectran. Die angegebene Mindestbruchkraft wird im statischen Zugversuch um 5 % übertroffen. Somit ist die Herstellerangabe sehr konservativ und bleibt hinter der realen Bruchkraft des Seils zurück. Aus den Zugversuchen an den Prüflingen aus Zugschwellversuchen entsteht ein uneinheitliches Bild. Während die Prüflinge mit hoher Prüffrequenz eine leichte Bruchkraftsteigerung aufzeigen kann für die Prüflinge mit niedriger Prüffrequenz ein minimaler Verlust an Restbruchkraft verzeichnet werden. In Summe liegen die erzielten Werte jedoch alle sehr nah beieinander, weshalb die minimalen Unterschiede eventuell auf Fertigungsunterschiede bei der Probenherstellung zurückzuführen sind. Eine Einbuße oder ein Zugewinn an Lebensdauer auf Grund der Vorbelastung im Zugschwellversuch ist nicht erkennbar.

¹⁰⁴ daN = Dekanewton; Die Gewichtskraft, die von ca. 1kg Masse hervorgerufen wird.

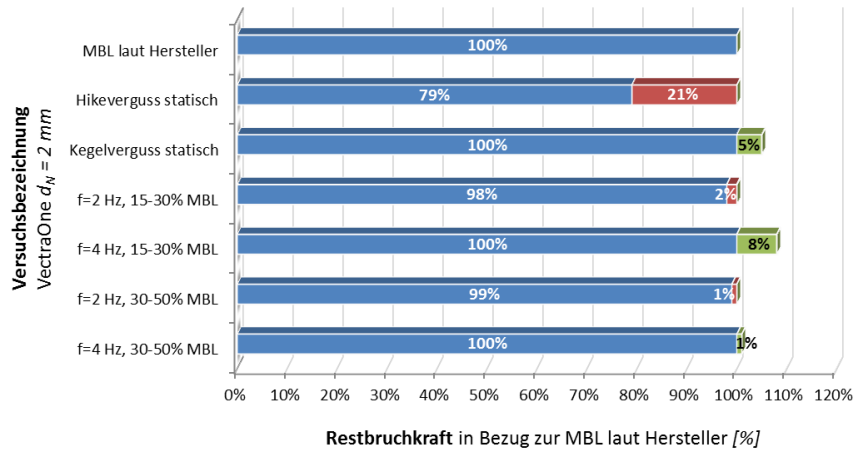


Abbildung 4.16 Restbruchkraft des Versuchsseils V2 ohne und mit Zugschwellbelastung

Ein vollkommen anderes Bild ergibt sich für das Versuchsseil V6. Hierbei kann die angegebene Mindestbruchlast bei keinem der Versuche erreicht werden. Selbst der Zugversuch ohne Vorbelastung bleibt mit -26 % weit hinter der Herstellerangabe zurück. Hieraus lässt sich ableiten, dass der angegebene Referenzwert zu hoch angesetzt ist und die reale Bruchkraft des Seils um ca. 19 % niedriger liegt. Die Restbruchkräfte der Prüflinge aus den Zugschwellversuchen bleiben somit zwar alle hinter dem Referenzwert von 3.444 daN zurück, überschreiten jedoch durchweg die real ermittelte Bruchkraft von $3.444 \text{ daN} - 19\% = 2.790 \text{ daN}$ woraus sich eine Steigerung der Bruchkraft aus den Zugschwellversuchen um 2 % bis 11 % ableiten lässt, vgl. Abbildung 4.17. Ein Verlust an Bruchkraft und somit eine Schädigung der Versuchsseile im Zugschwellversuch ist nicht zu verzeichnen.

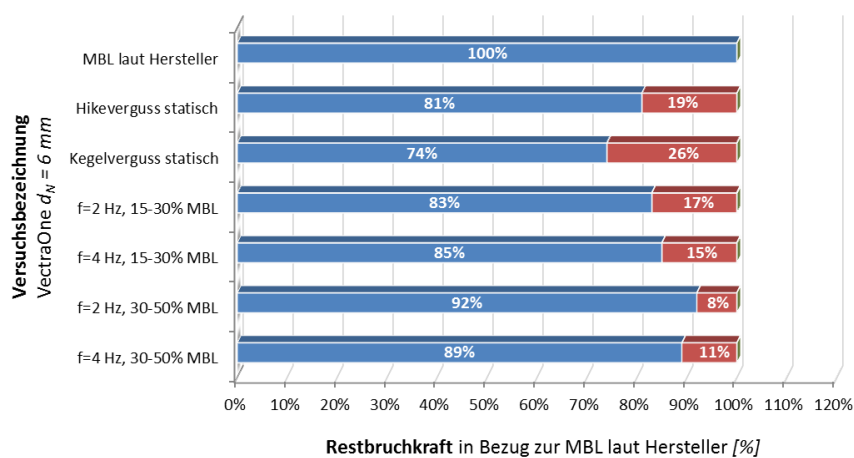


Abbildung 4.17 Restbruchkraft des Versuchsseils V6 ohne und mit Zugschwellbelastung

Abbildung 4.18 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche an dem Versuchsseil mit WireRopeConstruction aus Vectran M6.

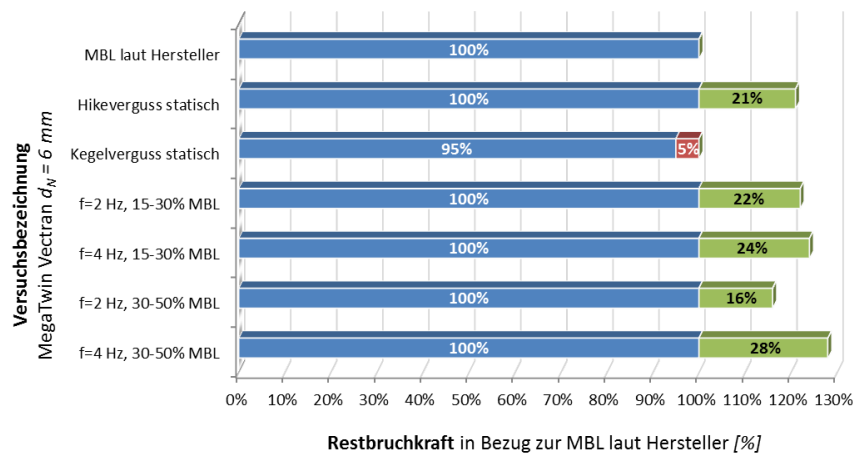


Abbildung 4.18 Restbruchkraft des Versuchsseils M6 ohne und mit Zugschwellbelastung

Auch hier zeigt sich, dass die reale Bruchkraft des Seils schlecht mit der Herstellerangabe übereinstimmt. So kann im statischen Zugversuch eine zum Referenzwert um 21 % höhere Bruchkraft ermittelt werden. Vor diesem Hintergrund lassen sich auch die vermeintlich starken Zuwächse an Restbruchkraft von 16 % bis 28 % bei den Versuchen mit Zugschwellbeanspruchung erklären und relativieren. Setzt man diese Werte in Relation zur bereits um 21 % höheren Seilbruchkraft, so liegen die Bruchkräfte zwischen -5 % und +7 % um diesen Referenzwert. Ein Verlust an Restbruchkraft durch Zugschwellbeanspruchung lässt sich damit auch bei dem Versuchsseils M6 nicht verzeichnen.

4.3.2. Zusammenfassung der Zugversuche

In Zugversuchen werden verschiedene Prüflinge der Versuchsseile D2, T2, V2, V6 und M6 in Bezug auf deren Bruchkraft bzw. Restbruchkraft untersucht. Neben den Versuchsseilen aus den Zugschwellversuchen¹⁰⁵ werden auch Seile untersucht, die keiner vorherigen Zugschwellbelastung ausgesetzt waren. Aus diesen Versuchen kann die reale Bruchkraft der verschiedenen Seile im Originalzustand abgeleitet werden, die wiederum mit den Referenzwerten der von den Seilherstellern angegebenen Mindestbruchlasten abgeglichen werden können.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen zum einen, dass die angegebenen Bruchlasten nicht in allen Fällen gut mit den realen Bruchlasten der Versuchsseile übereinstimmen. So stimmen die ermittelten Bruchkräfte der Versuchsseile D2, T2

¹⁰⁵ vgl. Abschnitt 4.2 Zugschwellversuche

und V2 sehr gut mit den Herstellerangaben überein, während die F_W des Versuchsseils V6 zu hoch und die des Versuchsseils M6 zu gering angegeben ist.

Vergleicht man nun die Restbruchkräfte der Seile, die eine Vorbelastung in Zugschwellversuchen aufweisen, so zeigt sich, dass diese Vorbelastung von $N = 500.000$ Lastwechseln zu praktisch keinerlei Einbuße an Restbruchkraft führt. Anders ausgedrückt unterliegen die Seile im Zugschwellversuch derart niedriger bis keiner abrasiven Schädigung, dass es zu keinerlei Lebensdauerminde rung auf Grund der Zugschwellbeanspruchung führt.

Im Gegensatz hierzu kann vor allem die Bruchkraft der Versuchsseile aus Dyneema (D2) sowie teilweise der Versuchsseile aus Vectran (V2, V6 und M6) durch eine vorherige Zugschwellbeanspruchung noch über die nominale Bruchkraft gesteigert werden. Lediglich die Versuchsseile aus Technora (T2) erfahren durch Zugschwellbeanspruchung einen Verlust an Restbruchkraft.

Zu erklären ist dieses Ergebnis durch die Knickempfindlichkeit der Technora-Fasern, die bei Verhakung und Entlastung, d.h. bei Druckbelastung der Faser, zur Ausknickung einzelner Fasern führt. Hierbei wird die Faser irreversibel geschädigt, was sich im Verlust an Gesamtbruchkraft des Versuchsseils T2 deutlich macht.

Dyneema hingegen wird im Zugschwellversuch weiter verstreckt, wodurch sich die Kettenmoleküle weiter axial ausrichten. Hieraus resultieren eine Festigkeitssteigerung und damit eine Erhöhung der Bruchkraft. Gleichzeitig werden lebensdauerminde rende Abrasionsvorgänge durch Relativbewegungen auf Grund ähnlich großer Faserdehnungen zwischen den Fasern dezimiert.

4.4. Hochdynamikversuche

Wie in Kapitel 2.4 bereits ausführlich beschrieben besteht ein wesentlicher Vorteil von HM-HT-Faserseilen neben ihrer hohen Festigkeit vor allem in ihrem geringen Eigengewicht. Diese Eigenschaft prädestiniert hochmodulare Faserseile für hochdynamische Anwendungen, d.h. hohe Geschwindigkeiten bei hohen Beschleunigungen. Erste Einsatzfälle hochmodularer Faserseile in hochdynamischen Anwendungen existieren bereits. Das Lebensdauerverhalten dieser Faserseile unter hochdynamischer Belastung ist bis heute jedoch noch gänzlich unerforscht, weshalb diese Lücke durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden soll. Hierzu werden unter anderem auf einem eigens konstruierten und erstellten Hochdynamik-Prüfstand Biegeversuche an HM-HT-Faserseilen unter Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s und Beschleunigungen von bis 100 m/s² durchgeführt.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Biegeversuche mit hoher Dynamik¹⁰⁶ aus dem durchgeführten Forschungsprojekt beschrieben und analysiert. Dabei wird differenziert auf die unterschiedlichen Ergebnisse der fünf betrachteten Versuchsseile eingegangen. Für jedes Seil werden die unabhängig voneinander variierten Versuchsparameter Geschwindigkeit a und Beschleunigung v separat voneinander betrachtet. Durch dieses Vorgehen können etwaige Einflussgrößen erkannt und identifiziert werden. Um eine Vergleichbarkeit zu standardisierten Dauerbiegeversuchen mit niedriger Dynamik zu erhalten werden die Ergebnisse nach deren detaillierter Beschreibung in Bezug zu den Ergebnissen der Standard-Biegeversuche¹⁰⁷ gesetzt.

Aus den Ergebnissen der Hochdynamikversuche werden Referenzversuche abgeleitet, die in Kapitel 0 beschrieben und analysiert werden. Zudem werden die Seile aus den Hochdynamikversuchen inklusive deren Bruchenden einer makroskopischen und mikroskopischen Analyse unterzogen, was in Abschnitt 4.6 vorgestellt und näher erläutert wird.

4.4.1. Abschätzung der Streubreite

Im Rahmen dieser Arbeit werden neuartige Biegeversuche durchgeführt, bei denen die Dynamikparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung in einem breiten Feld variiert wurden. Diese Versuche sind zum einen mit erheblichem Aufwand verbunden, zum anderen wird für jeden Versuch ein Seilstück mit ca. 20 – 25 m Länge benötigt. Um möglichst viele unterschiedliche Versuche mit unterschiedlichen Materialien durchführen zu können, wird zunächst darauf verzichtet jeden Einzelversuch durch Wiederholungen statistisch abzusichern. Stattdessen werden nur die Versuche wiederholt, die eine starke Abweichung zu den benachbarten Versuchen zeigen. Zudem werden Versuche wiederholt, bei denen eventuell externer Einfluss auf das Versuchsergebnis eingegangen war. Zuletzt werden einzelne, gezielt ausgewählte Versuche wiederholt, um die erlangten Ergebnisse zu stützen und zu bestätigen.

Die im folgenden Kapitel durch Fehlerbalken angegebenen Streubreiten beziehen sich auf die Streuung der jeweils zugehörigen Standard-Dauerbiegeversuche und sollen einen Hinweis auf die Streuung der verschiedenen Versuchsseile im Biegeversuch geben. Sie ergibt sich aus der Differenz der jeweils geringsten und höchsten erreichten Lebensdauer. Der für die Hochdynamikversuche herangezogene Referenzwert der Seillebensdauer N_{ref} ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Ergebnisse der vergleichbaren Standard-Dauerbiegeversuche.

¹⁰⁶ Im Weiteren als „Hochdynamikversuche“ bezeichnet

¹⁰⁷ vgl. Abschnitt 4.1 Dauerbiegeversuche

4.4.2. Ergebnisse der Hochdynamikversuche

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Hochdynamikversuche für jedes Versuchsseil separat beschrieben. Dabei wird zunächst auf die absoluten und relativen Lebensdauern der Versuchsseile unter den jeweiligen Versuchsparametern eingegangen. Die Lage der Bruchstellen bleibt dabei zunächst unbeachtet. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit wird für alle gleichartigen Diagramme der verschiedenen Versuchsseile dieselbe Skalierung verwendet.

Im Anschluss daran wird im darauffolgenden Kapitel auf die Lage der Bruchstellen in Zusammenhang mit dem in Abbildung 3.17 vorgestellten Bewegungsprofils eingegangen um weitere Zusammenhänge zu erkennen.

Abbildung 4.19 zeigt das Lebensdauerverhalten des Versuchsseils D2 aus Dyneema unter Variation der Dynamikfaktoren¹⁰⁸. Versuche gleicher Beschleunigung sind einheitlich farblich markiert und verbunden.

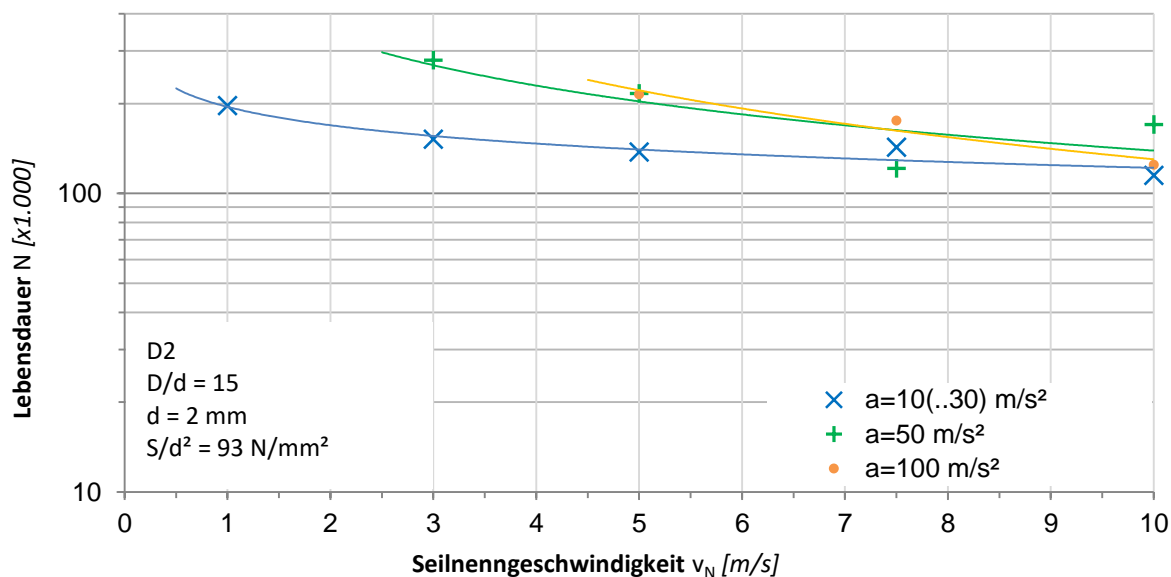


Abbildung 4.19: absolute Lebensdauer D2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Es zeigt sich, dass die Lebensdauern aller drei Gruppen mit gleicher Beschleunigung unter Zunahme der Geschwindigkeit stetig fallen. Die geringsten Lebensdauern erreichen bei jeweils gleicher Geschwindigkeit die Versuche mit geringer Beschleunigung.

Die Biegewechselzahlen nähern sich mit wachsender Geschwindigkeit asymptotisch einem gemeinsamen Grenzwert um ca. 140.000 Biegewechsel an. Der Verlauf der

¹⁰⁸ Als Dynamikfaktoren werden die Versuchsparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung bezeichnet.

Lebensdauerkurven lässt sich im einfachlogarithmischen Diagramm näherungsweise über eine exponentiell fallende Funktion beschreiben.

In Abbildung 4.20 sind die Ergebnisse der Dynamikversuche auf die durchschnittliche Biegewechselzahl N_{ref} der vergleichbaren Standard-Dauerbiegeversuche bezogen, weshalb die Lebensdauer auf der Ordinaten-Achse als „relative Lebensdauer“ bezeichnet wird. Hierbei zeigen sich signifikante Abweichungen. So erreicht der Hochdynamikversuch mit der höchsten Lebensdauer in etwa nur 65 % der Biegewechselzahl aus den Standard-Dauerbiegeversuchen, während der Grenzwert bei ca. 29 % des Referenzwertes liegt.

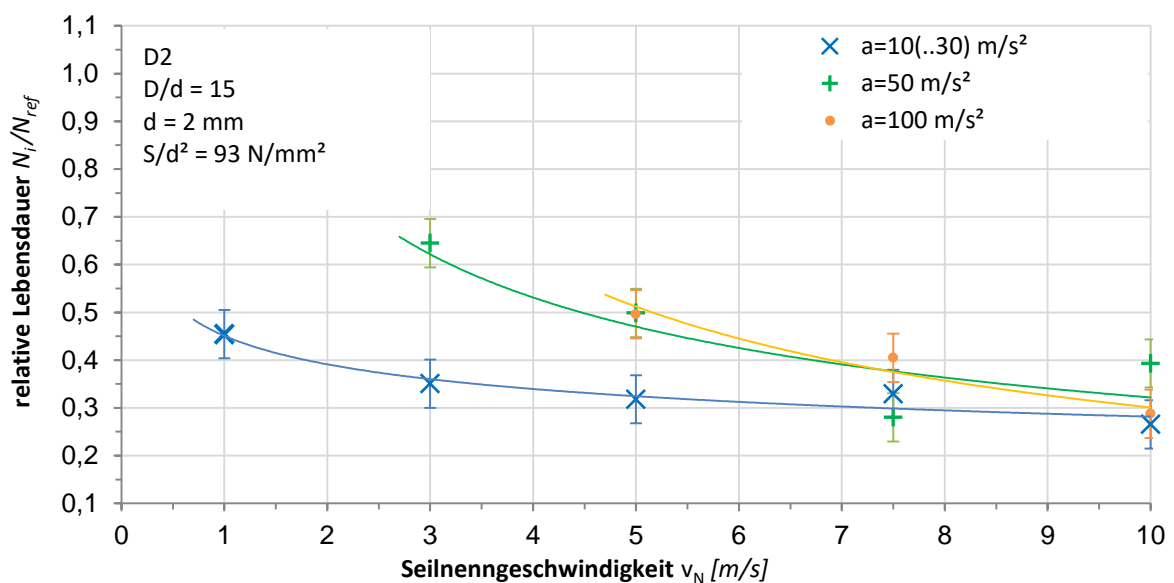


Abbildung 4.20: relative Lebensdauer D2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Hieraus zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Bewegungsparametern v und a und der Seillebensdauer N . Es gilt

$$N_{D2} = f(v, a) \quad (4.1)$$

In Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 sind die erreichten Biegewechselzahlen über der Geschwindigkeit für die Versuchsseile T2 aus Technora aufgetragen.

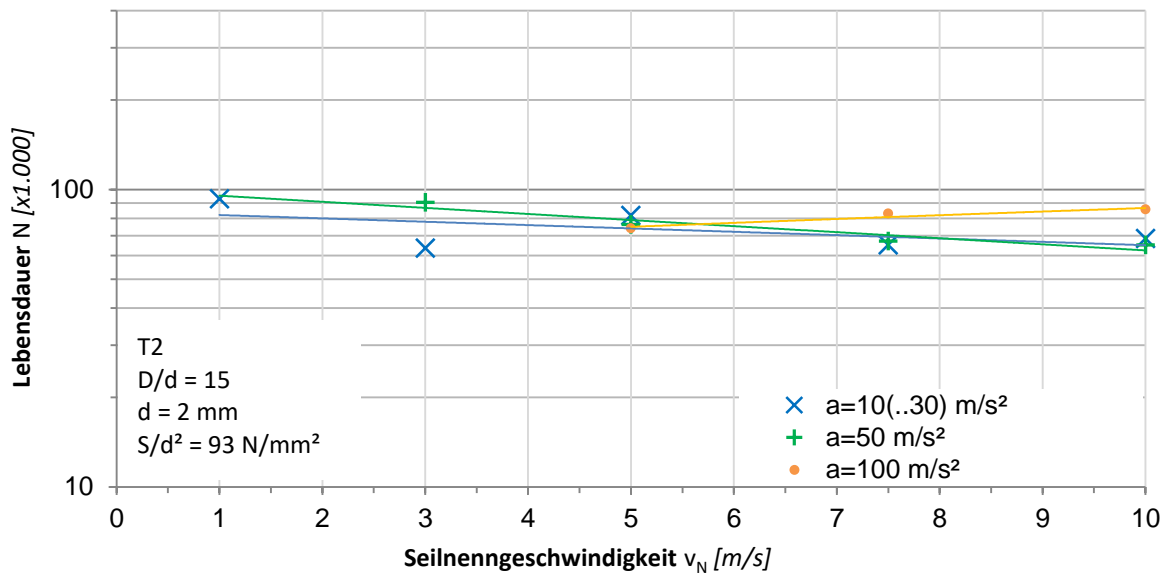


Abbildung 4.21: absolute Lebensdauer T2 unter hochdynamischer Beanspruchung

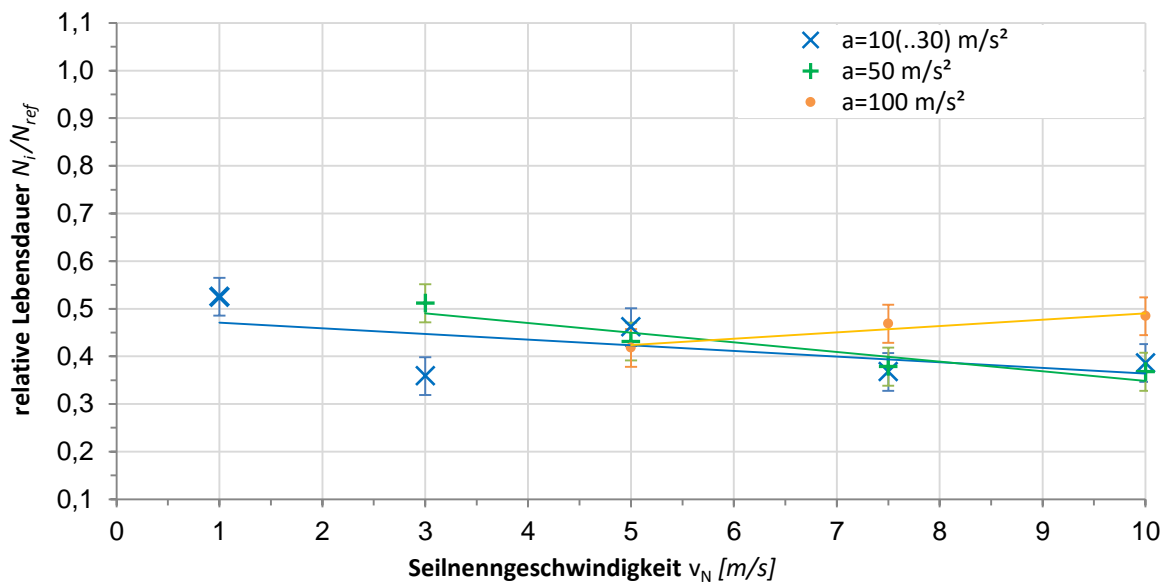


Abbildung 4.22: relative Lebensdauer T2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Hierbei ist zunächst kein wesentlicher Anstieg oder Abfall der Seillebensdauer unter Variation der Dynamikparameter erkenntlich. Für das Versuchsseil T2 aus Technora kann deshalb festgehalten werden:

$$N_{T2} \neq f(v, a) \quad (4.2)$$

Die Versuchsergebnisse der Versuchsseile mit Nennbeschleunigung $a_N = 10 \text{ m/s}^2$ liegen alternierend um einen Mittelwert von ca. 76.000 Biegewechseln. Bei den Versuchen mit mittlerer Beschleunigung zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme der Seillebensdauer um insgesamt ca. 28 %. Für die Versuche mit hoher Beschleunigung ergibt sich hingegen eine kontinuierliche aber sehr geringe Steigerung der Seillebensdauer um insgesamt ca. 16 %. Somit ist für die Ergebnisse der Hochdynamikversuche des Versuchsseils T2 keine einheitliche Systematik ersichtlich.

Die erreichten Biegewechselzahlen liegen deutlich unter den Versuchsergebnissen der Standard-Dauerbiegeversuche und erreichen im Mittel 42 % der Referenzlebensdauer.

Die Ergebnisse der Versuchsseile V2 sind in Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24 dargestellt.

Für die Versuche der niedrigen Beschleunigungsgruppe ist mit zunehmender Geschwindigkeit ein Abfall der Seillebensdauer um insgesamt 36 % zu verzeichnen, während sich bei mittleren Beschleunigungen kein einheitlicher Anstieg oder Abfall erkennen lässt. Für die Versuche mit maximaler Beschleunigung ergibt sich hingegen wiederum ein leichter Abfall der Lebensdauer bei steigender Geschwindigkeit. Die Lebensdauerkurven nähern sich dabei an einen Grenzwert um 120.000 Biegewechsel an bzw. alternieren um diesen.

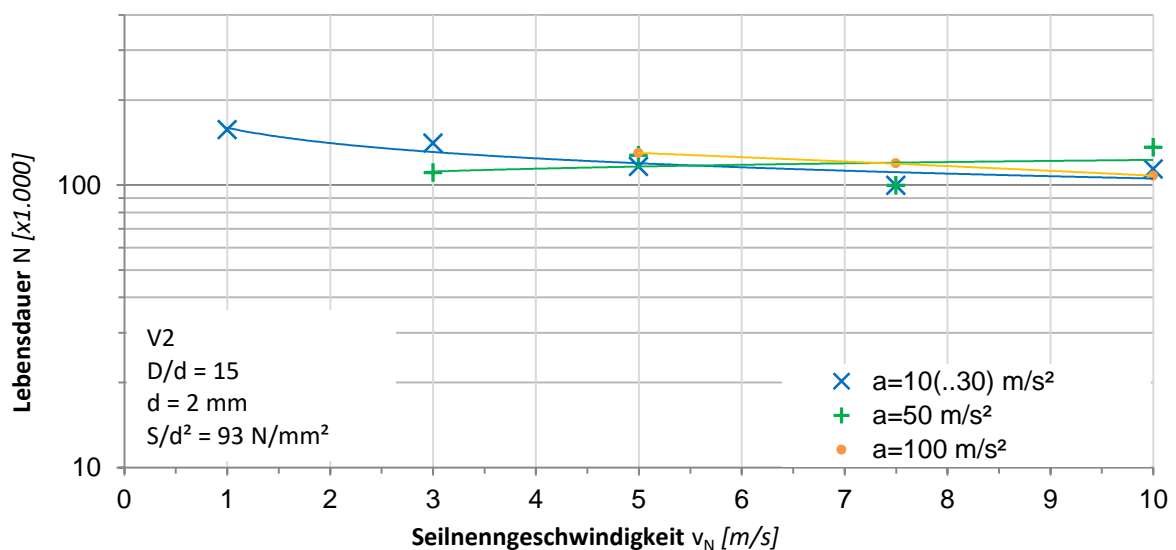


Abbildung 4.23: absolute Lebensdauer V2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Setzt man die erreichten Lebensdauern wieder in Bezug zu der in Standard-Dauerbiegeversuchen erreichten Lebensdauer, so zeigt sich, dass die Versuchsergebnisse der Hochdynamikversuche lediglich 20 % bis maximal 35 % des Referenzwertes erreichen können. Im Durchschnitt liegen sie bei lediglich $N/N_{ref} = 27 \%$.

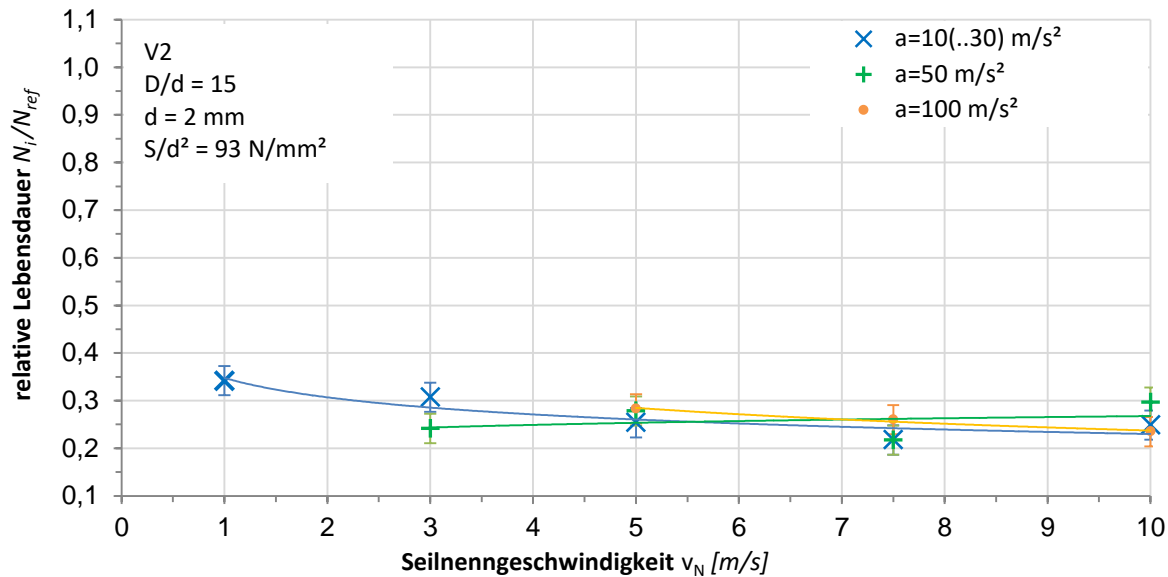


Abbildung 4.24: relative Lebensdauer V2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Auf Grund der sehr geringen Abweichung der einzelnen Biegewechselzahlen lässt sich aus den Versuchsergebnissen der Einfluss der Dynamikparameter jedoch nur mit geringer Sicherheit erkennen. Vielmehr liegen die Versuchsergebnisse so nahe beieinander, dass sie im Streubereich der benachbarten Versuche liegen.

Die Ergebnisse der Hochdynamikversuche des Versuchsseils V6 sind in Abbildung 4.25 und Abbildung 4.26 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Biegewechselzahlen der einzelnen Versuche sehr nah beieinander liegen, wobei für jede der drei Beschleunigungsgruppen für steigende Geschwindigkeiten eine leicht fallende Tendenz zu erkennen ist. Für die Versuche mit maximaler Beschleunigung ergibt sich dabei ein Abfall um insgesamt 12 %, für die Versuche mit mittlerer Beschleunigung um gerade einmal 9 %. Die Versuche mit der niedrigsten Beschleunigung erreichen abermals die niedrigsten Biegewechselzahlen.

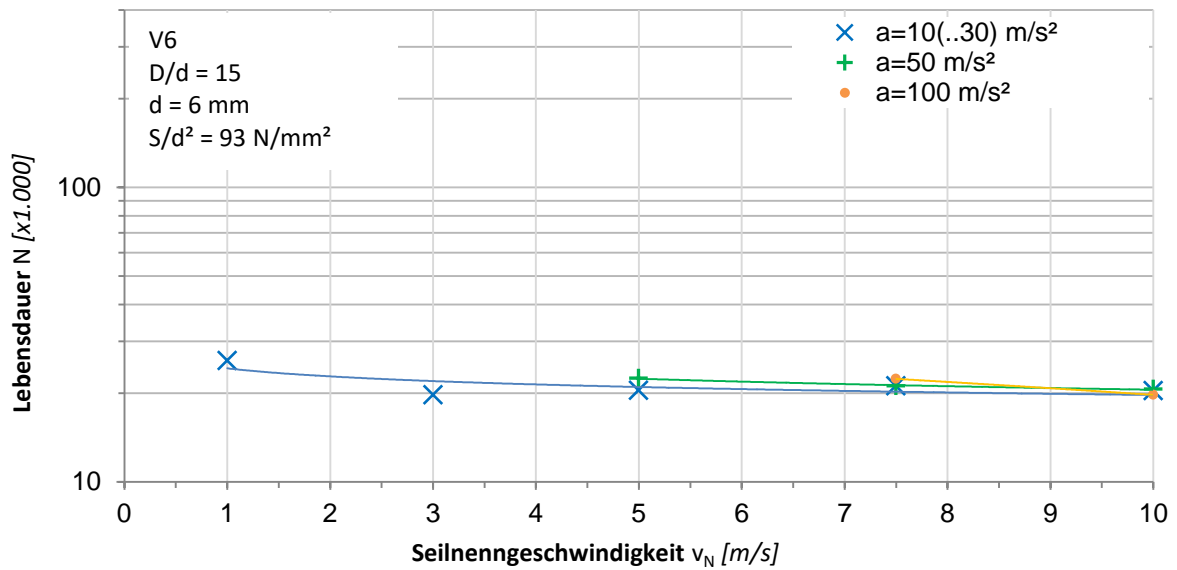


Abbildung 4.25: absolute Lebensdauer V6 unter hochdynamischer Beanspruchung

Für die beiden offenen Geflechte V2 und V6 aus Vectran kann somit festgehalten werden:

$$N_{V2,V6} \neq f(a) \quad (4.3)$$

$$N_{V2,V6} = f(v) \quad (4.4)$$

wobei die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit im Vergleich zum Versuchsseil D2 aus Dyneema geringer ausgeprägt ist.

Alle Hochdynamik-Versuche mit den Versuchsseilen V2 und V6 nähern sich dabei einem gemeinsamen Grenzwert von $N = 20.000$ Biegewechsel an.

Die Ergebnisse der Hochdynamikversuche V2 und V6 erreichen zwischen 68 % und 90 % des Referenzwerts aus Standard-Dauerbiegeversuchen. Im Mittel werden 74 % der Lebensdauer erreicht.

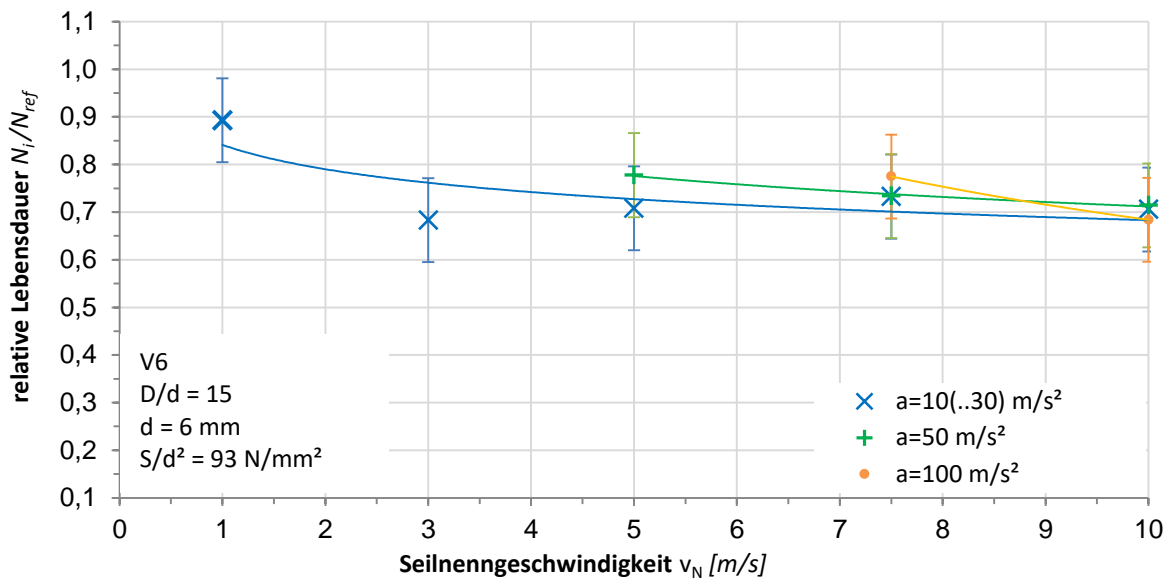


Abbildung 4.26: relative Lebensdauer V6 unter hochdynamischer Beanspruchung

In Abbildung 4.27 und Abbildung 4.28 sind die Ergebnisse der Hochdynamikversuche des Versuchsseils M6 dargestellt.

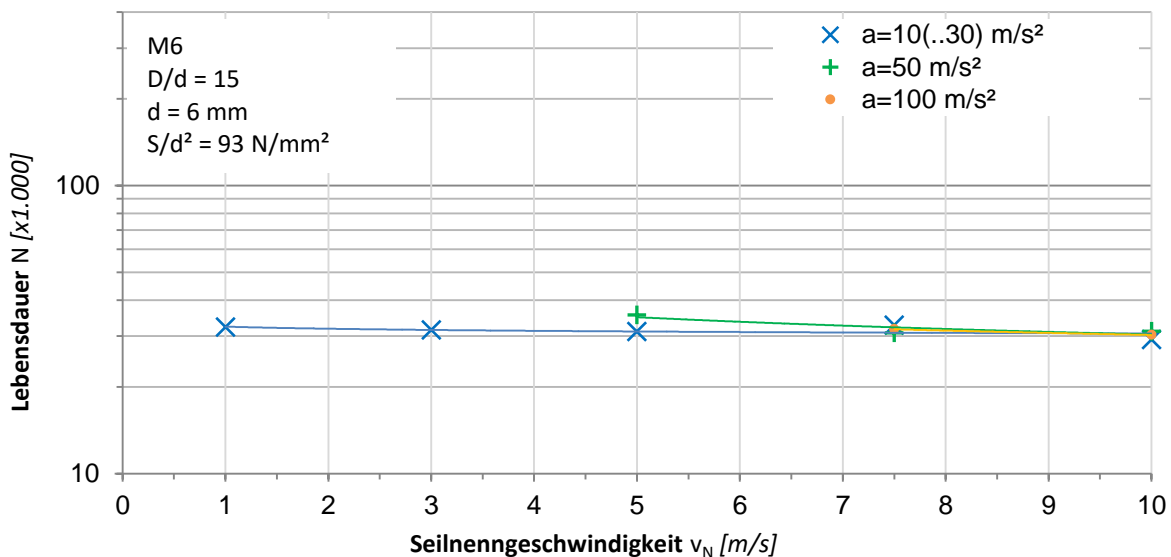


Abbildung 4.27: absolute Lebensdauer M6 unter hochdynamischer Beanspruchung

Vergleicht man die absoluten Biegewechselzahlen der Versuche mit variiertem Geschwindigkeit und Beschleunigung miteinander, so zeigt sich für das Versuchsseil M6, dass sich bis auf kleine Abweichungen für alle Versuche konstante

Lebensdauern ergeben. Somit ist die Lebensdauer des Versuchsseils M6 vollkommen unabhängig von Beschleunigung und Geschwindigkeit. Die Biegewechselzahl der verschiedenen Beschleunigungsgruppen nähert sich mit steigender Geschwindigkeit asymptotisch einem Grenzwert, der bei ca. 32.000 Biegewechseln liegt.

Setzt man die erreichten Lebensdauern wiederum in Bezug zur in Standard-Dauerbiegeversuchen erreichten Lebensdauer, so ergibt sich das folgende Bild (Abbildung 4.28). Die Biegewechselzahlen bleiben nur geringfügig hinter den Referenzwerten zurück. In einem Fall wird sogar eine im Vergleich zur mittleren Lebensdauer aus Standard-Biegeversuchen um 12 % erhöhte Lebensdauer erreicht.

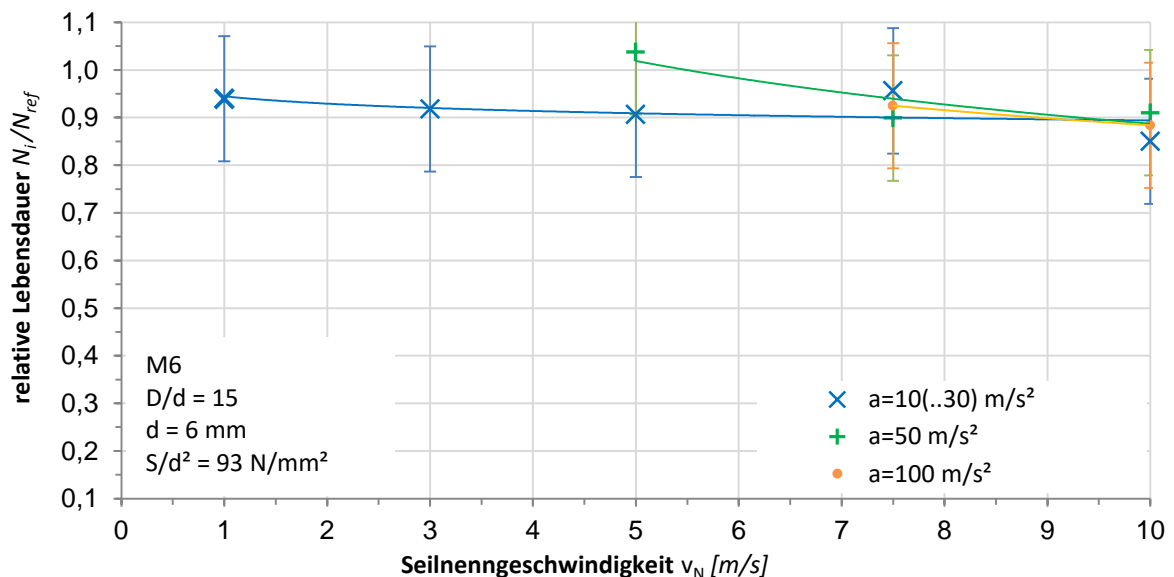


Abbildung 4.28: relative Lebensdauer M6 unter hochdynamischer Beanspruchung

Im Durchschnitt erreichen die Biegewechselzahlen 92 % des Referenzwertes und liegen somit nur geringfügig unterhalb der Ergebnisse der Standard-Dauerbiegeversuche. Für das Versuchsseil M6 gilt der Zusammenhang

$$N_{M6} \neq f(v, a) \quad (4.5)$$

4.4.3. Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Faserwerkstoffe

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse nach unterschiedlichen Fasermaterialien werden die Ergebnisse der Versuchsseile gleicher Machart und gleichem Seilnennendurchmesser herangezogen. Dies sind die Versuchsseile D2 aus Dyneema SK78, T2 aus Technora T221 und V2 aus Vectran HT.

Hierbei fällt zunächst auf, dass die Lebensdauern der Versuchsseile im Hochdynamikversuch weit hinter den Referenzwerten der Standard-Dauerbiegeversuche zurück bleiben. Diese Abweichung ist bis zu einem gewissen Maß sicherlich mit dem unterschiedlichen Bewegungsprofil und der stark erhöhten Biegelänge der Hochdynamikversuche zu erklären.

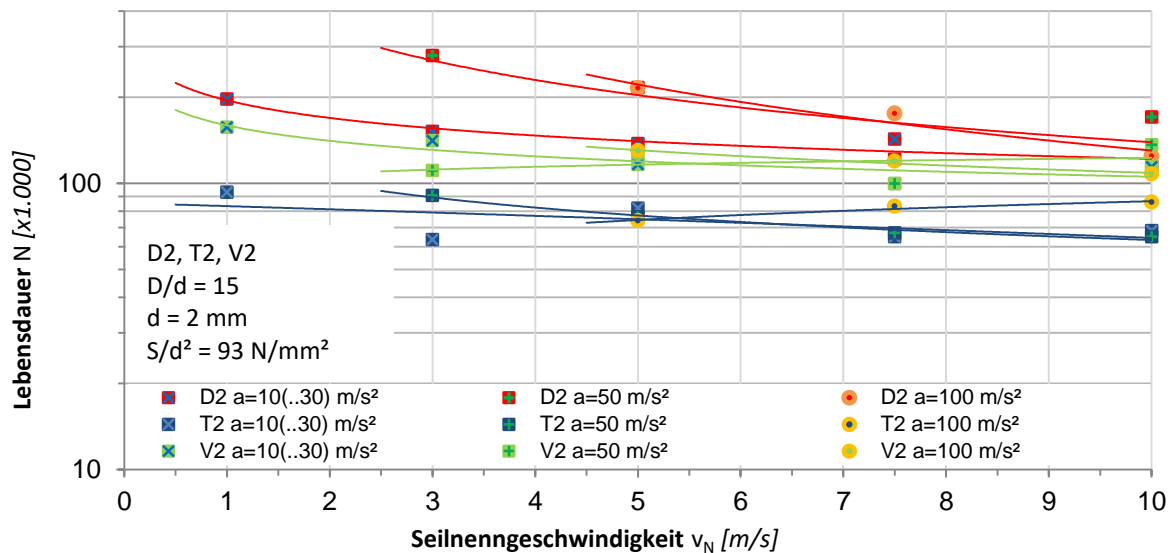


Abbildung 4.29: Vergleich der Lebensdauern unter hochdynamischer Beanspruchung

Im Standard-Dauerbiegeversuch liegen die Biegewechselzahlen des Versuchsseils V2 knapp über denen des Versuchsseils D2. Die Lebensdauer des Versuchsseils T2 liegt dagegen um mehr als 50 % verringert deutlich geringer. Erhöht man nun die Dynamikparameter im Hochdynamikversuch so ergibt sich ein anderes Bild. Unter erhöhter Geschwindigkeit und Beschleunigung fällt die Lebensdauer des Versuchsseils V2 stärker ab als die des Versuchsseils D2, das nun die höchsten Biegewechselzahlen erreicht. Das Versuchsseil T2 zeigt dagegen nach wie vor die geringste Lebensdauer.

Für das Versuchsseil D2 aus Dyneema zeigt sich zudem ein deutlicher Einfluss der Parameter Geschwindigkeit und Beschleunigung auf die Seillebensdauer. So fällt die Lebensdauer mit zunehmender Dynamik stetig ab, bis sie sich an einem Grenzwert orientiert. Für das Versuchsseil T2 aus Technora T221 lässt sich dagegen feststellen, dass kein Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer besteht. So bleibt die erreichbare Biegewechselzahl bei Erhöhung von Geschwindigkeit und Beschleunigung praktisch konstant. Die Ergebnisse des Versuchsseils V2 aus Vectran HT nehmen eine Sonderrolle ein. Zwar variieren sie zwischen den einzelnen

Versuchen, alternieren jedoch um einen Grenzwert. Ein Zusammenhang zwischen Variation der Dynamik und Seillebensdauer lässt sich hierbei nicht erkennen.

Um diese Erkenntnisse weiter untersuchen zu können werden weitere Biegeversuche an den drei Versuchsseilen durchgeführt. Dabei soll ein Übergang zwischen Standard-Dauerbiegeversuchen und Biegeversuchen mit erhöhter Dynamik geschaffen werden. Aus diesem Grund werden diese ergänzenden Versuche als „Übergangversuche“ bezeichnet. Im Einzelnen werden folgende Parameter festgelegt:

- Durchführung von Biegeversuchen auf dem Hochdynamikprüfstand
- Verwendung des Bewegungsprofils des Hochdynamikprüfstands mit konstanter Nenngeschwindigkeit (vgl. Abbildung 3.17)
- Wahl einer mittleren Biegelänge von $l/d = 60$ (im Vergleich dazu: $l/d = 30$ im Standarddauerbiegeversuche und $l/d > 500$ im Hochdynamikversuch)
- Wahl einer dem Standard-Dauerbiegeversuch ähnlichen maximalen Seilgeschwindigkeit von $v_N = 0,1$ m/s als Seilnenngeschwindigkeit.

Somit stellt der Übergangversuch einen Hochdynamik-Versuch unter den niedrigen Bedingungen eines Standard-Biegeversuchs dar. In den folgenden Abbildungen sind neben den erreichten Lebensdauern aus Abschnitt 4.4.2 zusätzlich die Ergebnisse der Übergangversuche eingezeichnet. Sie sind auf Grund ihrer geringen Geschwindigkeit am linken Rand der Grafiken zu finden.

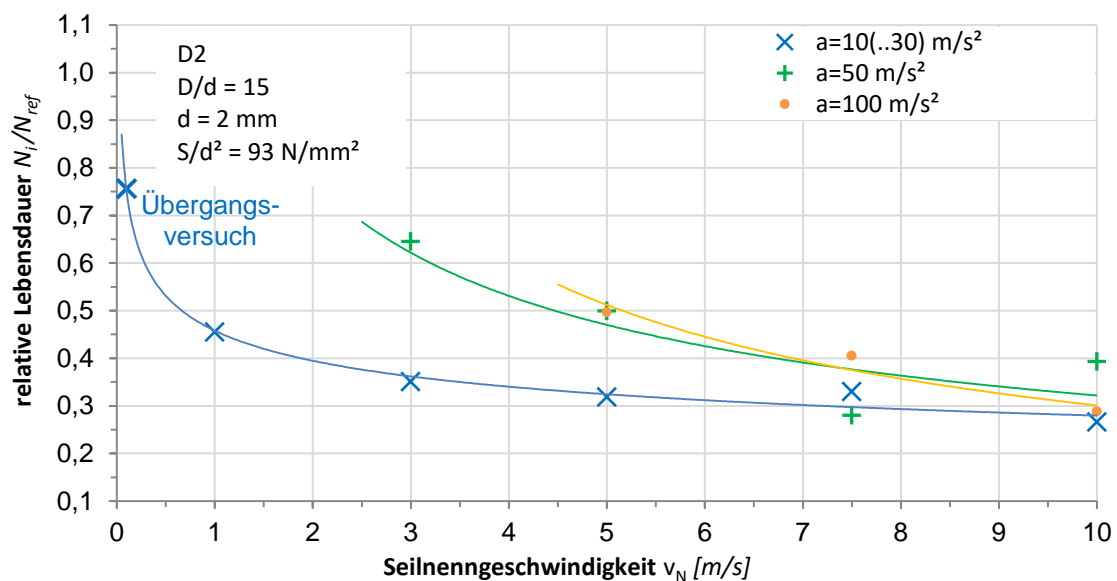


Abbildung 4.30: Lebensdauer des Versuchsseils D2 mit Übergangversuch

Abbildung 4.30 zeigt die erweiterte Lebensdauergrafik für das Versuchsseil D2. Während die Hochdynamikversuche teils deutliche Einbrüche in der Seillebensdauer aufzeigen, ist für den Übergangversuch eine Seillebensdauer von 76 % des Standard-Dauerbiegeversuchs zu verzeichnen. Führt man die Ausgleichskurve aus Abbildung 4.20 in Richtung der niedrigen Geschwindigkeiten fort, so passt der Übergangversuch sehr gut in dieses Schema. Der zuvor ermittelte Einfluss der Dynamikparameter auf die Lebensdauer des Versuchsseils D2 aus Dyneema lässt sich hiermit eindeutig bestätigen.

In Abbildung 4.31 ist die Grafik für das Versuchsseils T2 erweitert um den Übergangversuch dargestellt. Der Übergangversuch nimmt hierbei einen Punkt um den Mittelwert bei ca. 46 % ein. Dies untermauert das zuvor bereits herausgearbeitete geschwindigkeitsunabhängige Lebensdauerverhalten des Versuchsseils T2.

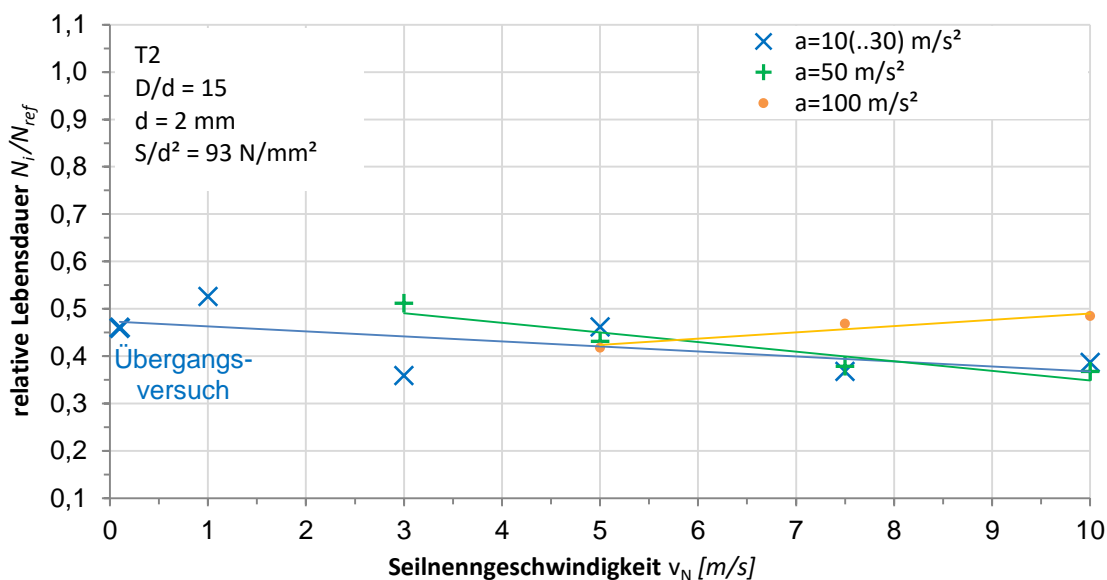


Abbildung 4.31: Lebensdauer des Versuchsseils T2 mit Übergangversuch

Abbildung 4.32 zeigt das erweiterte Lebensdauerdiagramm für das Versuchsseil V2 aus Vectran HT. Unter Hinzunahme des Übergangversuchs lässt sich hierbei eine Geschwindigkeitsabhängigkeit vermuten. Durch den Verlauf der Ausgleichskurven wird zudem eine Verknüpfung zu den Ergebnissen der Standard-Dauerbiegeversuche hergestellt.

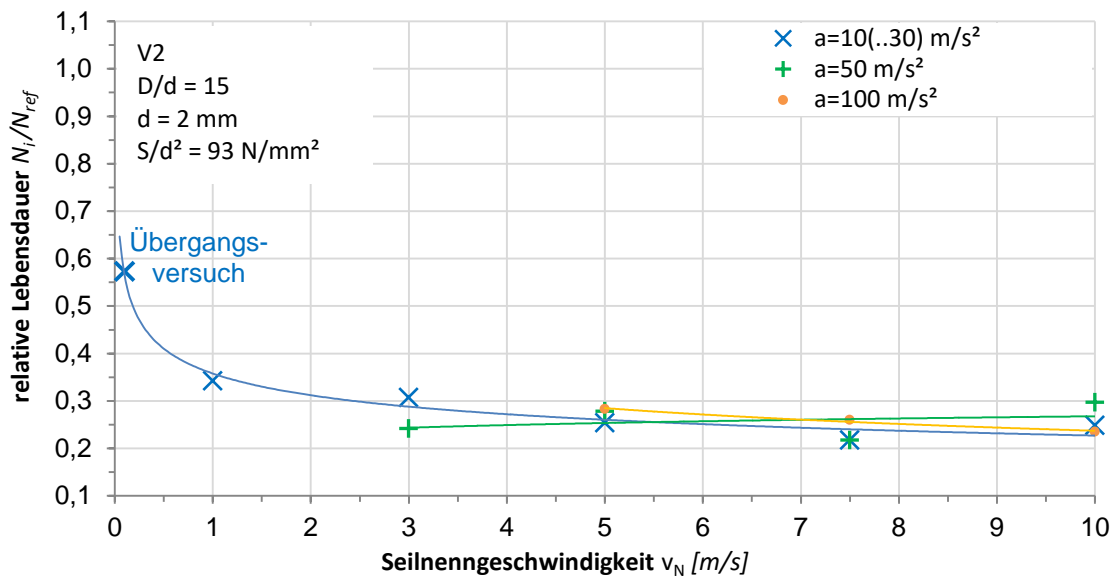


Abbildung 4.32: Lebensdauer des Versuchsseils V2 mit Übergangsversuch

In Abbildung 4.33 ist der Vergleich der verschiedenen 2mm-Versuchsseile, erweitert um den jeweiligen Übergangsversuch, dargestellt.

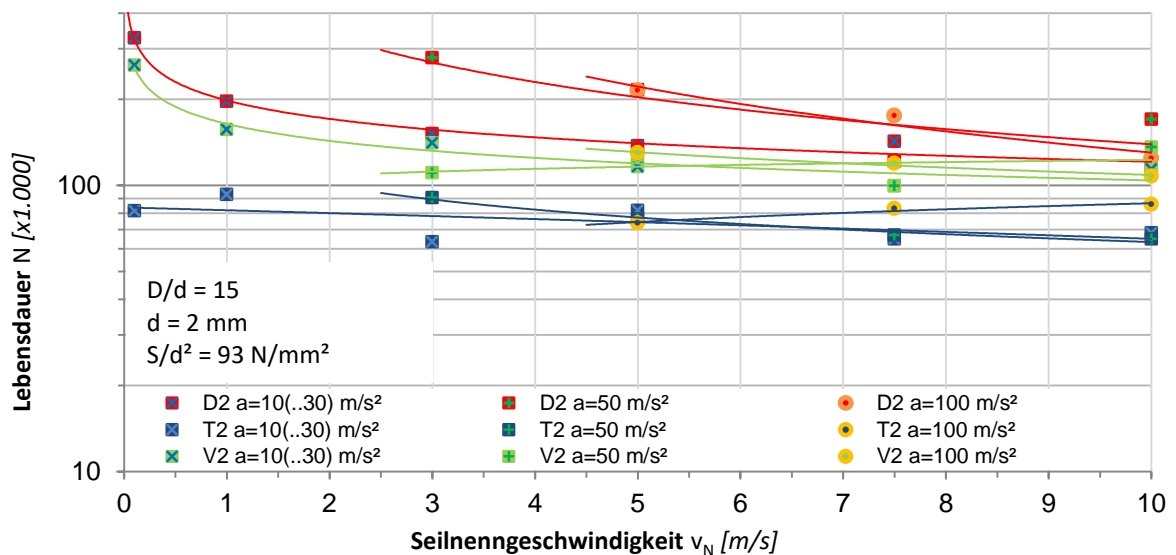


Abbildung 4.33: Vergleich der Lebensdauern unter hochdynamischer Beanspruchung

Die Diskrepanz, die zwischen den Lebensdauern im Standard-Dauerbiegeversuch und denen im Hochdynamikversuch besteht, ist nach Auswertung der Übergangsversuche auf die veränderte Prüfmethode und damit auf das abweichende Bewegungsprofil zurückzuführen.

4.4.4. Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seildurchmesser

Zum Vergleich der Ergebnisse der Hochdynamikversuche mit Seilen verschiedener Nenndurchmesser werden material- und konstruktionsgleiche Seile herangezogen. Hierfür befinden sich die beiden Versuchsseile V2 und V6 aus Vectran HT in der Versuchsmatrix. Durch das alleinige Unterscheidungsmerkmal „Seilnenndurchmesser“ und unter Beibehaltung aller weiteren Seilparameter, wie beispielsweise Beschichtung oder Konstruktion, können eventuelle Unterschiede in den Versuchsergebnissen rein auf den unterschiedlichen Nenndurchmesser bezogen werden. Die Ergebnisse der Versuchsseile V2 und V6 sind in Abbildung 4.34 nochmals vergleichend dargestellt.

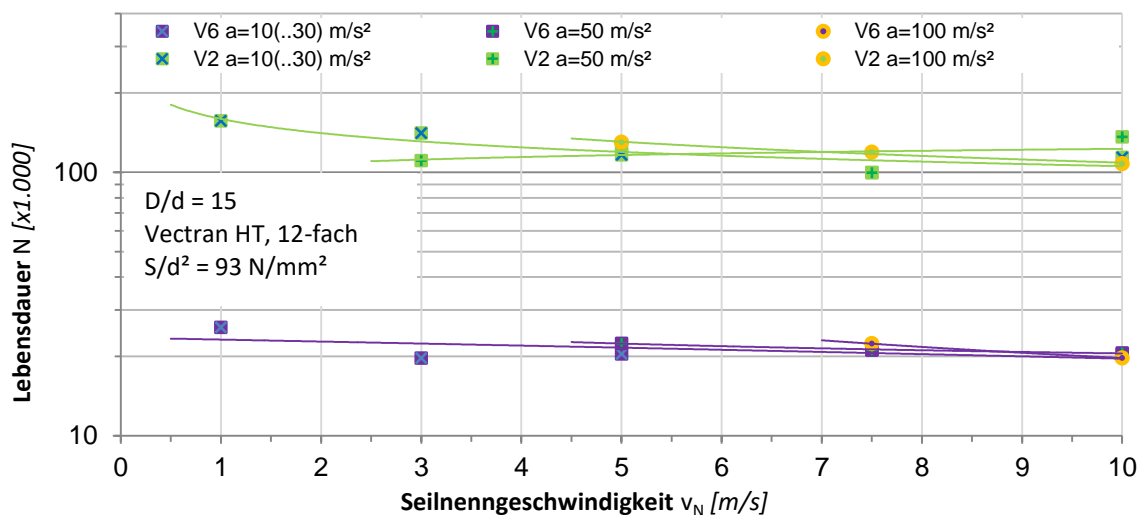


Abbildung 4.34: Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seilnenndurchmesser

Wie im vorherigen Abschnitt bereits herausgearbeitet, kann für die beiden Versuchsseile im untersuchten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsbereich kein wirklicher Einfluss dieser beiden Versuchsparameter auf die Seillebensdauer nachgewiesen werden. Betrachtet man jedoch die Kurve niedrigster Beschleunigung vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus Abschnitt 4.4.3, so lässt sich für die Versuchsseile aus Vectran HT ein verhältnismäßig kleiner Einfluss der Seilgeschwindigkeit auf die Lebensdauer aufzeigen. Dies zeigt sich vor allem in dem leichten Lebensdauerabfall bis zu einer Nenngeschwindigkeit von $v_N = 3$ m/s. Oberhalb dieses Grenzwertes streben beide Versuchsseile gegen einen Lebensdauer-Grenzwert. Die Streuung der Versuchsergebnisse um den jeweiligen Grenzwert fällt bei den dickeren 6 mm-Seilen geringer aus als bei den dünneren 2 mm-Seilen.

Die Biegewechselzahlen des Versuchsseils V6 reichen dabei weiter an die Referenzergebnisse der Standard-Dauerbiegeversuche heran als die des Versuchsseils V2. In absoluten Zahlen betrachtet, erreicht das Versuchsseil V2 unter sonst gleichen Belastungen eine deutlich höhere Lebensdauer als das werkstoff- und konstruktionsgleiche Versuchsseil V6. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Standard-Dauerbiegeversuche überein.

Zum einen lässt sich hieraus festhalten, dass die beiden Versuchsseile V2 und V6 in den Hochdynamikversuchen das gleiche Verhalten und die gleichen Abhängigkeiten in Bezug auf die Versuchsparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung zeigen. Zum anderen wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse der Hochdynamikversuche sehr gut reproduzierbar sind und mit den Ergebnissen der Standard-Dauerbiegeversuche verknüpft werden können¹⁰⁹.

4.4.5. Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seilkonstruktionen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Hochdynamikversuche der Versuchsseile mit unterschiedlicher Seilkonstruktion dargestellt und miteinander verglichen. Hierbei soll herausgearbeitet werden, ob die variierten Dynamikparameter eventuell unterschiedlichen Einfluss auf HM-HT-Faserseile verschiedener Machart haben. Hierzu werden die beiden Versuchsseile V6 und M6 herangezogen. Beide Seile haben einen Nenndurchmesser $d_n = 6$ mm und sind aus Vectran HT – Fasern gefertigt. Beim Versuchsseil V6 handelt es sich jedoch um ein drehungsfreies, offenes 12-fach Geflecht wohin gegen das Versuchsseil M6 aus einer gelegten Kern-Mantel-Konstruktion in Machart „Wire Rope Construction“ besteht. Im Hochdynamikversuch werden beide Seile aus Gründen der Vergleichbarkeit mit derselben durchmesserbezogenen Seilzugkraft $S/d^2 = 93$ N/mm² belastet, wobei zu beachten ist, dass das Versuchsseil M6 auf Grund seines konstruktiven Aufbaus nur über ca. halb so viele tragenden Fasern verfügt wie das Seil V6. Die Zugbeanspruchung der Fasern im Versuchsseil M6 ist somit höher als die der Fasern im Versuchsseil V6.

In Abbildung 4.35 sind die Ergebnisse der Hochdynamikversuche der beiden Versuchsseile V6 und M6 vergleichend dargestellt.

Die schwach ausgeprägte, abschnittsweise bemerkbare Abhängigkeit der Seillebensdauer von der Geschwindigkeit des Versuchsseils V6 wird im vorherigen Abschnitt bereits aufgezeigt. Im Gegensatz hierzu zeigt das Versuchsseil M6 absolut keine Abhängigkeit der Seillebensdauer von den Dynamikparametern

¹⁰⁹ vgl. Abbildung 4.6 Vergleich der Lebensdauern der Versuchsseile D2, T2, V2, V6 und M6 im Standard-Biegeversuch

Geschwindigkeit und Beschleunigung. Ebenso liegt die Streuung der Versuchsergebnisse um den Grenzwert des Versuchsseils M6 in einem sehr schmalen Band. Trotz der geringeren Anzahl an tragenden Fasern erreicht das gelegte Versuchsseil M6 durchweg höhere Lebensdauern als das Versuchsseil V6.

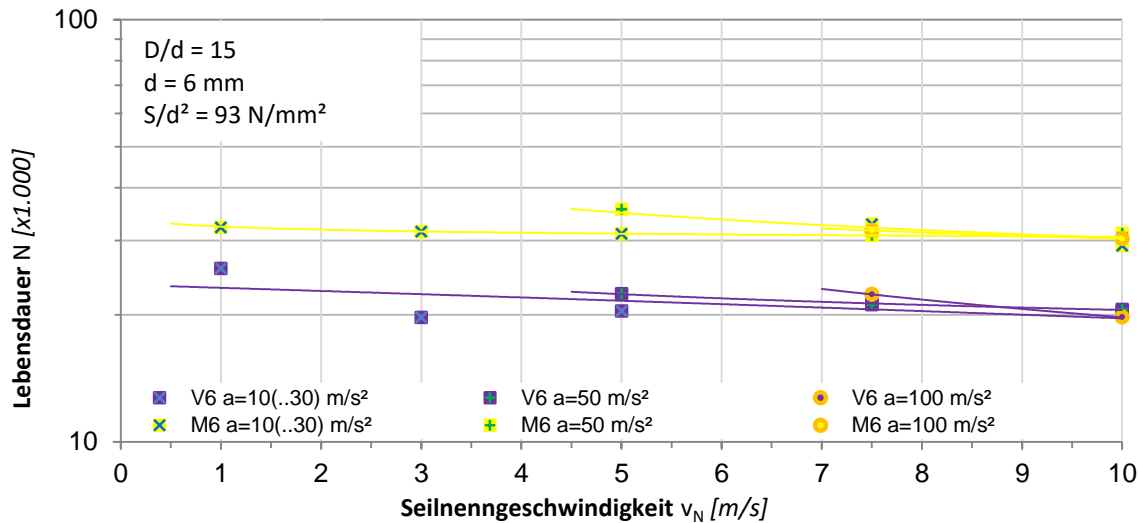


Abbildung 4.35: Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seilkonstruktionen

Vergleicht man die Ergebnisse der Hochdynamikversuche mit denen der Standard-Dauerbiegeversuche so fällt auf, dass das Versuchsseil M6 im Hochdynamikversuch praktisch die gleichen Lebensdauern erreicht wie im Standard-Biegeversuch, während für die offenen 12-fach Geflechte stets ein Abfall der Lebensdauer im Hochdynamikversuch verzeichnet werden muss. Das Versuchsseil M6 reagiert also vollkommen unempfindlich auf die Variation der Versuchsparameter Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Dieses Verhalten lässt sich mit dem schützenden Mantel des Versuchsseil M6 erklären. Somit erfahren die Fasern der offenen Seilgeflechte bei Erhöhung der Versuchsdynamik eine höhere Schädigung als im Standard-Biegeversuch.

4.4.6. Auswertung nach Lage der Bruchstellen

In der bisherigen Betrachtung der Ergebnisse der Hochdynamikversuche wird rein auf die Anzahl der ertragenen Biegewechsel eingegangen. Nach Abbildung 3.17, in der das Bewegungsprofil am Hochdynamikprüfstand vorgestellt wird, lässt sich die Lage der Bruchstelle und damit der Ort der größten Schädigung einer Beschleunigungszone oder einer Zone konstanter Geschwindigkeit zuordnen. Hieraus können wiederum Rückschlüsse auf die Schädigungsmechanismen gezogen werden.

In den folgenden Tabellen ist die jeweilige Lage des Bruchs für die verschiedenen Versuche dargestellt. Versuche, die im Bereich konstanter Geschwindigkeit $l_{v=k}$ gebrochen sind, sind dabei gelb hinterlegt während die Versuche, bei denen der Bruch in der beschleunigten Biegelänge l_a eingetreten ist, blau dargestellt sind. In diesen Fällen ist mit angegeben, in welchem Bereich der Beschleunigungszone der Bruch eingetreten ist. Auf Grund unterschiedlicher Beschleunigungslängen erfolgt die Angabe der Lage in Prozent der Beschleunigungslänge, wobei der Bewegungszyklus bei 0 % l_a beginnt und bei 100 % l_a der Beschleunigungsvorgang abgeschlossen ist und die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit folgt. Versuche, bei denen der Bruch im Übergangsbereich zwischen Beschleunigungszone l_a und Konstantfahrzone $l_{v=k}$ eingetreten ist, sind grün hinterlegt. Dieser Fall ist nur bei denen dickeren Versuchsseilen V6 und M6 zu finden, da der Bruch bei diesen Seilen über eine längere Strecke ausfasert, weshalb die Bruchstelle hier nicht immer exakt bestimmt werden kann.

D2	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$	-
$v = 5 \text{ m/s}$	39% l_a	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$
$v = 7,5 \text{ m/s}$	36% l_a	36% l_a	$l_{v=k}$
$v = 10 \text{ m/s}$	19% l_a	35% l_a	$l_{v=k}$

Tabelle 4.2: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil D2

T2	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$	-
$v = 5 \text{ m/s}$	92% l_a	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$
$v = 7,5 \text{ m/s}$	89% l_a	81% l_a	$l_{v=k}$
$v = 10 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	45% l_a	$l_{v=k}$

Tabelle 4.3: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil T2

V2	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$	-
$v = 5 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$
$v = 7,5 \text{ m/s}$	41% l_a	82% l_a	$l_{v=k}$
$v = 10 \text{ m/s}$	95% l_a	77% l_a	$l_{v=k}$

Tabelle 4.4: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil V2

V6	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 5 \text{ m/s}$	$67\% l_a$	$l_{v=k}$	-
$v = 7,5 \text{ m/s}$	$34\% l_a$	$l_{v=k}$	$l_a / l_{v=k}$
$v = 10 \text{ m/s}$	$l_a / l_{v=k}$	$l_a / l_{v=k}$	$l_{v=k}$

Tabelle 4.5: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil V6

M6	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 5 \text{ m/s}$	$l_a / l_{v=k}$	$l_a / l_{v=k}$	-
$v = 7,5 \text{ m/s}$	$l_a / l_{v=k}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$
$v = 10 \text{ m/s}$	$76\% l_a$	$43\% l_a$	$l_a / l_{v=k}$

Tabelle 4.6: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil M6

Für alle fünf Tabellen ergibt sich hierbei ein ähnliches Bild. Bei allen Versuchsseilen treten Brüche sowohl im Beschleunigungsbereich wie auch im Konstantfahrbereich auf. Bei näherer Betrachtung kann man feststellen, dass sich die Brüche, die in der Beschleunigungszone auftreten, durchweg in der unteren linken Ecke der Tabellen konzentrieren, d.h. im Bereich niedriger Beschleunigungen und hoher Geschwindigkeiten.

Vergleicht man die Tabellen nun detailliert in horizontalen Zeilen so fällt auf, dass bei den beiden niedrigen Versuchsgeschwindigkeiten $v = 1 \text{ m/s}$ und $v = 3 \text{ m/s}$ alle Brüche in der Zone konstanter Geschwindigkeit und kein einziger in der Beschleunigungszone auftreten. Geht man analog in vertikaler Richtung vor, d.h. man betrachtet nun die einzelnen Spalten der Tabellen, so zeigt sich, dass bei maximaler Beschleunigung von $a = 100 \text{ m/s}^2$ kein Bruch in der Beschleunigungszone sondern alle Brüche im Bereich konstanter Geschwindigkeit brechen.

Zusammengefasst brechen die Versuchsseile also durchweg bei niedrigen bis mittleren Beschleunigungen und hohen bis mittleren Geschwindigkeiten vermehrt in der Beschleunigungszone. Die Versuchsseile, deren Bruch in diesem Bereich eingetreten ist, werden im Folgenden zur sogenannten beschleunigungskritischen Gruppe zusammengefasst. Alle anderen Versuche, d.h. diejenigen, die in der Zone konstanter Geschwindigkeit gebrochen sind, werden zur sogenannten geschwindigkeitskritischen Gruppe zusammengefasst.

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Längen der verschiedenen Beschleunigungszonen je nach Versuchsparametern variieren und somit die Längen von Beschleunigungs- und Konstantfahrzone in keinem konstanten Verhältnis stehen, vgl. Abbildung 3.18. Für die in der beschleunigungskritischen Gruppe zusammengefassten Versuche ergibt sich ein Verhältnis von $l_a/l_{v=k}$ zwischen 2,4 und 5,2. Die Längen der Beschleunigungszonen sind in diesen Fällen also deutlich größer als die Längen der Konstantfahrzonen. Für die Versuche, die in der geschwindigkeitskritischen Gruppe zusammengefasst werden, ergibt sich hingegen ein Verhältnis zwischen 0,3 und 5,2. In einem Teil dieser Versuche ist also die Beschleunigungszone größer als die Konstantfahrzone, während es sich in den anderen Versuchen genau umgekehrt verhält. Unterstellt man allen Versuchen nun eine rein statistische Verteilung der Lage der Brüche über der kompletten Seillänge, so ergibt sich für die beschleunigungskritische Gruppe aufgrund ihrer hohen Beschleunigungslängen eine höhere Wahrscheinlichkeit des Brucheintritts im Beschleunigungsbereich. Dies unterstreicht die in Abschnitt 4.4.2 errungene Erkenntnis, dass ein Großteil der Versuchsseile keine bis lediglich geringe Abhängigkeit der Seillebensdauer von Geschwindigkeit und Beschleunigung aufweisen. Im folgenden Abschnitt soll dies jedoch noch tiefergehend untersucht werden, um diese Theorie zu bestätigen oder zu widerlegen.

4.4.7. Auswertung nach Seilgeschwindigkeit an der Bruchstellen

Im vorhergehenden Kapitel wurde festgestellt, dass bei einem Teil der Versuche der Bruch in der Zone mit konstanter Geschwindigkeit eintritt, während die Seile in anderen Versuchen im Beschleunigungsbereich brechen. Die zuerst genannten Versuche lassen sich zu einer geschwindigkeitskritischen Gruppe zusammenfassen, während die zuletzt genannten zur beschleunigungskritischen Gruppe gezählt werden können. Betrachtet man nun die Geschwindigkeit, die in der Bruchstelle wirkte, so ergibt sich das folgende Bild:

Während der Bruch bei Versuchen der geschwindigkeitskritischen Gruppe definitionsgemäß bei Nenngeschwindigkeit $v = v_N$ erfolgt, unterscheidet sich die Geschwindigkeit in der Bruchstelle für die Versuche der beschleunigungskritischen Gruppe von dieser Nenngeschwindigkeit. So lässt sich auf Basis der Bruchlage¹¹⁰ sowie der Kenntnis des Bewegungsprofils die Geschwindigkeit in der Bruchstelle ermitteln. In Tabelle 4.7 bis Tabelle 4.11 sind die entsprechenden Geschwindigkeiten in den Bruchstellen in [m/s] dargestellt.

¹¹⁰ vgl. Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.6

D2	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	1	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	3	3	-
$v = 5 \text{ m/s}$	3,1	5	5
$v = 7,5 \text{ m/s}$	4,6	5,1	7,5
$v = 10 \text{ m/s}$	4,5	6,6	10

Tabelle 4.7: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil D2

T2	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	1	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	3	3	-
$v = 5 \text{ m/s}$	4,8	5	5
$v = 7,5 \text{ m/s}$	7,2	->7,5	7,5
$v = 10 \text{ m/s}$	10	7,4	10

Tabelle 4.8: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil T2

V2	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	1	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	3	3	-
$v = 5 \text{ m/s}$	5	5	5
$v = 7,5 \text{ m/s}$	4,9	->7,5	7,5
$v = 10 \text{ m/s}$	->10	9,8	10

Tabelle 4.9: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil V2

V6	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	1	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	3	-	-
$v = 5 \text{ m/s}$	4	5	-
$v = 7,5 \text{ m/s}$	4,4	7,5	7,5
$v = 10 \text{ m/s}$	10	10	10

Tabelle 4.10: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil V6

M6	$a = 10 \text{ m/s}^2$	$a = 50 \text{ m/s}^2$	$a = 100 \text{ m/s}^2$
$v = 1 \text{ m/s}$	1	-	-
$v = 3 \text{ m/s}$	3	-	-
$v = 5 \text{ m/s}$	5	5	-
$v = 7,5 \text{ m/s}$	7,5	7,5	7,5
$v = 10 \text{ m/s}$	7,1	7,1	10

Tabelle 4.11: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil M6

Vergleicht man die Geschwindigkeiten an den Bruchstellen miteinander, so kann man feststellen, dass die Versuchsseile T2, V2, V6 und M6 aus Technora und Vectran bei Geschwindigkeiten brechen, die nahe oder gleich der Nenngeschwindigkeit liegen. Für die beschleunigungskritischen Versuche des Seils D2 kann hingegen festgehalten werden, dass der Bruch deutlich früher, d.h. bei niedrigeren Geschwindigkeiten erfolgt.

4.4.8. Zusammenfassung der Hochdynamikversuche

Nach Auswertung aller Hochdynamikversuche an den Versuchsseilen D2, T2, V2, V6 und M6 kann lediglich für das Versuchsseil D2 aus Dyneema eine Abhängigkeit der Seillebensdauer von den beiden Dynamikparametern Geschwindigkeit und Beschleunigung nachgewiesen werden. So fällt die ertragbare Bruchbiegewechselzahl mit steigender Geschwindigkeit deutlich ab, während sie bei Erhöhung der Beschleunigung zunimmt. Diese Unterschiede in der Seillebensdauer lassen sich jedoch nicht unbegrenzt beeinflussen. So vereinigen sich sowohl die Versuche mit steigender Geschwindigkeit, wie auch die Versuche mit zunehmender Beschleunigung asymptotisch in einem gemeinsamen Grenzwert. Diese Annäherung an einen Grenzwert zeigt sich für alle fünf untersuchten Versuchsseile.

Hierbei ist für das Versuchsseil T2 aus Technora sowie das Versuchsseil M6 in Kern-Mantel-Konstruktion keinerlei Einfluss der Dynamikparameter auf die Seillebensdauer zu verzeichnen. Vielmehr kann sicher gezeigt werden, dass die Variation von Geschwindigkeit und Beschleunigung die Seillebensdauer dieser beiden Versuchsseile nicht beeinflusst. Die beiden Versuchsseile T2 und M6 sind somit unempfindlich gegenüber den Dynamikparametern.

Für die beiden material- und konstruktionsgleichen Versuchsseile V2 und V6 zeigt sich hingegen nur eine leichte Abhängigkeit der Seillebensdauer von den Dynamikparametern. So nimmt die Anzahl der ertragbaren Biegewechsel mit steigender Geschwindigkeit moderat ab, während die Beschleunigung keinen merklichen Einfluss auf die Seillebensdauer nimmt.

Nach weiter reichender Auswertung der Hochdynamikversuche im Hinblick auf die Bruchstelle über dem Bewegungsprofil und der Geschwindigkeit an der Bruchstelle kann man festhalten, dass die Versuchsseile T2, V2, V6 und M6 aus Vectran fast durchgehend im Bereich der maximalen Geschwindigkeiten versagen. Das Versuchsseil D2 aus Dyneema versagt jedoch im Gegensatz zu den anderen Seilen bei hohen Geschwindigkeiten und niedrigen Beschleunigungen, d.h. bei langen Beschleunigungsstrecken, eher mittig im Beschleunigungsbereich.

Vergleicht man die Ergebnisse mit den in Abschnitt 2.4.5 dargestellten geschwindigkeitsabhängigen Untersuchungsergebnissen an Garnen, die sich auf die Faser-Faser-Reibung beziehen, so sind diese Ergebnisse offenkundig nicht auf die Versuchsergebnisse der anwendungsorientierten Hochdynamikversuche übertragbar.

Fasst man all diese Erkenntnisse zusammen, so lässt sich der Verschleißprozess der HM-HT-Faserseile im Hochdynamikversuch auf äußeren Verschleiß zurückführen, der in der Kontaktzone zwischen Prüfscheibe und Seil entsteht. Diese Erkenntnis wird durch die Tatsache gestützt, dass das Versuchsseil M6, dessen tragende Fasern durch einen umhüllenden Mantel geschützt sind, im Hochdynamikversuch eine von Geschwindigkeit und Beschleunigung vollkommen unabhängige, konstante Lebensdauer aufweist. Diese konstante Lebensdauer stimmt dabei mit der in Standard-Dauerbiegeversuchen ermittelten Lebensdauer bis auf geringfügige Abweichungen sehr gut überein. Die beiden offenen Konstruktionen des gleichen Faserwerkstoffs V2 und V6 zeigen dagegen eine deutlichere Abweichung der Seillebensdauer im Hochdynamikversuch im Vergleich zum Standard-Biegeversuch, was auf das Fehlen eines schützenden Mantels zurückzuführen ist. Ebenso ist der Abfall der dynamikunabhängigen Lebensdauer des Versuchsseils T2 zu erklären. Hinzu kommt, dass sowohl die Vectran- wie auch die Technora-Faser einen sehr ähnlich großen Reibwert von $\mu = 0,12 - 0,15$ aufweisen. Der Reibwert von Dyneema und dem Versuchsseil D2 liegt dagegen deutlich geringer bei $\mu = 0,08 - 0,11$. Die Faser ist somit deutlich glatter als die beiden vorgenannten. Im Hochdynamikversuch müssen die Versuchsseile die Seilscheiben treiben. Auf Grund der hohen Dynamik der Bewegungsabläufe im Hochdynamikversuch, der Massenträgheit der Scheiben und der Reibvorgänge in den Scheibenlagerungen kommt es bei jeder Beschleunigungsänderung Δa zu Relativbewegung zwischen Seil und Scheibe, was als Gleitschlupf bezeichnet wird. Je schlechter der Reibwert zwischen Seil und Scheibe ist, desto stärker wird das Durchrutschen des Seils beim Treiben der Scheibe begünstigt und desto länger wird die Zone des Gleitschlupfs, der Reibweg. Dieser Vorgang ist sowohl geschwindigkeits- wie auch beschleunigungsabhängig.

Nach Gleichung (2.10) ist die eingebrachte Reibarbeit W_{Rb}^{111} proportional zum zurückgelegten Reibweg s . Entsprechend steigen die verrichtete Reibarbeit und damit der abrasive, lebensdauerermindernde Verschleiß an der Seiloberfläche mit wachsender Gleitzzone an.

Auf Basis dieser Zusammenhänge lässt sich die deutlichere Abhängigkeit der Lebensdauer des glatteren Versuchsseils D2 von Geschwindigkeit und Beschleunigung im Hochdynamikversuch erklären. Ebenso lässt sich das geschwindigkeits- und beschleunigungsunabhängige Verhalten des Kern-Mantel-Seils M6 weiter erklären. So besteht der Mantel, mit dem die tragenden Fasern umflochten sind, aus Polyester. Der Reibwert von Polyester auf Stahl liegt mit $\mu = 0,54$ [49] sehr hoch. Entsprechend wenig gleitet das Seil über die Scheibe, was zu einem geringen Einfluss der Dynamikfaktoren auf die Seillebensdauer führt. Darüber hinaus begünstigt der durch den Mantel stabilisierte Seilquerschnitt den scheinbaren Laufradiuschlupf sowie den Dehnungsschlupf.

Um diese Erkenntnis weiter zu untersuchen, werden im Folgenden mikroskopische Untersuchungen an den Bruchenden der Versuchsseile durchgeführt. Zudem werden weitere Schlupfmessungen am Hochdynamikprüfstand vorgenommen und ausgewertet.

4.5. Schlupfmessungen am Hochdynamikprüfstand

In Kapitel 4.4 werden die Ergebnisse der Hochdynamikversuche, in denen sowohl die Geschwindigkeit wie auch die Beschleunigung in speziellen Biegeversuchen in einem weiten Bereich systematisch variiert werden, vorgestellt und zusammengefasst. Hierbei wird festgestellt, dass Versuchsseile aus verschiedenen Werkstoffen und in verschiedenen Macharten teils deutlich unterschiedlich auf die Variation der Eingabeparameter reagieren. Im Weiteren kann dieser bislang unbekannt Sachverhalt auf Kontakt- und Reibungsverhältnisse zwischen Seil und Scheibe zurückgeführt werden. Um diesen Sachverhalt noch tiefergehend untersuchen zu können wird der Hochdynamikprüfstand¹¹² um einen Messaufbau zur Untersuchung des Schlupfs zwischen Seil und Scheibe erweitert.

4.5.1. Versuchsaufbau der Schlupfmessungen

Nach Kapitel 2.4.4 beschreibt der Seilschlupf die Wegdifferenz zwischen Seil und Scheibe. Um den zurückgelegten Weg der Seilscheibe erfassen zu können, wird ein Lasermesssystem „optoNCDT 1700“ des Herstellers „MicroEpsilon“¹¹³ eingesetzt.

¹¹¹ vgl. Abschnitt 2.4.4 Seilschlupf und Verschleiß laufender Seile

¹¹² vgl. Abschnitt 3.6.1 Hochdynamikprüfstand und Prüfmethode

¹¹³ MicroEpsilon, auch „µε“ geschrieben, ist ein mittelständisches Unternehmen und führend auf dem Gebiet der Mess- und Prüftechnik

Zusätzlich wird an der Prüfscheibe eine spiralförmige Scheibe aufgesetzt, die für jede Winkelposition einen definierten Radius aufweist. Der Laser wird so ausgerichtet, dass er den Abstand zur Spiralscheibe radial erfasst. Die Lage der Seilscheibe lässt sich somit durch einen definierten Ausgabewert des Abstandslasers beschreiben. Den realen Versuchsaufbau zeigt Abbildung 4.36.

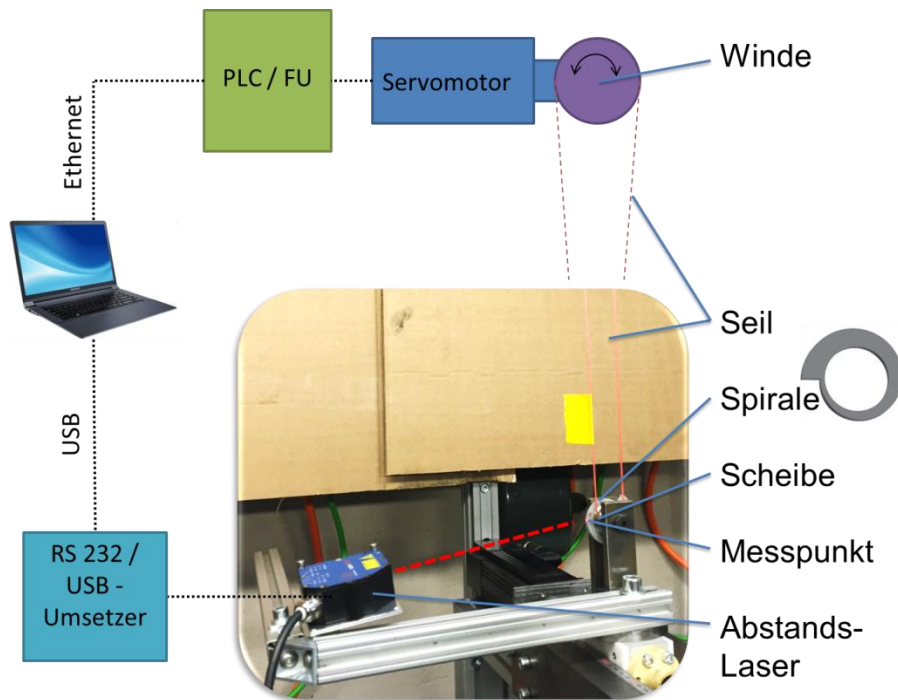


Abbildung 4.36: Messaufbau zur Untersuchung des Schlupfs

Die Position des formschlüssig mit der Antriebswinde verbundenen Versuchsseils kann durch den Absolutwert-Encoder des Winden-Servomotors über die PLC¹¹⁴ ausgegeben werden. Beide Signale werden zeitcodiert mit Hilfe eines Mess-Computers und entsprechender Software erfasst und als .csv-Datei¹¹⁵ abgespeichert. Auf Grund der hohen Dynamik wird der Abstandslaser mit der höchstmöglichen Abtastfrequenz von $f = 2,5 \text{ kHz}$ betrieben. Bei der Aufzeichnung einiger weniger Bewegungszyklen des Hochdynamikprüfstands entsteht somit eine erhebliche Datenmenge, die über ein eigengeschriebenes Analyseprogramm mit Hilfe des Softwaretools „LabVIEW“¹¹⁶ ausgewertet wird.

Mit diesem Messaufbau lässt sich der Seilschlupf dynamisch in Echtzeit aus der Geschwindigkeitsdifferenz von Absolutwert-Encoder und Lasermesssystem

¹¹⁴ PLC = Programmable Logic Controller (Speicherprogrammierbare Steuerung)

¹¹⁵ csv = comma-separated-values (Dateiformat)

¹¹⁶ LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) ist ein grafisches Programmiersystem des US-amerikanischen Softwareherstellers National Instruments, das für Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik eingesetzt wird.

berechnen. Die Messung erfolgt jeweils während einer Umfahrt für jedes Feld der Versuchsmatrix. Die hohe Abtastrate von 2.500 Hz ermöglicht, die für jede Seilposition $s(t)$ des Bewegungsprofils¹¹⁷ spezifische Schlupfbeanspruchung, exakt zu ermitteln. Als Ergebnis erhält man den Schlupfverlauf über der Seilposition $s(t)$ bzw. über der Zeit t . Auf Grund der Überlagerung einzelner Schlupfarten bezieht sich das Ergebnis auf den Gesamtschlupf als Summe aller Einzelkomponenten. Die Schlupfmessungen werden mit dem Versuchsseil D2 aus Dyneema bei einem konstanten Verfahrweg durchgeführt.

4.5.2. Ergebnis der Schlupfmessungen

In Abbildung 4.37 bis Abbildung 4.39 sind exemplarisch die Kurven der Schlupfmessungen mit Nenngeschwindigkeit $v = 5$ m/s und Beschleunigungen zwischen $a = 10$ m/s² und $a = 100$ m/s² dargestellt. Die rote Kurve zeigt dabei den aus der Steuerung entnommenen Weg der Antriebswinde über der Zeit, während die blaue Kurve die Messdaten des Lasers und damit die Geschwindigkeit der Prüfscheibe darstellt.

Die Messungen zeigen, dass der von der Scheibe zurückgelegte Weg dem Weg der Antriebsstrommel hinterher eilt. Dieser Schlupf nimmt mit größerer Beschleunigung deutlich zu. Allerdings zeigen die Kurven im mittleren Bereich, d.h. im Bereich konstanter Fahrgeschwindigkeiten keinen vollständig parallelen Verlauf was bedeutet, dass es auch in diesem Bereich mit $a = 0$ m/s² zu Schlupf zwischen Seil und Scheibe kommt. Der Schlupf kann somit nicht nur auf den Beschleunigungsbereich beschränkt werden. Ursächlich hierfür ist, neben dem geringen Reibwert des eingesetzten Faserseils zur Scheibe, ein Reibmoment, das durch die Lagerung der Seilscheibe erzeugt wird. Diese Reibung resultiert in einem der Bewegung entgegen gerichteten Bremsmoment. Das Bremsmoment ist dabei nicht konstant sondern von einer Vielzahl an internen und externen Einflüssen wie Umgebungs- und Lagertemperatur, Schmierung und Verschleiß abhängig.

Neben der Zunahme des Schlupfes bei steigender Beschleunigung kann ebenfalls eine deutliche Zunahme des Schlupfes bei steigender Geschwindigkeit registriert werden. Den geringsten Schlupf weist somit der Versuch v1a10 mit der minimalen Geschwindigkeit von $v = 1$ m/s bei minimaler Beschleunigung von $a = 10$ m/s² auf, während der größte Schlupf bei maximaler Geschwindigkeit und Beschleunigung registriert werden kann.

¹¹⁷ vgl. Abbildung 3.17: Veränderliches Bewegungsprofil des Hochdynamikprüfstands

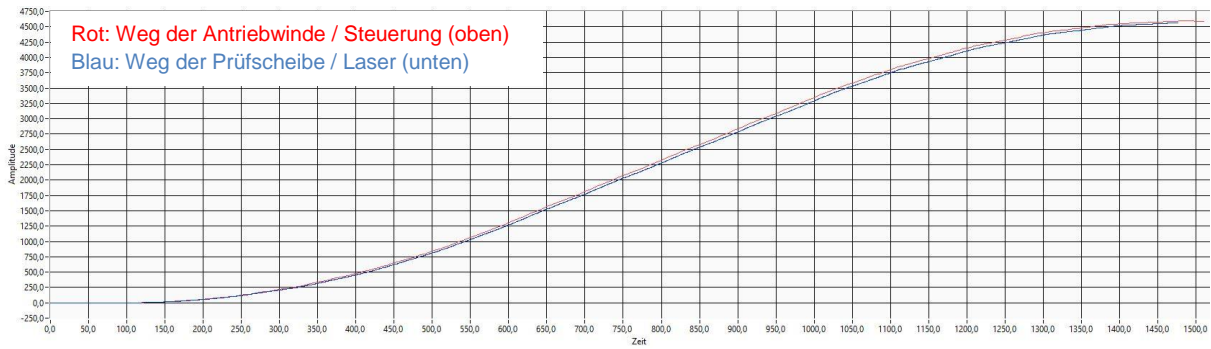


Abbildung 4.37: Schlupfmessung Versuch Dyneema D2, $v=5 \text{ m/s}$, $a=10 \text{ m/s}^2$

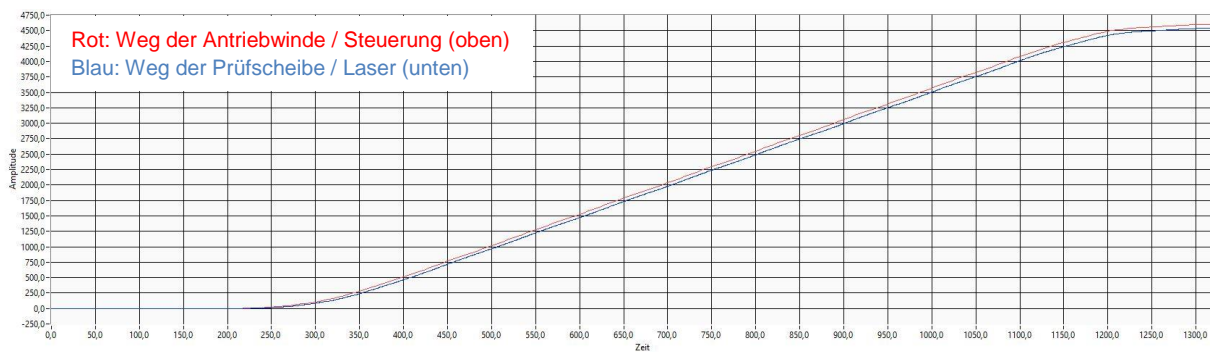


Abbildung 4.38: Schlupfmessung Versuch Dyneema D2, $v=5 \text{ m/s}$, $a=50 \text{ m/s}^2$

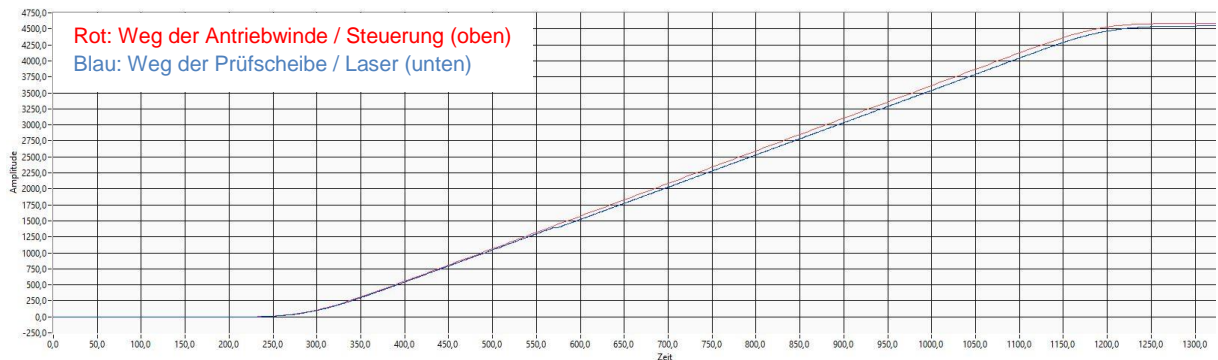


Abbildung 4.39: Schlupfmessung Versuch Dyneema D2, $v=5 \text{ m/s}$,
 $a=100 \text{ m/s}^2$

4.6. Mikroskopische Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird eine Vielzahl an Biege-, Zug-Schwell-, Zerreiß- und vor allen Dingen Hochdynamikversuche mit unterschiedlichen Parametern an fünf verschiedenen Versuchsseilen durchgeführt. Die Ergebnisse der Hochdynamikversuche zeigen hierbei, dass unterschiedliche Materialien wie auch unterschiedliche Macharten sehr verschieden auf die Variation von Geschwindigkeit und Beschleunigung im Biegeversuch reagieren. Nach Auswertung der Lage der

Brüche und unter Miteinbeziehung der unterschiedlichen Eigenschaften der Versuchsseile konnte eine Erklärung für dieses bislang nicht bekannte Verhalten gefunden werden. Demnach ist das unterschiedliche Versagensverhalten der Versuchsseile auf die Kontakt- und Reibungsverhältnisse zwischen Seil und Scheibe zurückzuführen.

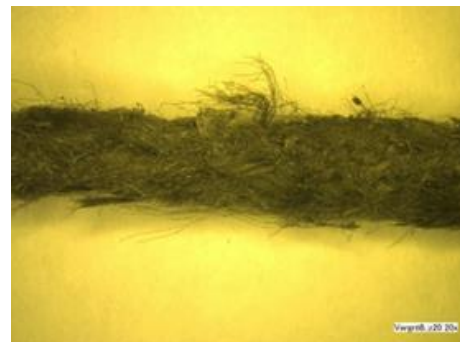
Die Schädigungsmechanik hochdynamisch beanspruchter Faserseile soll im Folgenden durch mikroskopische Untersuchungen näher betrachtet und erforscht werden. Hierzu werden digitalmikroskopische Aufnahmen der Versuchsseile und deren Bruchenden am IFT angefertigt. Neben Versuchsseilen, die im Hochdynamikprüfstand untersucht wurden, werden ebenso Prüflinge aus den Standard-Biegeversuchen für die mikroskopischen Untersuchungen herangezogen. Hierdurch ermöglicht sich der Vergleich zwischen beiden Prüfmethode und in Bezug auf die Auswirkung der Dynamikparameter.¹¹⁸

4.6.1. Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Für das Versuchsseil T2 aus Technora ergibt sich für sämtliche Hochdynamikversuche dasselbe äußere Erscheinungsbild. Die Prüflinge zeigen allesamt deutliche Auffaserungen an der Seiloberfläche. Oft stehen ganze Faserbündel aus dem Seilverband aus. Exemplarisch zeigt Abbildung 4.40 wie identisch das Erscheinungsbild von Versuchsseilen T2 ist, die unter stark unterschiedlichen Dynamikparametern untersucht wurden.



(a) T2, $v=3\text{m/s}$, $a=10\text{m/s}^2$, Vergrößerung 20x



(b) T2, $v=10\text{m/s}$, $a=100\text{m/s}^2$, Vergrößerung 20x

Abbildung 4.40: Vergrößerte Darstellung des Versuchsseils T2 aus Hochdynamikversuchen

Ein ähnliches Ergebnis ist für die Versuchsseile M6 aus ummanteltem Vectran zu erkennen. Über sämtliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen hinweg zeigt der von außen sichtbare Mantel stets dasselbe Erscheinungsbild. Für die beiden

¹¹⁸ Sämtliche Prüflinge wurden mikroskopisch untersucht. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich ausgewählte Bilder und Ergebnisse vorgestellt. Die vollständige mikroskopische Untersuchung erfolgt in der vom Autor betreuten Masterarbeit von S. Liu [103]

Versuchsseile T2 und M6 ist somit äußerlich kein Einfluss von verschiedener Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erkennen. Setzt man dieses klar sichtbare Ergebnis in Bezug zu den Lebensdaueruntersuchungen in Kapitel 4.4.2, so kann die Unabhängigkeit der Seile T2 und M6 von Geschwindigkeit und Beschleunigung durch das äußere Erscheinungsbild der Prüflinge eindeutig unterstrichen werden.

In Abbildung 4.41 ist das Erscheinungsbild des Versuchsseils V2 unter verschiedenen Dynamikparametern vergleichend dargestellt.



(a) V2, $v=3\text{m/s}$, $a=10\text{m/s}^2$, Vergrößerung 20x



(b) V2, $v=10\text{m/s}$, $a=100\text{m/s}^2$, Vergrößerung 20x

Abbildung 4.41: Vergrößerte Darstellung des Versuchsseils V2 aus Hochdynamikversuchen

Das links dargestellte Seil (a) wurde mit niedriger Dynamik untersucht und zeigt leichte Schädigungen der einzelnen Fasern und Garne. Das rechts abgebildete Seil (b) wurde hingegen mit hoher Geschwindigkeit und höchster Beschleunigung beaufschlagt. Im Anbetracht aller Versuchsseile V2 ist zu erkennen, wie die äußerlich sichtbare Schädigung mit steigender Beschleunigung im Allgemeinen zunimmt, mit steigender Geschwindigkeit jedoch unregelmäßig zu- und abnimmt. Das material- und konstruktionsgleiche Seil V6 zeigt ein ähnliches Erscheinungsbild. Hieraus lässt sich der schädigende Einfluss der Beschleunigung auf die Seillebensdauer ableiten, während sich der Einfluss der Geschwindigkeit nicht eindeutig folgern lässt. Dasselbe Ergebnis konnte bereits aus den Lebensdaueruntersuchungen unter hoher Dynamik an den beiden Versuchsseilen V2 und V6 gezogen werden.

Im Vergleich zu den anderen Versuchsseilen zeigt das Versuchsseil D2 aus Dyneema außerhalb der Bruchstelle selbst deutlich geringere mechanische Beschädigungen. Neben leichten Auffaserungen ist eine deutliche Glättung der Seiloberfläche zu erkennen, die mit einer Verhärtung der Seile einhergeht und taktil eindeutig erkannt werden kann. Abbildung 4.42 zeigt zwei ausgewählte Versuchsseile D2 aus Hochdynamikversuchen.

(a) D2, $v=3\text{m/s}$, $a=10\text{m/s}^2$, Vergrößerung 20x(b) D2, $v=10\text{m/s}$, $a=100\text{m/s}^2$, Vergrößerung 20x

Abbildung 4.42: Vergrößerte Darstellung des Versuchsseils D2 aus Hochdynamikversuchen

Über alle Versuchsseile hinweg zeigen die Prüflinge aus Versuchen mit höherer Dynamik eine leicht stärkere Beschädigung der Seiloberfläche wie die aus Versuchen mit niedriger Dynamik. Die glatte Seiloberfläche deutet auf einen thermischen Reckprozess, der während der hochdynamischen Biegeversuche stattgefunden hat.

4.6.2. Zusammenfassung der mikroskopischen Untersuchungen

Sämtliche Prüflinge der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche wurden einer mikroskopischen Untersuchung unterzogen. Dabei kann für die beiden Versuchsseile T2 aus Technora und M6 aus ummanteltem Vectran keine Abhängigkeit des äußeren Erscheinungsbilds von Geschwindigkeit oder Beschleunigung erkannt werden. Vielmehr zeigen alle dieser Prüflinge dasselbe äußere Erscheinungsbild. Für die beiden offenen Vectranseile V2 und V6 zeigen sich hingegen deutliche Unterschiede im Erscheinungsbild der Seile, die vorrangig beschleunigungsabhängig sind. Geschwindigkeitsabhängige Unterschiede können keiner Regelmäßigkeit untergeordnet werden. Die Prüflinge des Versuchsseils D2 aus Dyneema zeigen mit zunehmender Geschwindigkeit und Beschleunigung leicht stärkere äußere Beschädigungen. Zudem sind alle Seile aus Dyneema im Bereich der Biegezone stark verhärtet und deutlich glatter im Vergleich zum Anlieferungszustand. Dies ist auf einen thermischen Reckprozess während der Biegeversuche zurückzuführen.

Zusammenfassend spiegelt sich im äußeren Erscheinungsbild der untersuchten Prüflinge der bereits in Abschnitt 4.4.8 aufgedeckte materialabhängige Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Seilschädigung und Seillebensdauer wieder. Dieses Ergebnis unterstreicht die aus hochdynamischen Lebensdauerersuchen errungenen Erkenntnisse vollumfänglich und untermauert deren Korrektheit.

5. Referenzversuche und Diskussion

Im Kapitel 4 werden die verschiedenen Versuchsergebnisse der fünf ausgewählten Versuchsseile¹¹⁹ vorgestellt, diskutiert und zusammengefasst. Hierbei zeigen sich Gemeinsamkeiten wie auch Unterschiede in Bezug auf die Eigenschaften der unterschiedlichen Faserwerkstoffe und Seilkonstruktionen. Am deutlichsten zeigt das Versuchsseil D2 aus Dyneema Abweichungen im Vergleich zu den anderen Versuchsseilen. Um dieses Ergebnis noch tiefergehend zu untersuchen, wird die Versuchsmatrix um ein weiteres Versuchsseil aus Dyneema erweitert, das im Folgenden als Versuchsseil „E2“ bezeichnet wird. Dieses Referenzseil weist die gleiche Machart wie die Versuchsseile D2, T2 und V2 auf und stammt vom gleichen Hersteller wie die Versuchsseile T2 und V2. Die Kennwerte des Versuchsseils E2 sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Als weitere Referenz wird ein Drahtseil in die Versuchsmatrix mit aufgenommen, das im Weiteren als Versuchsseil „S2“ bezeichnet wird und dessen Kennwerte ebenfalls in Tabelle 5.1 aufgelistet sind. Die Durchführung von Referenzversuchen mit einem Seil aus Stahldraht soll dabei helfen die Versuchsergebnisse, die für die hochmodularen Faserseile erlangt werden, besser einordnen zu können. Zudem existieren bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen, in denen der Einfluss der Dynamikparameter auf die Lebensdauer laufender Stahlseile systematisch untersucht wird. Der Nenndurchmesser des Referenzseils S2 entspricht mit 2 mm dem Durchmesser einiger anderer Versuchsseile. Zudem wird die Festigkeit mit $R_m = 2160 \text{ N/mm}$ relativ hoch gewählt, damit die Mindestbruchlast des Seils in einer gleichen Größenordnung liegt wie die der HM-HT-Faserseile. Das Versuchsseil S2 ist in der Konstruktion 6x19S WSC¹²⁰ in Kreuzschlag ausgeführt. Es verfügt also über sechs Außenlitzen mit je 19 Drähten und eine Stahleinlage und ist somit nicht drehungsfrei oder drehungsarm.

Ähnlich wie bei den HM-HT-Faserseilen aus Kapitel 3 und 4 werden die beiden Referenzseile unter anderem folgenden Versuchen unterworfen:

- Biegeversuche auf einer Standard-Dauerbiegemaschine mit $D/d = 15$,
- Zugschwellversuche mit bis zu 50 % F_w ,
- Zugversuche zur Ermittlung der Mindest- bzw. Restbruchkraft,
- Hochdynamikversuche mit $v = 1 \dots 10 \text{ m/s}$ und $a = 10 \dots 100 \text{ m/s}^2$.

Die Ergebnisse der Versuche an den beiden Referenzseilen werden in den Abschnitten 5.1 und 5.2 vorgestellt und diskutiert.

¹¹⁹ vgl. Abschnitt 3.1 Versuchsseile

¹²⁰ WSC = Wire Strand Core = Litzeneinlage



Seilbezeichnung	E2	S2
Herstellerbezeichnung	DynaOne	MICROPE MINISEIL 0,20 6X19
Abbildung		
Seilkonstruktion	geflochten, 12-fach	6x19S WSC B(zn k) 2160 sZ
Faserwerkstoff	UHMWPE; Dyneema SK78	Stahldraht
Beschichtung	Geoflex	-
thermofixiert/ verstreckt	ja	nein
d_n [mm]	2	2
d_{ist} [mm]	1,75	2,06
F_w [daN] (laut Hersteller)	500	313
Metergewicht [g/100m]		
laut Hersteller:	240	1.520
nach Messung:	229	1.861
Feinheit [tex]		
laut Hersteller:	2.400	15.520
nach Messung:	2.290	18.610
Flecht-/Schlaglänge [mm]	13,3	11,9
Flecht-/Schlagwinkel [°] (bzgl. d_{ist})	26,2	22,4

Tabelle 5.1: Kennwerte der ausgewählten Referenzseile¹²¹

In Abschnitt 5.3 werden die im Rahmen dieser Arbeit erlangten Ergebnisse in Bezug zum Einsatz hochmodularer Faserseile in parallelkinematischen Robotern gesetzt und mit der konkurrierenden Anwendung des klassischen Industrieroboters verglichen.

5.1. Referenzseil DynaOne 2mm, E2

Das Versuchsseil E2 besteht, wie das Versuchsseil D2, das durch sein abweichendes Verhalten auffällt, aus dem Werkstoff Dyneema SK78. Ebenso wie D2 ist auch E2 nach der Verseilung thermofixiert, d.h. thermisch verstreckt worden. Laut Hersteller liegt der Grad der Verstreckung für das Seil E2 jedoch niedriger als für das Seil D2. Um die Eigenschaften des Versuchsseils E2 mit denen des Seils D2 vollständig vergleichen zu können wird das Referenzseil E2 dem vollständigen

¹²¹ Einige Kennwerte werden üblicher Weise nur für Faserseile angegeben. Zur besseren Vergleichbarkeit ist in Tabelle 5.1 jedoch ebenfalls der Referenzwert des Stahlseils S2 mit angegeben.

Versuchsprogramm unterworfen, das auch bei allen anderen Seilen angewendet wurde.

Die Ergebnisse dieser Referenzversuche, deren Zusammenfassung sowie der Vergleich zu den zuvor vorgestellten Ergebnissen wird im Weiteren dargestellt.

5.1.1. Ergebnisse der Referenzversuche E2

In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse der Zerreiversuche am Versuchsseils E2 dargestellt.

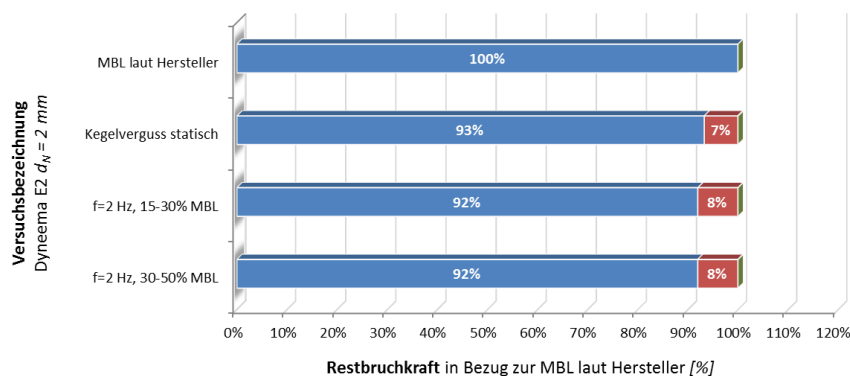


Abbildung 5.1: Restbruchkraft Versuchsseil E2

Hierbei zeigt sich, dass die experimentell bestimmte Bruchkraft des Versuchsseils um 7 % unter der angegebenen Mindestbruchkraft liegt. Auch die Prflinge, die zuvor einer schwellenden Belastung mit unterschiedlichen Lasten ausgesetzt waren, bleiben um jeweils 8 % unter der Herstellerangabe. Hieraus lässt sich zum einen schlussfolgern, dass die vom Hersteller angegebene Mindestbruchkraft etwas zu hoch angesetzt ist. Zum anderen zeigt sich fr das Versuchsseil E2, dass eine zyklisch schwellende Belastung von 500.000 Zyklen auch unter verschiedenen Lasten keine nennenswerte Schädigung im Seil hervorruft. Dies unterstreicht abermals die Ergebnisse der Zug- und Zug-Schwell-Untersuchungen an den fnf ausgewählten Versuchsseilen¹²².

Zudem werden Standard-Dauerbiegeversuche unter Variation der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 unter Beibehaltung der definierten Prfscheiben- und Rillengeometrie durchgefhrt. Die Ergebnisse dieser Dauerbiegeversuche sind in Abbildung 5.2 grafisch dargestellt. Zum Vergleich zeigt das Schaubild neben der Lebensdauerkurve des Referenzseils E2, die des ebenfalls aus Dyneema gefertigten Versuchsseils D2.

¹²² vgl. Abschnitt 4.2 Zugschwellversuche und 4.3 Zugversuche

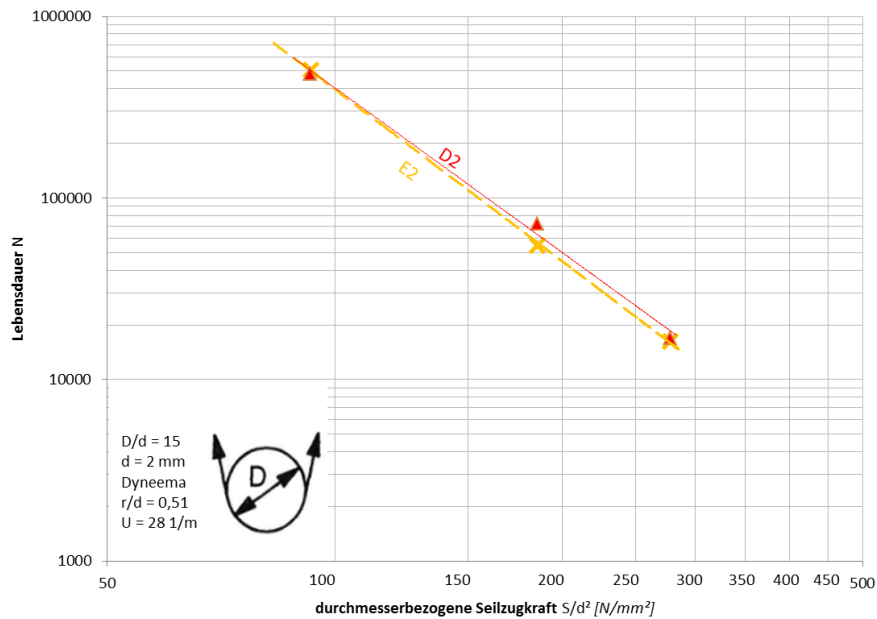


Abbildung 5.2: Lebensdauer des Versuchsseils E2 im Biegeversuch

Trotz unterschiedlicher Beschichtungen, Ist-Durchmesser, Bruchkraft und Verstreckungsgrad ergeben sich für die beiden Seile D2 und E2 sehr ähnliche Lebensdauern im Standard-Dauerbiegeversuch, die im Mittelwert um lediglich 8 % auseinander liegen. Das Verhalten des Seils E2 im Standard-Dauerbiegeversuche ist also annähernd identisch mit dem des Versuchsseils D2.

Dieses annähernd identische Lebensdauerverhalten lässt sich mit einem Verstreckungsprozess durch den Dauerbiegeversuch erklären. So weist das Versuchsseil D2 bereits zu Versuchsbeginn einen hohen Verstreckungsgrad auf, was sich in seiner sehr glatten und geschlossenen Oberfläche zeigt. Aus dieser Verstreckung resultieren die große Unterschreitung des Nenn-Durchmessers d_n von 22,5 % sowie die geringere Bruchkraft. Das Referenzseil E2 wurde nach Herstellerangabe hingegen weniger stark verstreckt, weshalb seine Oberfläche weicher und offener erscheint und der Seildurchmesser nur 12,5 % unter dem Nominalwert liegt. Im Standard-Dauerbiegeversuch unterliegen die Seile neben einer quasi-statischen Zugbeanspruchung einer Biegebeanspruchung, die sowohl durch innere wie auch äußere Reibvorgänge Wärme im Seil erzeugt. Unter Kombination von Zugbeanspruchung und Wärme finden nun Verstreckungsvorgänge im Seil statt, unter denen der Seildurchmesser ab- und die Längung zunehmen. Gleichzeitig wird die Seiloberfläche geglättet und das Seil versteift. Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 zeigen, wie sich die Seiloberfläche in der Biegezone vor und nach einem Dauerbiegeversuch darstellt.

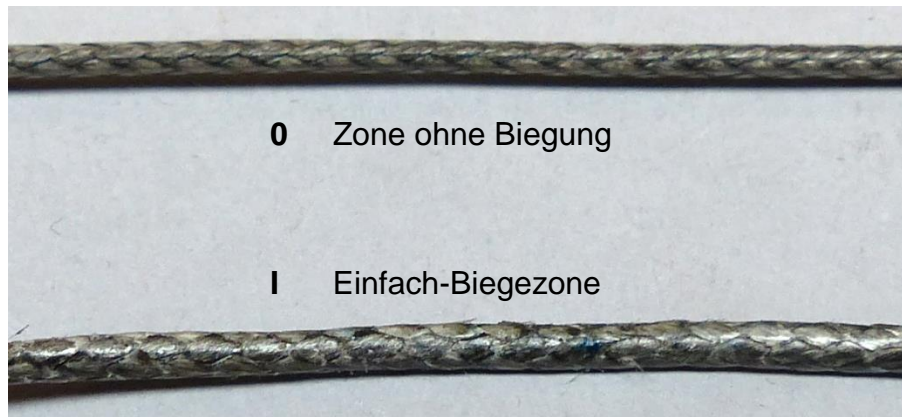


Abbildung 5.3: Vergleich Versuchsseil E2 ohne (oben, Zone 0) und mit (unten, Zone I) Biegebeanspruchung

In Abbildung 5.4 sind zudem die verschiedenen Biegezonen eines Versuchsseils exemplarisch gekennzeichnet. Während die Zone I im Vergleich zur Referenz-Zone 0 ohne Biegebeanspruchung eine deutlich glattere und härtere Oberfläche aufweist, sind im Bereich II, der Doppelbiegezone, deutliche Auffaserungen zu erkennen. In dieser Zone stehen ganze Faserbündel aus dem Seil aus. Der Seilverband ist weitestgehend zerstört. Die Zone III zeigt den Bereich, in dem es zum Bruch der verbleibenden Fasern und damit zum Seilbruch gekommen ist.

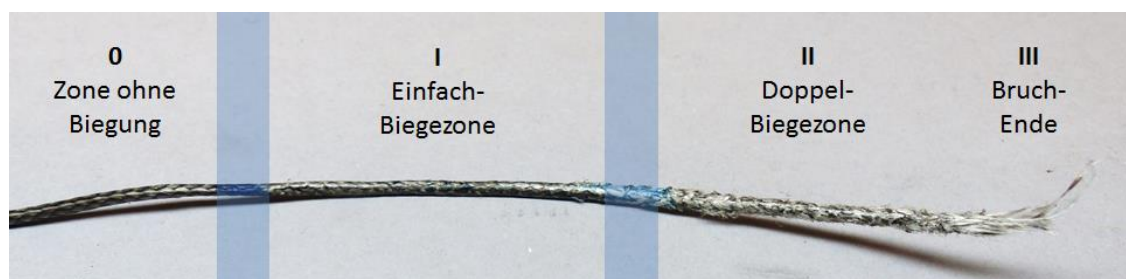


Abbildung 5.4: Biegezonen Versuchsseil E2

Im Anschluss an Standard-Dauerbiegeversuche wird das Referenzseil E2 hinsichtlich seines dynamischen Verhaltens auf dem vorhandenen Hochdynamikprüfstand untersucht. Das Vorgehen sowie die Versuchsmatrix sind dabei mit den in Abschnitt 3.6 beschriebenen Randbedingungen identisch.

Das Ergebnis der Hochdynamikversuche zeigt Abbildung 5.5. Zur besseren Vergleichbarkeit entsprechen die Skalenteilungen wiederum denen der Hochdynamikversuche an den fünf bereits behandelten Seilen¹²³.

¹²³ vgl. Abschnitt 4.4 Hochdynamikversuche

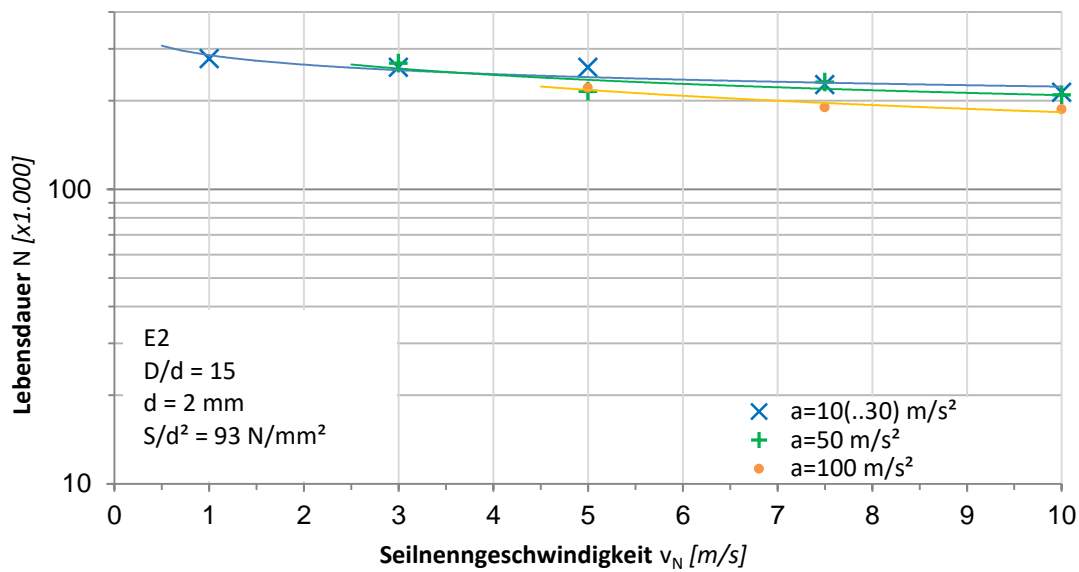


Abbildung 5.5: Lebensdauer des Referenzseils E2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Wie der Grafik zu entnehmen ist, zeigt sich ein leichter aber stetiger Abfall aller drei Kurven gleicher Beschleunigung bei zunehmender Geschwindigkeit. Werte gleicher Geschwindigkeit und unterschiedlicher Beschleunigung liegen dabei relativ dicht beieinander. Setzt man die erzielten Lebensdauern in Bezug zur durchschnittlichen Seillebensdauer, die sich aus Standard-Dauerbiegeversuchen ergibt, so ergibt sich die Darstellung, die Abbildung 5.6 zeigt.

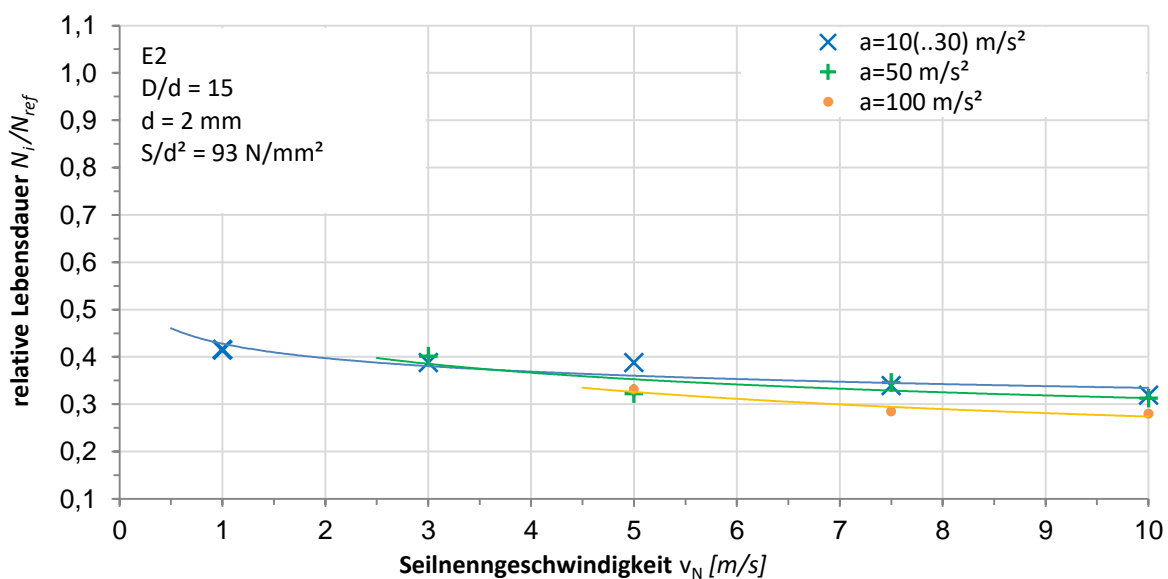


Abbildung 5.6: Lebensdauer des Referenzseils E2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Für das Seil E2 ergibt sich hierbei, dass je nach Versuch nur noch 28 – 42 % der Seillebensdauer aus Standard-Dauerbiegeversuchen erreicht werden können. Die drei Lebensdauerkurven unterschiedlicher Beschleunigungen nähern sich dabei einem gemeinsamen Grenzwert, der bei ca. 30 % der Referenzlebensdauer liegt. Dieser Wert entspricht dem Grenzwert, der sich auch für das Versuchsseil D2 gezeigt hatte. Hinsichtlich des Lebensdauerabfalls unter hochdynamischer Beanspruchung zeigt sich also für die beiden Seile D2 und E2 aus Dyneema ein ähnliches Verhalten zum einen hinsichtlich des Geschwindigkeitseinflusses, zum anderen in Bezug zum relativen Abfall im Vergleich zur Referenzlebensdauer. Lediglich hinsichtlich des Beschleunigungseinflusses zeigen sich Unterschiede zwischen den beiden Seilen.

Zur Gegenüberstellung der Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 nochmals die absoluten Lebensdauern der Hochdynamikversuche der Seile D2 und E2 abgetragen.

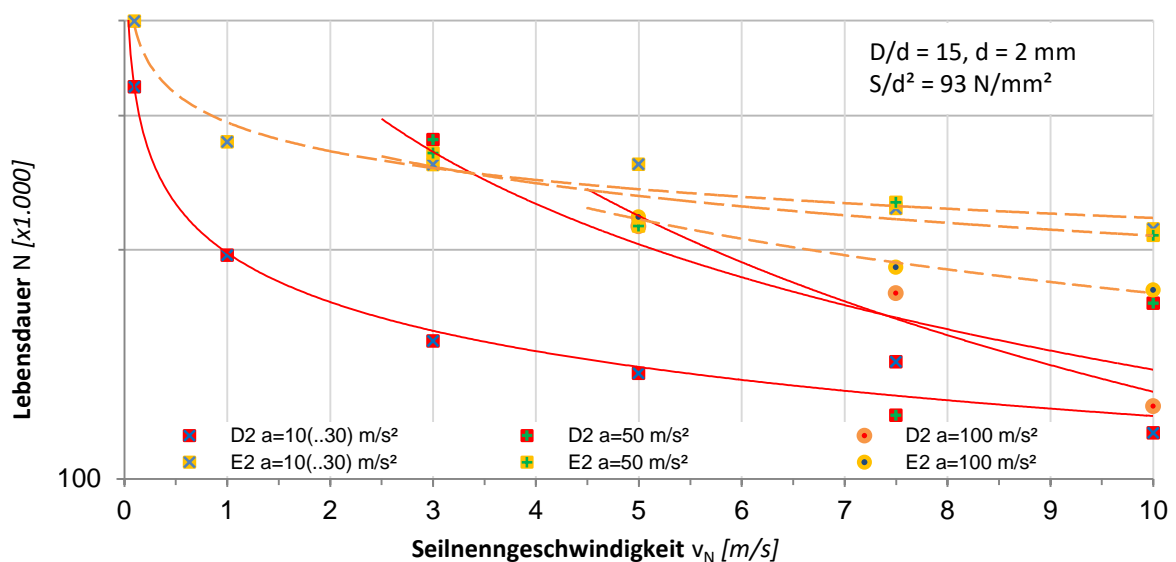


Abbildung 5.7: Lebensdauer der Seile D2 und E2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Hierbei zeigt sich, dass die Lebensdauern der beiden verschiedenen Seile auch betragsmäßig gut übereinstimmen, die drei Kurven des Seils E2 jedoch deutlich enger zusammen liegen als die des Seils D2. Dieser Unterschied lässt mit der glatteren Oberfläche des Seils D2 begründen, die bei unterschiedlichen Beschleunigungen zu größerem Schlupf zwischen Seil und Scheibe und damit zu höherem Verschleiß führt.

Neben der Lebensdauer in Form der Bruchbiegewechselzahl N wird im Folgenden auf die Lage der Bruchstelle in der Biegelänge und die Geschwindigkeit, die in der

Bruchstelle herrschte, eingegangen. Die ermittelten Werte sind Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 zu entnehmen.

E2	$a = 10\text{m/s}^2$	$a = 50\text{m/s}^2$	$a = 100\text{m/s}^2$
$v = 1\text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3\text{ m/s}$	90% l_a	$l_{v=k}$	-
$v = 5\text{ m/s}$	19% l_a	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$
$v = 7,5\text{ m/s}$	$l_{v=k}$	50% l_a	$l_{v=k}$
$v = 10\text{ m/s}$	39% l_a	42% l_a	$l_{v=k}$

Tabelle 5.2: Lage der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil E2

E2	$a = 10\text{m/s}^2$	$a = 50\text{m/s}^2$	$a = 100\text{m/s}^2$
$v = 1\text{ m/s}$	1		
$v = 3\text{ m/s}$	2,8	3	
$v = 5\text{ m/s}$	2,2	5	5
$v = 7,5\text{ m/s}$	7,5	3,8	7,5
$v = 10\text{ m/s}$	5,1	4,1	10

Tabelle 5.3: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil E2

Mit Hilfe der farblichen Kennzeichnung zeigt sich, dass Versuche mit niedriger Beschleunigung und niedriger Geschwindigkeit sowie hoher Beschleunigung und hoher Geschwindigkeit vornehmlich im Bereich mit konstanter Fahrgeschwindigkeit brechen. Bei diesen Versuchen handelt es sich auf Grund der Versuchsmatrix zugleich um Versuche mit, im Vergleich zum Konstantfahrweg, kurzem Beschleunigungsweg. Versuche mit hoher Endgeschwindigkeit bei gleichzeitig niedriger Beschleunigung versagen dagegen vermehrt im Beschleunigungsbereich. Hierbei ist die Beschleunigungsstrecke jedoch deutlich länger als die Konstantfahrstrecke.

Diese Ergebnisse decken sich nahezu identisch mit den bereits vorgestellten Ergebnissen an den anderen fünf Versuchsseilen¹²⁴ und stützen diese somit vollumfänglich.

5.1.2. Zusammenfassung der Referenzversuche E2

Im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens „Hochdynamische Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken“, WE 2187/29-1 [180], werden HM-HT-Faserseile in Bezug auf deren Verhalten unter hochdynamischer Beanspruchung untersucht. Hierbei werden fünf unterschiedliche Seile aus drei

¹²⁴ vgl. Abschnitte 4.4.6 Auswertung nach Lage der Bruchstellen und 4.4.7 Auswertung nach Seilgeschwindigkeit an der Bruchstellen

verschiedenen Werkstoffen in zwei unterschiedlichen Macharten und zwei unterschiedlichen Nenn-Durchmessern ausgewählt. Nach Auswertung zahlreicher Versuche zeigt eines der fünf Versuchsseile, das Seil D2 aus Dyneema, die deutlichste Abhängigkeit der Seillebensdauer von den Dynamikparametern Geschwindigkeit und Beschleunigung. Da das Versuchsseil D2 als einziges der untersuchten Seile aus Dyneema gefertigt ist wird ein weiteres Seil aus Dyneema, das Referenzseil E2, zur Verifikation der Ergebnisse herangezogen.

Das Seil E2 besteht grundsätzlich aus der gleichen Fasertypen wie das Seil D2, entstammt jedoch einer anderen Fertigung und ist nach dem Verseilprozess weniger stark verstreckt worden.

Im Standard-Dauerbiegeversuch erzielt das Referenzseil annähernd identische Lebensdauern wie das Seil D2. Die Lebensdauergerade fällt dabei nur geringfügig steiler ab.

Im hochdynamischen Biegeversuch wird das Referenzseil E2 Geschwindigkeiten zwischen $v = 1 - 10 \text{ m/s}$ und Beschleunigungen zwischen $a = 10 - 100 \text{ m/s}^2$ ausgesetzt. Aus diesen Versuchen ergibt sich, dass die Lebensdauer mit steigender Geschwindigkeit deutlich abnimmt und gegen einen gemeinsamen Grenzwert strebt. Im Vergleich zur Seillebensdauer, die in Standard-Dauerbiegeversuchen erzielt wird, liegt dieser Grenzwert um ca. 70 % niedriger. Auch dieses Verhalten entspricht den Ergebnissen, die aus Versuchen am Seil D2 hervorgegangen sind. In Bezug auf die Beschleunigung lässt sich hingegen im Gegensatz zum Seil D2 kein merklicher Einfluss auf die Lebensdauer des Seils E2 feststellen. Ursächlich hierfür sind die unterschiedlich glatten Oberflächen der beiden Seile, die aus unterschiedlichen Verstreckungsgraden resultieren.

5.2. Stahlseil 6x19 S2

Neben HM-HT-Faserseilen wird das Verhalten unter hochdynamischer Beanspruchung eines Referenzseils aus Stahldraht umfangreich untersucht. Hieraus sollen Parallelen sowie Differenzen zwischen Faser- und Stahlseilen in Bezug auf deren Verhalten unter hochdynamischer Beanspruchung herausgearbeitet, sowie eventuelle Vorteile des jeweiligen Seiltyps aufgezeigt werden.

Die Auswahl des Referenz-Versuchsseils aus Stahldraht erfolgt in Anlehnung an Weber [150] und Schönherr [175], die gängige Seilkonstruktionen in ihren Untersuchungen betrachten. Auf Grund des niedrigen Seilldurchmessers von 2 mm wird ein einlagiges Rundlitzenseil mit Stahleinlage in der Machart Seale (S) ausgewählt. Das Seil verfügt über sechs Außenlitzen mit jeweils 19 Drähten, die in

der Machart „Kreuzschlag“ miteinander verseilt sind. Das Seil ist somit weder drehungsarm noch drehungsfrei.

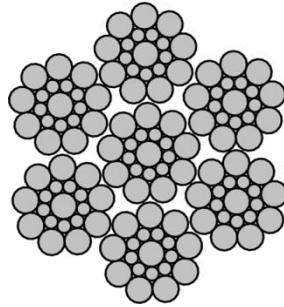


Abbildung 5.8: Aufbau des Versuchsseils S2 [173]

Der Aufbau des Versuchsseils S2 ist Abbildung 5.8, die genauen Kennwerte des Seils sind Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Um sicher zu gehen, dass die Hochdynamikversuche des Versuchsseils S2 nicht oberhalb des Sprungpunkts durchgeführt werden, wird die Donandkraft S_{D1} für das gewählte D/d -Verhältnis nach Feyrer [61] berechnet, die mit einer Sicherheit von 95 % von höchstens 1 % der Seile unterschritten wird. Demnach liegt die Donandkraft um ca. 166 % höher als die aufgebrachte Prüfkraft, weshalb die Untersuchungen sicher unterhalb des Sprungpunktes durchgeführt werden.

Für Standard- und Hochdynamik-Biegeversuche werden Prüfscheiben verwendet, die in Geometrie und Material identisch zu den Versuchsscheiben sind, die für die Versuche an Faserseilen eingesetzt werden¹²⁵. Allerdings sind die Seilrillen der Prüfscheiben für Stahlseile mittels Laser-Härteverfahren¹²⁶ auf 40 HRC¹²⁷ gehärtet. Nach Feyrer [59] garantiert das Härten eine gewisse Formbeständigkeit und Standzeit bei Beanspruchung durch die ebenfalls sehr harten Drähte der Stahlseile.

5.2.1. Ergebnisse der Referenzversuche S2

Die Standard-Biegeversuche am Stahlseil S2 werden mit konstanten Parametern (Doppelbiegung, $U = 28$ 1/min) auf der BM 12¹²⁸ des IFTs durchgeführt. Das Ergebnis dieser Standard-Biegeversuche ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

¹²⁵ vgl. Abschnitt 3.3.2 Versuchsscheiben

¹²⁶ Durch Härtung mittels Laser können, im Gegensatz zu anderen Härteverfahren, gezielt die sehr kleinen Rillen der Scheiben gehärtet werden, ohne dabei andere Bereiche, wie beispielsweise die Lagersitze, zu härten und damit auch zu verspröden.

¹²⁷ HRC bezeichnet die Eindring-Härteprüfung nach Rockwell mittels Kegel

¹²⁸ vgl. 3.3.1 Versuchseinrichtungen für Dauerbiegeversuche

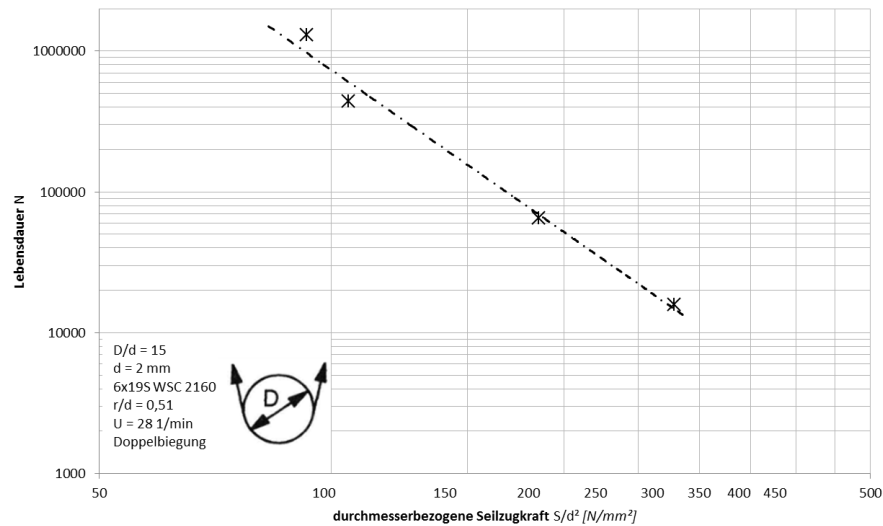


Abbildung 5.9: Lebensdauer des Versuchsseils S2 im Biegeversuch

Demnach erreicht das Drahtseil S2 sehr hohe Biegewechselzahlen. Bei der für die Hochdynamik-Versuche eingesetzten Prüfkraft von $S/d^2 = 93 \text{ N/mm}^2$ übersteigt die Bruchbiegewechselzahl N sogar deutlich die Marke von 1.000.000 und erreicht ca. 1.300.000 Biegewechsel. Setzt man dieses Ergebnis in Relation zu den sechs geprüften Faserseilen, so ergibt sich der in Abbildung 5.10 abgebildete Zusammenhang. Während das Referenzseil E2 ähnliche, nur marginal abweichende Werte wie das werkstoffgleiche Versuchsseil D2 erreicht, liegt die ertragbare Lebensdauer des Seils S2 deutlich darüber. Erst mit Erhöhung der Prüflast nimmt die Lebensdauer des Stahlseils ähnliche Werte an wie die Seile aus D2 und E2 Dyneema.

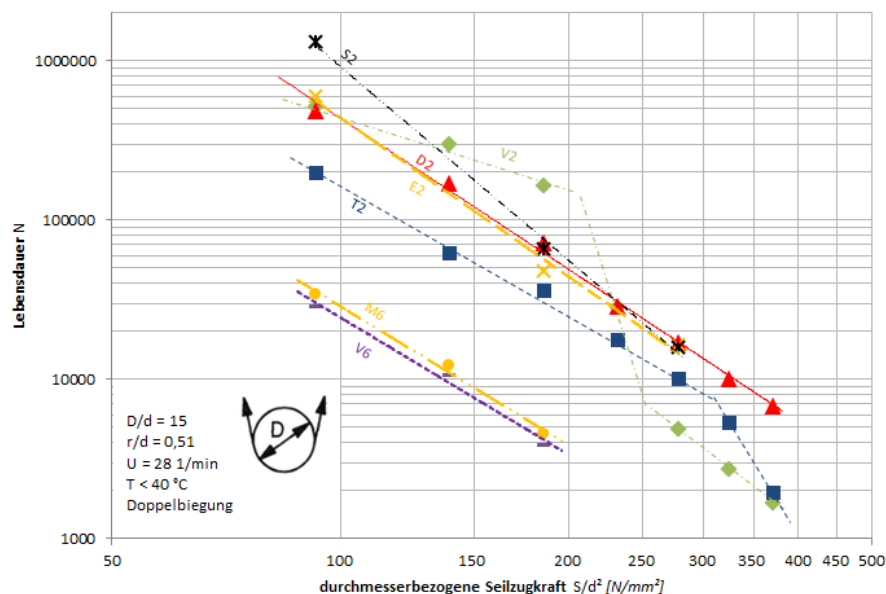


Abbildung 5.10: Lebensdauer aller Versuchsseile im Biegeversuch

Parallel zu Standard-Biegeversuchen wird die Prüfstelle Nr. 1 des Hochdynamik-Prüfstands zur Aufnahme von Stahlseilen umgerüstet. Hierzu wird zum einen die bislang ungehärtete Prüfscheibe ebenfalls im Laser-Härteverfahren bearbeitet, zum anderen wird eine Möglichkeit geschaffen das Stahlseil antriebsseitig aufnehmen zu können ohne dabei die trägheitsarme Leichtbau-Aluminiumtrommel des Windenantriebs zu beschädigen. Aus diesem Grund werden die Hochdynamik-Versuche an Stahlseilen mittels Kuppelseil aus HM-HT-Fasern durchgeführt. Hierzu wird die Prüfstelle zunächst analog zu den Versuchen an Faserseilen mit einem drehungsfreien, 12-fach-Geflecht eingerichtet. Im Weiteren wird ein ca. 4600 mm langes Seilstück im Bereich der Prüfscheibe entfernt und die beiden offenen Faserseilenden mit je einer Schlaufe versehen. Parallel wird ein Prüfling des Stahlseils passend abgelängt und mittels Aluminium-Pressverbindung¹²⁹ beidseitig ebenfalls mit Schlaufen versehen. Der Einbau des Prüflings in den Prüfstand erfolgt nun durch Verbindung der jeweiligen Schlaufen mittels passender Schäkel.

Nach Durchführung und Auswertung der Hochdynamikversuche am Versuchsseil S2 aus Stahldraht zeigt sich das in Abbildung 5.11 abgebildete Verhalten.

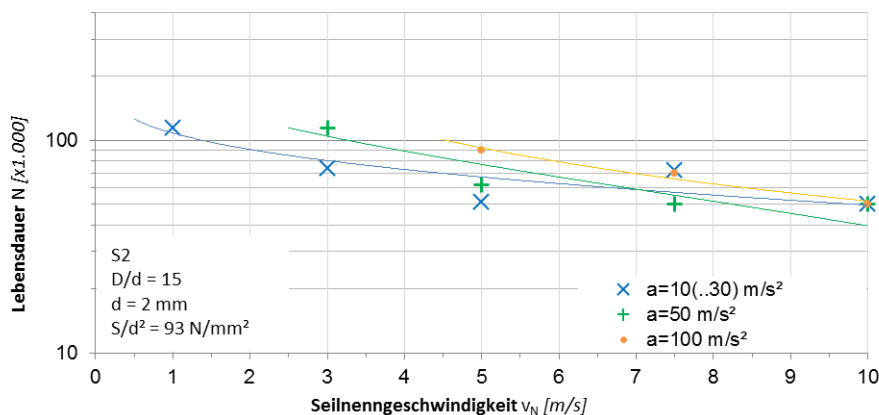


Abbildung 5.11: Lebensdauer des Versuchsseils S2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Demnach fällt die Lebensdauer in allen drei Beschleunigungsgruppen mit steigender Seilgeschwindigkeit kontinuierlich ab.

¹²⁹ Aluminium-Pressverbindung nach DIN EN 13411-3 [43]

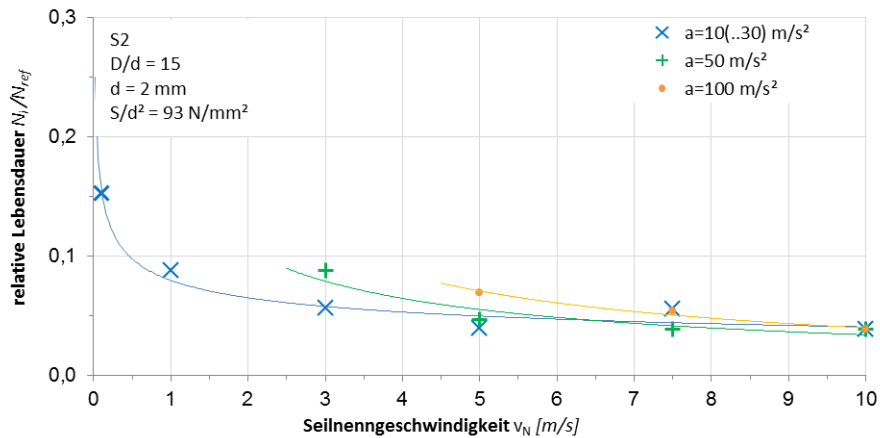


Abbildung 5.12: Lebensdauer des Versuchsseils S2 unter hochdynamischer Beanspruchung

Der Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer des Versuchsseils S2 ist klar erkenntlich. Allerdings bleiben die absoluten Biegewechselzahlen extrem hinter den in Standard-Dauerbiegeversuchen ermittelten Biegewechselzahlen zurück. In Abbildung 5.12 sind die erreichten Lebensdauern in Bezug zur Lebensdauer in Standard-Dauerbiegeversuchen dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Lebensdauer des Stahlseils S2 unter hochdynamischer Beanspruchung drastisch abfällt und noch ca. 4 % des Referenzwerts aus Standard-Dauerbiegeversuchen ohne hochdynamische Beanspruchung erreicht. Umgekehrt ausgedrückt verliert das Versuchsseils S2 unter hochdynamischer Beanspruchung ca. 96 % seiner Lebensdauer. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den von Feyrer in [59] angegebenen Werten für den Beschleunigungsfaktor f_{S4} , der nach seinen Angaben je nach Geschwindigkeit zwischen 1,05 und 1,20 liegt, also eine maximale Einbuße an Seillebensdauer auf Grund dynamischer Vorgänge von 20 % vorsieht. Wie in Abschnitt 2.4.5 bereits erwähnt, basiert der von Feyrer angegebene Dynamikfaktor f_{S4} nach eigenen Aussagen lediglich auf Schätzwerten und nicht auf expliziten Untersuchungen. Zudem differenziert Feyrer nicht zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit und setzt für alle Geschwindigkeiten $v \geq 1,6$ m/s den maximalen Wert von $f_{S4} = 1,2$. Darüber hinaus führt er die Lebensdauererminderung auf Grund dynamischer Vorgänge rein ausschließlich auf die zur Beschleunigung größere Seilzugkraft zurück. Schlupfbetrachtungen zwischen Seil und Scheibe werden hingegen nicht angeführt.

Auf Grund all dieser Vernachlässigungen und Abschätzungen ohne Bezug auf Versuchsergebnisse lässt sich die große Diskrepanz zwischen den ermittelten Versuchsergebnissen und den in der Literatur hinterlegten Faktoren erklären.

In diesem Kontext ist anzumerken, dass die Hochdynamikversuche an Stahlseilen mittels drehungsfreien jedoch drehungsweichen Kuppelseils aus HM-HT-Fasern durchgeführt werden. Drehmomente, die durch Aufbringen der Prüflast im Stahlseil erzeugt werden, können somit nur begrenzt abgefangen werden und resultieren in einer gewissen Verdrehung des Versuchsseils, was wiederum Einfluss auf die Lebensdauer des Versuchsseils haben kann. Hierbei sei explizit auf die Untersuchungen von Weber [175] verwiesen.

Analog zum Vorgehen bei den sechs untersuchten Faserseilen wird im Folgenden auf die Lage der Bruchstellen in Bezug zur Seillängsachse eingegangen. In Tabelle 5.4 ist dargestellt, ob der Bruch in der Beschleunigungszone l_a oder der Zone konstanter Fahrgeschwindigkeit $l_{v=k}$ erfolgte.

In Tabelle 5.5 sind die Geschwindigkeiten aufgelistet, die an der Bruchstelle herrschten.

S2	$a = 10\text{m/s}^2$	$a = 50\text{ m/s}^2$	$a = 100\text{ m/s}^2$
$v = 1\text{ m/s}$	$l_{v=k}$	-	-
$v = 3\text{ m/s}$	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$	-
$v = 5\text{ m/s}$	50% l_a	$l_{v=k}$	-
$v = 7,5\text{ m/s}$	45% l_a	$l_{v=k}$	$l_{v=k}$
$v = 10\text{ m/s}$	37% l_a	43% l_a	$l_{v=k}$

Tabelle 5.4: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil S2

S2	$a = 10\text{m/s}^2$	$a = 50\text{ m/s}^2$	$a = 100\text{ m/s}^2$
$v = 1\text{ m/s}$	1	-	-
$v = 3\text{ m/s}$	3	3	-
$v = 5\text{ m/s}$	2,5	5	-
$v = 7,5\text{ m/s}$	3,5	7,5	7,5
$v = 10\text{ m/s}$	4,9	7,1	10

Tabelle 5.5: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil S2

Aus den vorangegangenen Tabellen lässt sich erkennen, dass die Positionen, an denen der Seilbruch eintritt, sowohl in der Beschleunigungszone l_a wie auch der Zone konstanter Geschwindigkeit $l_{v=k}$ liegen. Insgesamt zeigt sich ein Ergebnis, dass analog zu den Ergebnissen der Versuche an Faserseilen ist. Während Versuche mit relativ kurzer Beschleunigungslänge, d.h. niedrige Beschleunigungen bei niedrigen Geschwindigkeiten und hohe Beschleunigungen bei hohen Geschwindigkeiten

vorrangig in der Zone konstanter Geschwindigkeit brechen, tritt der Seilbruch bei Versuchen mit verhältnismäßig langer Beschleunigungszone, d.h. niedrige Beschleunigungen bei hohen Geschwindigkeiten, durchgehend in der Beschleunigungszone ein.

Diese Beobachtung widerspricht den Erkenntnissen von Berner [11], nach denen die „maximalen Drahtbruchzahlen im Bereich der Seilstücke, die bei der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase über die Treibscheibe laufen“ zu finden sind. Allerdings basieren die von Berner durchgeführten Untersuchungen auf einer Traktionsbeanspruchung des Seils im Bereich der Treibscheibe. Zudem werden Formrillen eingesetzt, die einen stark lebensdauermindernden Einfluss aufweisen. Auf Grund dieser Unterschiede im Versuchsaufbau kann das unterschiedliche Verhalten des untersuchten Stahlseils erklärt werden.

5.2.2. Zusammenfassung der Referenzversuche S2

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts werden experimentelle Untersuchungen hinsichtlich des Verhaltens unter hochdynamischer Beanspruchung von sechs unterschiedlichen HM-HT-Faserseilen zum Einsatz in parallelen Seilkinematiken durchgeführt. Bislang finden neben Faserseilen jedoch auch Stahldrahtseile ihre Anwendung in kinematischen Systemen¹³⁰. Aus diesem Grund werden parallel zu den Versuchen an Faserseilen Versuche an Stahldrahtseilen durchgeführt. In Anlehnung an [150] und [175] wird hierzu ein sechslitziges Seil mit Stahleinlage in Kreuzschlag und einer Festigkeit von $R_m = 2160 \text{ N/mm}^2$ ausgewählt.

Im Standard-Dauerbiegeversuch erzielt dieses Drahtseil S2 bei einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 93 \text{ N/mm}^2$ Biegewechselzahlen von $N \approx 1.300.000$ und somit deutlich höhere Werte als die untersuchten Faserseile¹³¹.

Unter hochdynamischer Biegebeanspruchung brechen diese hohen Lebensdauern dagegen massiv ein, sodass bei hohen Geschwindigkeiten nur noch ca. 4 % der Referenzlebensdauer erreicht werden. Der schädigende Einfluss von zunehmender Geschwindigkeit und Beschleunigung ist dabei deutlich erkennbar.

Neben der erhöhten Biegelänge und der verdrehweichen Einspannung durch ein Kuppel-Faserseil ist dieser starke Lebensdauer-Einbruch auf die hohe Trägheit des im Vergleich zu Faserseilen vielfach schwereren Stahlseils zurückzuführen. Durch die hohe Massenträgheit in Verbindung mit hohen Beschleunigungen werden Spannungsspitzen im Seil erzeugt, die die nominal anliegende Seilzugkraft übersteigen und somit zu einer erhöhten Beanspruchung im Seil führen.

¹³⁰ vgl. Abschnitt 2.1 Seilroboter

¹³¹ vgl. Abbildung 5.10: Lebensdauer aller Versuchsseils im Biegeversuch

Der Seilbruch findet dabei bei Versuchen mit langer Beschleunigungsstrecke in der Beschleunigungszone, bei Versuchen mit kurzer Beschleunigungsstrecke in der Zone mit konstanter Geschwindigkeit statt. Dieses Verhalten ist mit dem der untersuchten Faserseile vergleichbar.

Der Einfluss hoher Dynamik wirkt sich somit auf das untersuchte Stahldrahtseil S2 deutlich massiver aus als auf die untersuchten Faserseile. Dies unterstreicht das bessere Potential hochmodularer Faserseile gegenüber Drahtseilen beim Einsatz in parallelen Seilkinematiken.

5.3. Diskussion

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erzielten Versuchsergebnisse zeigen, dass hochmodulare Faserseile für den Einsatz in seilgetriebenen Fördersystemen im Allgemeinen und parallelkinematischen Robotern im Besonderen prinzipiell sehr gut geeignet sind. In den Anwendungen, in denen sie durch ihre Flexibilität, ihren großen Arbeitsraum, ihre hohe Traglast oder ihre hohe Dynamik keinen erheblichen Vorteil gegenüber klassischen Industrierobotern aufweisen können, stehen sie mit diesen etablierten Systemen in Konkurrenz.

Klassische Industrieroboter führen je nach Größe zwischen einem Zyklus pro Minute (oder langsamer) und bis zu vier Bewegungszyklen pro Sekunde durch. Dabei werden Massen von wenigen Gramm bis zu mehreren hundert Kilogramm bewegt. Die mittleren Einsatzdauern betragen ca. 8 bis 10 Jahre wobei die Wartungsintervalle üblicher Weise 12 Monate betragen¹³².

Im Folgenden sollen die erreichbaren Zyklenzahlen für zwei unterschiedlich arbeitende Industrieroboter ermittelt und in Bezug zu den mit Seilrobotern erzielbaren Zyklenzahlen gesetzt werden.

Roboter A ist ein Standard-Industrieroboter und arbeitet an 5 Tagen pro Woche an 16 Stunden pro Tag. Dabei führt er alle 2,5 Minuten einen Bewegungszyklus mit einer Last von 50 kg durch. Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung der Hin- und Rückbewegung, die auf Grund des hohen Eigengewichts des Roboters stets unter Last stattfindet, ca. 50.000 Bewegungszyklen zwischen zwei Wartungsintervallen, d.h. innerhalb eines Jahres. Abbildung 5.13 zeigt beispielhaft einen klassischen Industrieroboter.

Roboter B wird als sogenannter Flex-Picker¹³³ eingesetzt und bewegt Bauteile mit einem Stückgewicht von 500 g mit einer Frequenz von 1 Hz. Er arbeitet im Dreischicht-Betrieb an sechs Tagen pro Woche. Dadurch führt er über 13.000.000 Bewegungszyklen pro Jahr durch. Abbildung 5.14 zeigt einen SCARA-Roboter, der als Flex-Picker eingesetzt wird.

¹³² Die Angaben sind als Durchschnittswerte zu betrachten und entstammen verschiedenen Expertengesprächen. Die Aussagen zu Zyklenzahlen, Einsatzdauern und Wartungsintervallen gehen aus fachlichen Diskussionen mit Jun.-Prof. Dr.-Ing. A Pott Anfang 2017 hervor.

¹³³ Als Flex-Picker wird ein schnellarbeitender, flexibler Roboter für Greif- und Positionieraufgaben bezeichnet. Oft werden hierfür SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm) eingesetzt, deren Aufbau einem menschlichen Arm ähnelt.



Abbildung 5.13: Beispiel für Roboter A:
Klassischer 6-Achs-Industrieroboter [137]



Abbildung 5.14: Beispiel für Roboter B:
SCARA-Roboter für Flex-Picker-Aufgaben
[144]

Die Standard-Dauerbiegeversuche an Seilen mit Durchmesser $d_N = 2$ mm wurden im Rahmen dieser Arbeit mit einer Prüflast von $S/d^2 = 93$ N/mm² durchgeführt, was einer Last von ca. 20 kg pro Seilstrang entspricht¹³⁴. Dabei konnten trotz des sehr kleinen D/d -Verhältnisses Lebensdauern von bis zu $N = 500.000$ Biegewechseln erzielt werden. Dies ergibt für einen Seiltrieb mit zwei vollständigen Biegewechseln unter Last eine Lebensdauer von 250.000 Bewegungszyklen, was die Zeit zwischen zwei Wartungsintervallen des Roboters A deutlich übersteigt. In diesem Fall ist der Seilroboter hinsichtlich der Lebensdauer bzw. der Wartungsintervalle also durchaus konkurrenzfähig zum klassischen Industrieroboter. Der Seilroboter zeigt somit für die vorgestellte Beispielanwendung deutliche Stärken, die sich durch weitere Vorteile wie den großen Arbeitsraum nochmals enorm steigern lassen.

Die Lebensdauer der untersuchten Faserseile unter sehr geringer Seilzugkraft von etwa $F = 2$ N lässt sich aus Abbildung 4.4 durch lineare Interpolation auf ca. $N = 10.000.000$ Biegewechsel abschätzen¹³⁵. Legt man dem Bewegungsablauf wieder lastbehaftete Biegewechsel pro Bewegungszyklus zu Grunde ergibt sich eine Seillebensdauer von $N = 5.000.000$ Biegewechseln. Bei hochdynamischen Anwendungen ist zudem der Verlust, der durch die hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen hervorgerufen wird zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dieser Faktor für das Versuchsseil D2 aus Dyneema unter den beschriebenen Parametern zu ca. 70 % ermittelt werden, was für die vorliegende Anwendung eine Gesamtlebensdauer von $N = 1.500.000$ Biegewechseln ergibt und damit deutlich hinter der erzielbaren Lebensdauer zwischen zwei Wartungsintervallen des

¹³⁴ Seilroboter sind nach oben üblicher Weise mit drei bis vier Seilen (insgesamt nach oben und unten sechs bis acht Seile) verspannt, auf die sich die Last aufteilt. Unter Berücksichtigung der Vorspannung der Seile ergibt sich bei einer Last von 50 kg eine Seilspannung von größenordnungsmäßig 200 N (≈ 20 kg).

¹³⁵ Ebenso wie beim Vergleich des Seilroboters mit Roboter A korreliert die angegebene Seilzugkraft größenordnungsmäßig mit der zu bewegenden Last des Roboters B.

Roboters B (13.000.000) zurückbleibt. Durch Optimierung des Seiltriebs sowie der Faserseile selbst, was beispielsweise durch verbessertes Coating erfolgen kann, ist das Erreichen des Vergleichswerts des Industrieroboters B für die Zukunft nicht auszuschließen. Um den regelmäßigen Austausch des Verschleißteils „Seil“ jedoch rechtfertigen zu können müsste der Seilroboter jedoch anwendungsspezifisch deutliche Vorteile aufweisen, weshalb er für diese Beispielanwendung eher schlecht geeignet ist.

Üblicher Weise wird bei einem klassischen Industrieroboter von einem MTBF¹³⁶ im Bereich ≥ 10.000 Stunden ausgegangen, was im Dauerbetrieb gut einem Jahr entspricht. Der vermeintliche Nachteil parallelkinematischer Roboter teilweise geringerer Zykluszeiten zwischen zwei Wartungsintervallen im Vergleich zu klassischen Industrierobotern kann dabei durch vorteilhafte Alleinstellungsmerkmale seilbasierter Systeme mehr als nur kompensiert werden. Gerade die enormen Vorteile in Bezug auf Dynamik, Flexibilität, Modularität, Arbeitsraum, Nutzlast sowie Energieeffizienz verdeutlichen, dass Seilroboter nicht in direkter Konkurrenz zu klassischen Industrierobotern stehen und als eigenständiges System weiterentwickelt werden müssen. Die Optimierung der Seiltriebe sowie der eingesetzten Seile selbst ist hierbei von zentraler Bedeutung und ausschlaggebend für den Einsatz parallelkinematischer Seilroboter.

¹³⁶ MTBF = Mean Time Between Failures; Betriebszeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen

Fazit:

Im Rahmen dieser kurzen Diskussion werden die Zykluszeiten, die mit Seilrobotern erreicht werden können, mit denen etablierter Industrierobotern verglichen. Dazu werden zwei beispielhafte Anwendungsfälle betrachtet. Hierdurch wird die Verknüpfung zwischen allgemeingültigen Versuchsergebnissen hochmodularer Faserseile und einer Lebensdauerabschätzung laufender Faserseile in parallelkinematischen Seilrobotern geschaffen. Durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und des zu Grunde liegenden DFG-Forschungsprojekts lassen sich erstmals die mit Seilrobotern erzielbaren Lebensdauern mit den Lebensdauern etablierter Industrieroboter in Bezug setzen. Zudem wird deutlich welche Ansprüche an Seilroboter hinsichtlich der erreichbaren Bewegungszyklen gestellt werden und welche Anforderungen erfüllt werden müssen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird die Leistung der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und hinsichtlich des Arbeitsgebiets der Seilforschung eingeordnet. Die Grenzen und Einschränkungen der gewonnenen Erkenntnisse werden aufgezeigt und es werden Ansätze für weiterführende Forschungsarbeiten vorgestellt.

6.1. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens „Hochdynamische Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken“¹³⁷ und der vorliegenden Arbeit war es erstmals grundlegende Erkenntnisse über das Lebensdauerverhalten von HM-HT-Faserseilen unter hochdynamischer Beanspruchung zu erlangen. Hierzu wurden über eine Laufzeit von knapp 3 Jahren insgesamt ca. 5 600 m Versuchsseil eingesetzt.

Den Anstoß zu dieser Arbeit lieferte der Einsatz hochmodularer Faserseile im parallelkinematischen Seilroboter IPAnema des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). Durch die Verwendung moderner Faserseile lassen sich in solch einem System hohe Dynamiken und hohe Nutzlasten bei gleichzeitig extrem günstigem Verhältnis von Nutzlast zu bewegter Masse realisieren [126]. Das Verhalten der eingesetzten, neuartigen HM-HT-Faserseile unter solch hochdynamischer Beanspruchung war bislang jedoch weitestgehend unerforscht, woraus ein Sicherheitsmangel resultierte, der die Verwendung hochmodularer Faserseile in hochdynamischen Anwendungen limitierte. Die Motivation zur vorliegenden Forschungsarbeit sowie die Vorgehensweise und die Zielsetzung werden in Kapitel 1 vorgestellt.

Die Grundlagen zu hochmodularen Faserseilen und dem Einsatz in Seilrobotern werden in Kapitel 2 mit entsprechenden Verweisen ausführlich beschrieben. Hierbei wird zunächst auf die verschiedenen Forschungsprojekte auf dem Gebiet der parallelen Seilkinematiken eingegangen und der Stand der Forschung vorgestellt. Gleichzeitig wird damit das enorme Potential des Systems „Seilroboter“ unterstrichen und die Relevanz an grundlegender Forschung im Bereich hochmodularer Faserseile in parallelkinematischen Systemen abgeleitet. Im Weiteren wird auf die verschiedenen Macharten, Materialien und Eigenschaften hochmodularer Faserseile eingegangen und der Stand der Forschung zusammengefasst, wobei das Hauptaugenmerk auf den hochmodularen Polyethylenen (HMPE) in Form von Dyneema, aromatischen Polyamiden in Vertretung von Technora und

¹³⁷ DFG-Forschungsantrag, WE 2187/29-1 [180]

hochmodularem Polyester (LCP) in Form von Vectran liegt. Hieraus wird das große Potential hochmodularer Faserseile abgeleitet, das unter anderem auf der hohen Festigkeit in Kombination mit der geringen Eigenmasse beruht und damit die große Leistungsfähigkeit hinsichtlich hochdynamischer Vorgänge verdeutlicht. Zugleich wird jedoch auch der allgemein hohe Forschungsbedarf an hochmodularen Faserseilen und im Speziellen in Bezug auf die bislang vernachlässigte Dynamik abgeleitet, obwohl gerade in dieser mitunter das enorme Potential hochmodularer Faserseile liegt.

Abschließend wird ein kurzer Vergleich mit Drahtseilen vorgenommen, der hilft die Eigenschaften hochmodularer Faserseile besser einzuordnen.

Die Planung der experimentellen Untersuchungen wird in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Hierbei werden zunächst geeignete Versuchsseile für die verschiedenen Untersuchungen ausgewählt. Neben der Variation der Fasermaterialien sollen dabei auch der Seildurchmesser sowie die Machart (Seilkonstruktion) variiert werden. In Abschnitt 3.1 werden insgesamt fünf verschiedene Versuchsseile ausgewählt, die dieser Versuchsmatrix entsprechen.

Im Weiteren werden Standard-Dauerbiege-, Zug- und Zug-Schwell-Maschinen vorgestellt, mit denen Kennwerte der Versuchsseile ermittelt werden. Detailliert wird dabei auf den Bewegungsablauf bei Standard-Dauerbiegeversuchen eingegangen, woraus der Bedarf eines völlig neuartigen Prüfstands zur Durchführung von Versuchen unter definierten hohen Beschleunigungen wie auch Geschwindigkeiten entsteht. In Abschnitt 3.6.1 wird das Funktionsprinzip sowie die Konstruktion dieses neuen Prüfstands beschrieben und das damit realisierbare Bewegungsprofil erläutert. Der Prüfstand ermöglicht erstmals die Durchführung von Dauerbiegeversuchen unter definierter Biegelänge bei Beschleunigungen von bis zu 100 m/s^2 und Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s und deckt somit die in Seilrobotern maximal realisierten Parameter ab. Mit einer Breite von $3,20 \text{ m}$, einer Länge von $2,00 \text{ m}$ und einer Höhe von $6,50 \text{ m}$ finden vier unabhängige Prüfstellen im neuen, kompakten Prüfstand Platz.

Zudem wird die Durchführung der experimentellen Untersuchungen unter definierten Parametern beschrieben.

Die Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungen werden im Kapitel 4 vorgestellt und ausführlich diskutiert.

Im Standard-Dauerbiegeversuch zeigt sich dabei der zu erwartende Lebensdauerabfall der Versuchsseile bei Erhöhung der Prüflasten. Für die beiden Seile T2 aus Technora und V2 aus Vectran mit einem Durchmesser von 2 mm kann

dabei der Sprungpunkt ermittelt werden. Des Weiteren zeigt sich die deutlich bessere Performance des gelegten Seils M6 aus Vectran gegenüber dem geflochtenen Vectranseil V6. So erzielt das gelegte Seil M6 trotz einem deutlich geringeren Anteil an tragenden Fasern eine höhere Seillebensdauer, was auf die Linienberührung der Fasern zueinander und damit auf den besseren Schutz gegenüber Abrasion sowie den stabilisierenden und schützenden Mantel zurückzuführen ist. Insgesamt erzielen die dünneren Seile im Dauerbiegeversuch wesentlich höhere Werte wie die dickeren Versuchsseile. Dies ist auf die überproportional hohe Anzahl innerer Berührstellen und damit die stärkere Abrasion in den dickeren Seilen zurückzuführen.

Darüber hinaus zeigt sich, dass die Lebensdauer der hochmodularen Faserseile bei Erhöhung der relativen Biegelänge l/d abfällt. Dieser Effekt besteht analog bei Stahldrahtseilen wobei diese Abnahme auf der statistisch höheren Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen bei größeren Biegelängen beruht. Hierbei zeigt sich auch, dass die Lebensdauerkurve ab einer Biegelänge von $100 \times d$ deutlich abflacht und der Einfluss der Biegelänge massiv abnimmt. Zudem nimmt die Streuung der Versuchsergebnisse mit steigender Biegelänge ab.

Bei hochdynamischen Bewegungen kinematischer Systeme setzt sich die dynamische Beanspruchung der Seilzugglieder aus verschiedenen Komponenten zusammen. Zum einen bewirkt die schnelle Bewegung der Seile auf den masseträgen Umlenkpunkten (Scheiben) Schlupf zwischen Seil und Scheibe. Zum anderen werden durch schnelle Bewegungen der masseträgen Aktuatoren inkl. der aufgenommenen Last schwellende Zug-Beanspruchungen in den Seilen hervorgerufen. Die unterschiedlichen Beanspruchungen werden im Rahmen des Forschungsprojekts getrennt voneinander untersucht, um den Grad des Einflusses der jeweiligen Beanspruchung separat zu erfassen. Unterschiedliche Beanspruchungen lassen sich später durch Superposition, beispielsweise über die Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner [117, 130], zusammenfassen.

Zur Untersuchung der dynamisch schwellenden Zug-Beanspruchung werden Zugschwellversuche mit unterschiedlichen Prüf-Frequenzen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass keines der Versuchsseile bei Variation der Parameter Ober-/Unterlast und Prüffrequenz im gesetzten Dauerfestigkeitsbereich von $N = 0,5 \times 10^6$ Lastwechseln versagt. Die Erwärmung der Seile liegt zugleich unter 3 K und ist somit vernachlässigbar klein. Für die Versuchsseile aus Dyneema und teilweise für die Versuchsseile aus Vectran kann durch die Zug-Schwell-Belastung eine Steigerung der Restbruchkraft erzielt werden, während die Restbruchkraft des Seils aus Technora auf Grund der vorherigen Zug-Schwell-Belastung deutlich abfällt. Dies wird auf Beschädigungen der knickempfindlichen Technora-Faser zurückgeführt, während

die Fasern aus HMPE im Zug-Schwell-Versuch eine Verstreckung und damit eine Festigkeitssteigerung erfahren.

In Unterkapitel 4.4 werden die Ergebnisse der Hochdynamikversuche vorgestellt und diskutiert. Hierbei wird deutlich, dass der Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer dünner Seile wesentlich gravierender ist als auf die dickeren Seile. So fällt die Lebensdauer der Seile mit Nenndurchmesser $d=2$ mm im Dynamikversuch im Vergleich zum Standard-Dauerbiegeversuch um Faktor drei bis vier ab. Das Versuchsseil V6 erreicht dagegen im Hochdynamikversuch noch ca. 70 % seines Referenzwertes während das ummantelte Versuchsseil M6 ca. 90 % des Referenzwertes erzielt. Die Streuung der Hochdynamikversuche ist dabei auf Grund großer Biegelängen extrem gering, weshalb nur stark abweichende Werte einer statistischen Absicherung bedürfen.

Der Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer wird dabei beim Versuchsseil D2 am deutlichsten, was auf den geringen Reibwert und damit die hohe Schlupfbelastung des Seils zurückgeführt wird. Die bessere Performance dickerer Seile kann dagegen durch den geringeren Anteil außenliegender Fasern bei offenen Geflechten bzw. den vor Außenverschleiß schützenden Mantel in Kombination mit Linienberührung der gelegten Fasern innen begründet werden. Die Durchführung weiterer Dynamikversuche, sogenannter „Übergangversuche“ unterstreicht den deutlichen Dynamikeinfluss auf die Lebensdauer des Seils aus Dyneema sowie die deutliche Unempfindlichkeit des Seils aus Technora gegenüber hochdynamischer Beanspruchung.

Im Anschluss werden die Hochdynamikversuche sowohl in Bezug auf die Lage der Bruchstellen über dem Bewegungsprofil sowie der Seilgeschwindigkeit an der Bruchstelle ausgewertet. Bis auf wenige Ausnahmen zeigt sich dabei deutlich, dass Versuche mit hoher Geschwindigkeit und niedriger Beschleunigung in der Beschleunigungszone brechen, während der Bruch der anderen Versuche zuverlässig in der Zone konstanter Geschwindigkeit eintritt. Allerdings ist die Beschleunigungszone bei Versuchen mit hohen Geschwindigkeiten und niedrigen Beschleunigungen deutlich länger im Vergleich zu den anderen Versuchen. Bringt man diese unterschiedlichen Längen in Kombination mit einer statistischen Verteilung der Seilbrüche über der kompletten Biegelänge, so lässt sich kein eindeutiger Einfluss der Dynamik auf die Lage der Seilbrüche erkennen. Es werden sowohl die Beschleunigungszonen wie auch die Zonen konstanter Geschwindigkeit durch hochdynamische Beanspruchung geschädigt.

Im Weiteren werden Schlupfmessungen in Hochdynamikversuchen vorgenommen, bei denen geschwindigkeits- und beschleunigungsabhängige Einflüsse registriert

werden. So nimmt der Schlupf zwischen Seil und Seilscheibe sowohl mit steigender Geschwindigkeit wie auch mit steigender Beschleunigung zu. Der Schlupf kann dabei nicht nur auf die Beschleunigungszonen beschränkt werden, sondern findet auch in den Bereichen konstanter Fahrgeschwindigkeit statt. Dies bestätigt die Erkenntnis, dass im Hochdynamikversuch sowohl die Beschleunigungszonen als auch die Zonen mit konstanter Geschwindigkeit geschädigt werden.

Sämtliche in dieser Arbeit untersuchten Prüflinge werden nach Versuchsende makro- und mikroskopisch untersucht. Für die Prüflinge aus den Hochdynamikversuchen ergibt sich dabei je nach Versuchsseil ein unterschiedliches Bild. So zeigen sämtliche Prüflinge des Versuchsseils T2 aus Technora und M6 aus ummanteltem Vectran für alle Geschwindigkeiten und Beschleunigungen stets das gleiche Erscheinungsbild, was die bereits bekannte Unabhängigkeit dieser beiden Seile von Geschwindigkeit und Beschleunigung unterstreicht. Die beiden offenen Vectran-Geflechte V2 und V6 zeigen hingegen bei wachsender Beschleunigung eine zunehmende Schädigung. Für das Versuchsseil D2 lässt sich der ebenfalls bereits bekannte Einfluss von Geschwindigkeit und Beschleunigung auf die Seilschädigung und damit die Seillebensdauer erkennen. Allerdings tritt dieser optisch nicht so deutlich hervor wie für die beiden Seile V2 und V6. Für das Seil D2 lässt sich zudem eine Verhärtung des Seils in der Biegezone feststellen, die mit einer zunehmend glatteren Oberfläche einhergeht. Diese Verfestigung kann auf thermische Verstreckungsprozesse während der Biegeversuche zurückgeführt werden.

Im Hochdynamikversuch stechen vor allem die stark dynamikabhängigen Versuchsergebnisse des Versuchsseils D2 aus Dyneema hervor. Zur Verifikation dieser Ergebnisse wird ein zweites Versuchsseil „E2“ in die Versuchsmatrix aufgenommen, das in Bezug auf Material und Machart mit dem Seil D2 übereinstimmt. Zur Vergleichbarkeit zu Stahldrahtseilen wird zudem ein Seil aus Stahldraht in der Konstruktion 6x19S WSC „S2“ in Standard-Dauerbiegeversuchen und Hochdynamikversuchen untersucht. Inhalt des Kapitels 0 ist die Untersuchung dieser beiden Referenzseile E2 und S2.

Demnach erreicht das Referenzseil E2 im Standard-Dauerbiegeversuch annähernd identische Werte wie das Versuchsseil D2. Im Hochdynamikversuch erreicht das Seil E2 hingegen nur noch ca. 30 % dieser Werte. Auch dieses Verhalten stimmt sehr gut mit dem des Seils D2 überein. Lediglich der Einfluss der Beschleunigung auf die Seillebensdauer kommt weniger ausgeprägt zum Vorschein, was auf unterschiedliche Verstreckungsgrade der Seile D2 und E2 zurückgeführt werden kann.

Das Referenzseil S2 aus Stahldraht erzielt im Standard-Dauerbiegeversuch bei niedrigen Lasten mit großem Abstand die höchsten Lebensdauern aller untersuchten Seile. Bei Erhöhung der Last werden ähnliche Werte wie bei den untersuchten HM-HT-Faserseilen erreicht. Im Hochdynamikversuch sinkt die Seillebensdauer hingegen um bis zu 96 % ab, was dem bisherigen Untersuchungsstand schnelllaufender Stahlseile widerspricht. Der Grund für diese Abweichung liegt unter anderem in der bislang unzulänglichen Berücksichtigung der Schädigung unter hochdynamischer Beanspruchung. Entsprechend kann die Verwendung hochmodularer Faserseile anstatt Drahtseilen in hochdynamischen Anwendungen unterstrichen werden.

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals der Einfluss hoher Dynamik auf die Lebensdauer hochmodularer Faserseile untersucht und damit die Eignung in parallelkinematischen Fördersystemen nachgewiesen. Aus den Untersuchungen und den dabei errungenen Erfahrungen können einige Folgerungen abgeleitet werden.

- Aus umfangreichen Rechercharbeiten wurde schnell deutlich, dass es an einem geeigneten System zur Bezeichnung hochmodularer Faserseile mangelt. Die Bezeichnungen nach DIN EN ISO 10325 [86] sind zu oberflächlich und enthalten keinerlei Informationen zu beispielsweise Beschichtungs- und Wärmebehandlungsverfahren. Insbesondere die teils massive Abweichung des Ist-Durchmessers vom Nenn-Durchmesser bedarf einer Limitierung.
- Zudem fehlen vielen wissenschaftlichen Untersuchungen grundlegende Angaben zu Randparametern wie zum Beispiel Biegefrequenz, Biegelänge oder Rillengeometrie. Dies mindert die Vergleichbarkeit verschiedener wissenschaftlicher Untersuchungen und sollte durch ein Mindestmaß an notwendigen Angaben vermieden werden.
- Der Verschleiß hochmodularer Faserseile beim Lauf über Scheiben beruht maßgeblich auf innerer und äußerer Abrasion. Folglich sollte diese Abrasion zur Erhöhung der Seillebensdauer minimiert werden. Innerer Abrasion kann dabei vorrangig durch geeignete Beschichtungen und die Wahl einer geeigneten Seilkonstruktion entgegengewirkt werden. Gelegte Konstruktionen sind dabei geflochtenen Konstruktionen vorzuziehen. Äußere Abrasion lässt sich zum einen durch die Verwendung eines schützenden Mantels herabsetzen. Der Mantel bewirkt dabei, neben einer schützenden und stützenden Wirkung, jedoch auch eine Erhöhung des Seildurchmessers bei gleicher Masse an tragenden Fasern sowie die Verhinderung der Möglichkeit zur visuellen Inspektion der tragenden Fasern.
- Hohe Dynamik wirkt sich negativ auf die Lebensdauer laufender Faserseile aus, vor allem bei offenen, geflochtenen Konstruktionen. Ursächlich ist hierbei

nicht die schwellende Zugbelastung im Seil sondern der Verschleiß, der vorrangig durch Schlupf zwischen Seil und Scheibe entsteht. Daher sollte dem Schlupf durch Verringerung der Massenträgheit der Scheiben und durch Minimierung der Lagerreibung entgegengewirkt werden. Zudem wird eine hohe Oberflächengüte der Seilrillen empfohlen, durch die die äußere Abrasion des Seils verringert wird.

- Bei Verwendung dickerer Faserseile nimmt der Anteil der außenliegenden Fasern deutlich ab. Damit verringern sich ebenfalls die äußere Abrasion und somit auch die äußere Schädigung durch hochdynamische Beanspruchung. Prinzipiell bieten damit dickere Faserseile gegenüber dünneren einen Vorteil bezüglich der Lebensdauerminde rung bei hochdynamischer Beanspruchung.
- Die Lebensdauerminde rung durch hochdynamische Beanspruchung ist beim Einsatz von Stahlseilen deutlich ausgeprägter als beim Einsatz hochmodularerer Faserseile. Somit eignen sich HM-HT-Faserseile wesentlich besser für hochdynamische Anwendungen. Durch die geringe Masse der Faserseile und durch die Möglichkeit zu kleineren Wickel- und Biegeradien können dadurch zudem die Antriebsstränge kinematischer Systeme deutlich kleiner und energieeffizienter ausfallen.
- Der geringste Lebensdauerabfall durch hochdynamische Beanspruchung ist von Seilen in Kern-Mantel-Konstruktion zu erwarten. Der Mantel schützt dabei die hauptbelasteten Fasern im Seilinneren vor äußerer Abrasion, stützt den Faserquerschnitt und erschwert zudem den Eintrag von schädlichen Partikeln sowie den Schmierstoffaustrag. Zudem wird die Pressung bei „Wire Rope“-Konstruktionen auf Grund von Linien- statt Punktberührung verringert. Der Mantel vermindert darüber hinaus das Aufschieben von Faserbündeln. Somit ist die Verwendung einer solchen Konstruktion dem Einsatz offener Geflechte vorzuziehen.
- In hochdynamischen Anwendungen ist die höchste Lebensdauer von Seilen aus Dyneema zu erwarten, die zudem UV-beständig sind und deren Kriechneigung ständig verbessert wird. Dabei ist jedoch die beschränkte Einsatztemperatur zu beachten.
- Versuche an HM-HT-Faserseilen streuen extrem wenig. Versuchsergebnisse sind weitestgehend reproduzierbar. Eine statistische Absicherung solcher Versuchsergebnisse kann somit im Allgemeinen auf ein Mindestmaß minimiert werden.

6.2. Kritik

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden erstmals grundlegende Untersuchungen zum Verhalten von verschiedenen Seilen unter hochdynamischer Beanspruchung vorgenommen. Die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse unterliegen jedoch einigen Einschränkungen. So sind die Aussagen nur für die untersuchten sieben Seile im Untersuchungszustand, d.h. in diesem Coating-Zustand und dieser Machart gültig. Zudem beschränkt sich der Vertrauensbereich auf den Bereich der untersuchten Parameter. Extrapolierung der Aussagen über diesen Bereich hinaus ist mit Unsicherheiten verbunden und mit Vorsicht zu handhaben. Insbesondere der Einfluss des Seildurchmessers konnte auf Grund des hohen Versuchsaufwands und des Zeitaufwands zur Erstellung des Versuchsstands nur bis zu einem maximalen Durchmesser von $d = 6$ mm untersucht werden. Beim Einsatz von größeren Seildurchmessern bedarf die Anwendung der Untersuchungsergebnisse zwingend einer entsprechenden Verifikation. Zudem wurden die Untersuchungen auf Grund beschränkter Versuchslaufzeiten mit unterschiedlichen Biegelängen durchgeführt, die zwar durchweg ein Vielfaches des Seildurchmessers betragen, ein Einfluss der abweichenden Biegelängen auf die Versuchsergebnisse jedoch nicht ausgeschlossen werden kann.

6.3. Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmalig das Verhalten hochmodularer Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung grundlegend untersucht. Mit Hilfe dieser Untersuchungen und deren Ergebnisse wird der Einsatz solcher Seile in hochdynamischen Anwendungen, in denen sie erhebliche Vorteile gegenüber vergleichbaren Stahlseilen bieten, ermöglicht und gefördert. Allerdings werden im Rahmen der Arbeit immer wieder Lücken in Bezug auf den Untersuchungsstand und die Normung hochmodularer Faserseile aufgezeigt, die deren Marktzugang bislang noch erschweren. Zukünftige Arbeiten könnten aufbauend auf den hier erlangten Erkenntnissen und Fragestellungen weitere Untersuchungen vornehmen, die im Folgenden aufgeführt sind.

Die gewonnene Datenbasis sollte um zusätzliche Konstruktionen, Beschichtungen und vor allem Seildurchmesser erweitert werden. Hierfür steht der neu erstellte Hochdynamikprüfstand bereit und sollte in weiteren Forschungsarbeiten genutzt werden. In diesem Rahmen können veränderliche Bewegungsprofile, die nicht nur symmetrischen Charakter haben, implementiert werden. Nach Ansicht des Autors geht das vielversprechendste Ergebnis dabei von Kern-Mantel-Konstruktionen aus Dyneema und Vectran aus.

Der Hochdynamikprüfstand könnte hierzu mit zusätzlicher Messtechnik, wie kontinuierlicher Temperatur- und Seildurchmesser-Messung ausgestattet werden. Mit tieferer Kenntnis der Versagemuster und -parameter sollten tiefgehende theoretische Betrachtungen zum Schadenshergang im Seil vorgenommen werden.

Tiefer zu untersuchen ist zudem die Rillengeometrie von Prüf- und Antriebsscheiben, wie Kretschmer dies in [97] bereits erstmalig betrachtet. In diesem Zusammenhang sind die Geometrien und Toleranzen hochmodularer Faserseile eindeutig zu normen.

In jedem Fall bedarf es noch großer Anstrengungen im Bereich der Ablegereifeerkennung und den Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Prüfung hochmodularer Faserseile. Nach Ansicht des Autors besteht hierbei nach wie vor der größte Mangel auf dem Gebiet der Faserseil-Forschung, der den breiten Einsatz hochmodularer Faserseile, vor allem in sicherheitskritischen Anwendungen, bislang verhindert. Dienlich wäre hierzu zudem die Kenntnis über die Abnahme des vorhandenen Sicherheitsfaktors über die Lebensdauer laufender Faserseile, was in zukünftigen Forschungsarbeiten grundlegend untersucht werden sollte.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als erste Grundlage zur Untersuchung des Einflusses hochdynamischer Beanspruchungen auf die Lebensdauer hochmodularer Faserseile. Zur Erlangung eines breiten Überblicks wird dabei eine große Menge an Untersuchungen mit vielen weit veränderlichen Parametern durchgeführt. In einzelnen Punkten geht dies zu Lasten detaillierter Untersuchungen, ist aus Sicht des Autors zur Ausrichtung der weiteren Forschung auf dem Gebiet der schnelllaufenden Faserseile jedoch richtig. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen können weitere Forschungsarbeiten folgen, die sich u.a. auf die oben genannten Fragestellungen beziehen und damit eine Erweiterung der gewonnenen Erkenntnisse darstellen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Acierno, D. and Collyer, A. A., Eds. 1996. *Rheology and Processing of Liquid Crystal Polymers*. Polymer Liquid Crystals Series 2. Springer Netherlands, Dordrecht, s.l.
- [2] AirWork & Heliseilerei GmbH. 1994. *The new generation of helicopter ropes. TLM / TLME*.
- [3] Albus, J., Bostelman, R., und Dagalakakis, N. The NIST SPIDER, a robot crane 1992. In *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 97, 373–385.
- [4] Amils, X., Durmus, B., Smeets, P., Boesten, J., und Weis, J. C. Characteristics of steel hybrid ropes with UHMWPE fibre core and their applications. In *Proceedings of the OIPEEC Conference 2013, Oxford*.
- [5] Arend, M. 1995. *Seilverankerungen. Eine neue Modellvorstellung zum Tragverhalten von Vergußverankerungen*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [6] Arfa, A., Belleculée, A., Oplatka, G., Teissier, J.-M., und Verreet, R. 1997. *Space Mountain at Euro Disney. A 120 million dollar wire rope test machine*.
- [7] ASTM. 2010. *ASTM D 6661: Standard Practice for Field Collection of Organic Compounds from Surfaces Using Wipe Sampling*. Beuth-Verlag, 6661.
- [8] Banfield, S., Versavel, T., Snell, R. O., und Ahilan R.V. Fatigue Curves for Polyester Moorings. A State-of-the-Art Review. In *Offshore Technology Conference*.
- [9] Barry Cordage Ltd. 2010. *High Strength Synthetic Fiber Rope Compared to WreRope for Helicopter Longline Applications. Firmenschrift*.
- [10] Beck, W. Comparison of the Discard Criteria in the Regulations of Different Countries. In *OIPEEC-Bulletin "Discard Criteria"*.
- [11] Berner, O. R. 2011. *Lebensdauer von Stahlseilen beim kombinierten Lauf über Treib- und Ablenkscheiben unterschiedlicher Rillenformen*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [12] Bosman, R. On the Origin of Heat Build-up in Polyester Ropes. In *MTS/IEEE OCEANS*, 332–338.
- [13] Bradon, J. E., Chaplin, C. R., und Ridge, I. M. L. 2001. Analysis of a resin socket termination for a wire rope. *Journal of Strain Analysis* 36, 1, 71–88.
- [14] Briem, U. Bruchkraftverlust bei einseitigem Verschleiß an der Seiloberfläche. In *Draht* 47, 40–45.
- [15] Briem, U. Bruchkraftverlust bei gleichmäßigem Verschleiß am Seilumfang. In *Draht* 45, 611–615.

- [16] Bruckmann, T. 2010. *Auslegung und Betrieb redundanter paralleler Seilroboter*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- [17] Bruckmann, T. and Pott, A. 2013. *Cable-Driven Parallel Robots*. Mechanisms and Machine Science 12. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] Bruckmann, T., Sturm, C., und Reichert, C. Keine Schiene, kein Pendel. Regalbediengerät auf der Basis eines Seilroboters. In *Hebezeuge Fördermittel*, 7–8.
- [19] Bunsell, A. R., Ed. 2009. *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres*. Woodhead Publishing in textiles 91. Woodhead Publ; CRC Pr, Oxford u. a.
- [20] Burger, H. 2015. *Konstruktion eines Prüfstands zur Untersuchung des hochdynamischen Verhaltens hochfester Faserseile*. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart.
- [21] Casey, N. F. and Waters, D. M. Condition monitoring for fatigue test assessment and life prediction of six-strand rope. In *OIPEEC Round table reading*, Paper 4.
- [22] Chaplin, C. R. Prediction of Offshore mooring ropes. In *OIPEEC Round table reading*.
- [23] Chaplin, C. R. and Potts, A. E. Wire rope offshore – a critical review of wire rope endurance research affecting offshore applications. In *OTH 91 341, HMSO*.
- [24] Costello, G. A. 1997. *Theory of Wire Rope*. Mechanical Engineering Series. Springer New York, New York, NY.
- [25] DIN. 1974. *DIN 15020 - Grundsätze für Seiltriebe*, 15020.
- [26] DIN. 1977. *DIN 15061 - Rillenprofile für Seilrollen*, 15061.
- [27] DIN. 1983. *DIN 66025 - Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen*. Beuth-Verlag, 66025.
- [28] DIN. 1985. *DIN 60905: Tex-System*. Beuth-Verlag, 60905.
- [29] DIN. 1988. *DIN 60900: Garne - Technologische Einteilung, Begriffe*. Beuth-Verlag, 60900.
- [30] DIN. 2004. *DIN EN ISO 1968 - Faserseile und Tauwerke - Begriffe*, 1968.
- [31] DIN. 2004. *DIN EN 12385-3: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 3: Informationen für Gebrauch und Instandhaltung*. Beuth-Verlag, 12385-3.
- [32] DIN. 2005. *DIN EN ISO 9554 - Faserseile -allgemeine Festlegungen* 59.080.50. DIN, Berlin 59.080.50, 9554.
- [33] DIN. 2008. *DIN EN 12385-4 - Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke*, 12385-4.
- [34] DIN. 2009. *DIN EN ISO 12385-1 - Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, 12385-1.
- [35] DIN. 2009. *DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben*, 50125.

- [36] DIN. 2011. *DIN EN ISO 2307: Faserseile - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*, 2307.
- [37] DIN. 2011. *DIN EN ISO 9554 - Faserseile - Allgemeine Festlegungen*, 9554.
- [38] DIN. 2012. *DIN EN 10264-1 - Stahldraht für Seile*, 10264-1.
- [39] DIN EN. 2004. *DIN EN 12927-6: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr - Seile - Teil 6: Ablegekriterien*, 12927-6.
- [40] DIN EN. 2005. *DIN EN 12927-7: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr - Seile - Teil 7: Inspektion, Reparatur und Wartung*. Beuth-Verlag, 12927-7.
- [41] DIN EN. 2005. *DIN EN 12927-8: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr - Seile - Teil 8: Magnetische Seilprüfung (MRT);*, 12927-8.
- [42] DIN EN. 2009. *DIN EN 13411-5: Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 5: Drahtseilklemmen aus U-förmigem Klemmbügel*. Beuth-Verlag, 13411-5.
- [43] DIN EN. 2011. *DIN EN 13411-3: Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 3: Pressklemmen und Verpressen*. Beuth-Verlag, 13411-3.
- [44] DIN EN. 2011. *DIN EN 13411-4: Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 4: Vergießen mit Metall und Kunstharz*, 13411-4.
- [45] DIN EN. 2012. *DIN EN 10218-2: Stahldraht und Drahterzeugnisse - Allgemeines*. Beuth-Verlag, 10218-2.
- [46] Do Vu, T., Durville, D., und Davies, P. Bend-over-sheave of synthetic braided ropes. Approach to internal mechanisms through Finite Element Simulation. In *11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*, 1–2.
- [47] Donandt, H. 1927. *Über die Berechnung von Treibscheiben im Aufzugsbau*. Dissertation, TH Karlsruhe.
- [48] Ebert-Uphoff, I. and Vogelwede, P. A. On the Connections between Cabledriven Robots, Parallel Manipulators and Grasping, 4521–4526.
- [49] Elsner, P., Eyerer, P., und Hirth, T. 2012. *Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen*. VDI-Buch. Springer, Heidelberg.
- [50] Ernst, B. 2012. *Zum Einfluss von Verdrehungen auf die Eigenschaften zugschwellbelasteter Drahtseile*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [51] Esser, S. 2016. *Experimentelle Untersuchung über den Einfluss der Seilgeschwindigkeit und -beschleunigung auf die Lebensdauer von laufenden hochfesten Kunstfaserseilen*. Studienarbeit, Universität Stuttgart.
- [52] EU. 2011. Verordnung (EU) Nr. 1007/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2011 über die Bezeichnungen von Textilfasern und die damit zusammenhängende Etikettierung und Kennzeichnung der Faserzusammensetzung von Textilerzeugnissen und zur Aufhebung der

Richtlinie 73/44/EWG des Rates und der Richtlinien 96/73/EG und 2008/121/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR.

- [53] Euler, M. Remarques sur L'effect du frottement dans l'équilibre. In *Historie de l'Academie Royale Des Sciences*.
- [54] Eytelwein, J. A. 1808. *Handbuch der Statik fester Körper* 2. Realschulbuchhandlung, Berlin.
- [55] Fang, S. 2005. *Design, modeling and motion control of tendon-based parallel manipulators*. Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität -GH- Duisburg.
- [56] Feyrer, K. Seil-Lebensdauer unter Zugschwellbeanspruchung. In *Draht* 47, 230–233.
- [57] Feyrer, K. 1981. Biegewechselzahl von Drahtseilen bei verschiedenen Biegelängen. *Draht-Welt* 71, 4, 86–90.
- [58] Feyrer, K. 1984. Bruchbiegewechselzahl von Parallelschlagseilen. *Draht* 35, 11, 566–570.
- [59] Feyrer, K. 2000. *Drahtseile. Bemessung Betrieb Sicherheit*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [60] Feyrer, K. 2011. Die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Größeneinfluss. *Lift-Report* 37, 1, 12–18.
- [61] Feyrer, K. 2015. *Wire Ropes. Tension, Endurance, Reliability*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l.
- [62] Feyrer, K. and Hemminger, R. 1983. New rope bending fatigue machines. Constructed in the traditional way. *OIPEEC Bulletin*, 45, 59–66.
- [63] Feyrer, K. und Vogel, W. Hochfestes Faserseil beim Lauf über Seilrollen. In *Draht* 42, 814.
- [64] Finckh-Jung, A., Winter, S., und Wehking, K.-H. Development and Research of a new Termination for high-tensile Fiber Ropes. In *OIPEEC Conference 2011, College Station, USA*, 165–180.
- [65] Franck, B. 2016. *Biegeversuche an Faserseilen*. Studienarbeit, Universität Stuttgart.
- [66] Geo Gleistein & Sohn GmbH. 2009. *Gleistein Ropes erweitert seine Produktpalette zur METS: Dyneema® SK90 hält Einzug*, Bremen.
- [67] Gerz, B. 2015. *Experimentelle Untersuchungen an hochfesten Faserseilen für parallele Seilkinematiken der Fördertechnik*. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart.
- [68] Gilbert, K. R. 1954. In *A History of Technology*, C. Singer, E. J. Holmyrd and A. R. Hall, Eds. Clarendon Press, Oxford, 452–455.
- [69] Gilmore, J., Miller, J., und Chou, R. *Mooring With High Modulus PolyEthylene (HMPE) Fiber lines*.

- [70] Gough, V. and Whitehall, S. Universal Tyre Test Machine. In *FISITA Ninth International Technical Congress*, 117–137.
- [71] Günther, R. and Haag, H. 1988. *TRIBOLOGIE: Reibung · Verschleiß · Schmierung. Abrasivverschleiß, Mischreibung, Betriebsverhalten von Reibungssystemen, Oberflächenbehandlung. Dokumentation zum Forschungs- und Entwicklungsprogramm des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) 12*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [72] Gwinnett, J. E. 1931. *Amusement Ride*, US Patent 1789680.
- [73] Hansmann, H. Aramid Fibers. ASM Handbook / extraction. In *Compendium Composites*.
- [74] Hearle, J. W. S. High performance fibres. In *Textile Institute*.
- [75] Hearle, J. W. S., Lomas, B., und Cooke, W. D. 1998. *Atlas of fibre fracture and damage to textiles*. CRC, Boca Raton.
- [76] Heeg, T. 2014. Schnellster Lift der Welt. Mit Tempo 72 in den 95. Stock. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 16.05.2014.
- [77] Heinze, T. Dimensionierung je nach Einsatzfall. In *Hebezeuge Fördermittel*, 366–369.
- [78] Heinze, T. 2013. *Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus hochfesten Polymerfasern*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- [79] Heptner, K. 1971. Dynamische Seilkräfte bei Elektro-Hebezügen. *Fördern und Heben* 21, 11, 691–694.
- [80] Heyden, T. 2006. *Bahnregelung eines seilgeführten Handhabungssystems mit kinematisch unbestimmter Lastführung*. Dissertation.
- [81] Hiller, M., Fang, S., Mielczarek, S., Verhoeven, R., und Franitza, D. Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. In *Mechanism and Machine Theory* 40, 2005.
- [82] Holeschak, W. 1987. *Die Lebensdauer von Aufzugseilen und Treibscheiben im praktischen Betrieb*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [83] Hopmann, C. and Michaeli, W. 2015. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser, München.
- [84] Huntley, E., Grabandt, O., und Gaetan, R. Non-Destructive Test methods for high-performance synthetic rope. In *OIPEEC Conference 2015 together with 5th International Stuttgart Ropedays*, 191–198.
- [85] ISO. 2004. *ISO 4344: Steel wire ropes for lifts - Minimum requirements*. Beuth-Verlag, 4344.
- [86] ISO. 2009. *ISO 10325 - Geflechte aus HMPE-Fasern*, 10325.
- [87] ISO. 2013. *DIN ISO 4309 Krane - Drahtseile - Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage*, 4309.

- [88] ISO. 2016. *DIN EN ISO 7500: Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung*. Beuth-Verlag, 7500.
- [89] Jahne, K. 1992. *Zuverlässigkeit des Ablegekriteriums Drahtbruchzahl bei laufenden Seilen*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [90] Jehmlich, G. 1985. *Anwendung und Überwachung von Drahtseilen*. Verlag Technik, Berlin.
- [91] Kawamura, S., Choe, W., Tanaka, S., und Pandian, S. R. Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON Using Wire Drive System. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 215–220.
- [92] Kawamura, S., Kino, H., und Won, C. High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots. In *Robotica*, 13–21.
- [93] Keller, J. 2016. *Experimentelle Untersuchungen an zug-schwell-belasteten hochfesten Faserseilen*. Studienarbeit, Universität Stuttgart.
- [94] Klöpfer, A. 2002. *Untersuchungen zur Lebensdauer von zugschwellbeanspruchten Drahtseilen*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [95] KONE Corporation. 2013. *The next leap - KONE high-rise solutions. Setting new standards for high-rise buildings*, 02150 Espoo, Finland.
- [96] Kraus, W. 2015. *Force Control of Cable-Driven Parallel Robots*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [97] Kretschmer, A. 2016. *Einflussfaktoren auf die Lebensdauer laufender Faserseile*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- [98] Kühner, K. 2008. *Experimentelle Erprobung und Inbetriebnahme eines Seilroboters*. Studienarbeit, Universität Stuttgart.
- [99] Kurtz, S. M. 2004. *The UHMWPE Handbook. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement*. Academic Press [Imprint]; Elsevier Science & Technology Books, San Diego.
- [100] Lafourcade, P., Llibre, M., und Reboulet, C. Design of a Parallel wire-driven manipulator for wind tunnels. In *Workshop on fundamental issues and future research directions for parallel mechanism and manipulators*.
- [101] Landsberger, S. E. and Sheridan, T. B. A new design for parallel link manipulator. In *International Conference on Cybernetics, Tucson, USA, 1985*, 812–814.
- [102] Lift-Report. 2014. Textile Aufzugsseile: Stahlfeste Leichtigkeit. Forscher aus Chemnitz und Aachen entwickeln Leicht-Tragseile aus Fasern. *Lift-Report* 40., 75–76.
- [103] Liu, S. 2016. *Micropsopic Examination of broken Fibre Ropes*. Masterarbeit, Universität Stuttgart.

- [104] Loy, W. 2008. *Chemiefasern für technische Textilprodukte. Standardtypen, Modifikationen, Einsatzgebiete*. Technische Textilien Edition Textiltechnik. Dt. Fachverl., Frankfurt, Main.
- [105] Maeda, K., Tadokoro, S., Takamori, T., Hattori, M., Hiller, M., und Verhoeven, R. On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 895–900.
- [106] Mammitzsch, J. 2015. *Untersuchungen zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- [107] Markus Michael. *Untersuchung mechanischer Kennwerte sowie des Verschleißes von hochfesten synthetischen Faserseilen*, 2013.
- [108] McKenna, H. A., Hearle, J. W. S., und O'Hear, N. 2004. *Handbook of fibre rope technology*. CRC Press; Woodhead Pub, Boca Raton, Cambridge.
- [109] Merlet, J.-P. Analysis of the Influence of Wires Interference on the Workspace of Wire Robots. In *On Advances in Robot Kinematics, 2004*, 211–218.
- [110] Merlet, J.-P. Kinematics of the wire-driven parallel robot MARIONET using linear actuators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 19.-23. Mai 2008*, 3857–3862.
- [111] Merlet, J.-P. 1994. Designing a parallel Manipulator for a specific workspace. *Forschungsbericht*, 61.
- [112] Merziger, G. and Wirth, T. 2006. *Repetitorium der höheren Mathematik. [Bachelor, Diplom, Lehramt ; Fachhochschulen, Universitäten ; Ingenieure, Mathematiker, Physiker ; über 1200 Beispiele und Aufgaben]*. Binomi-Verl., Springe.
- [113] Michael, M. Das synthetische Faserseil in der Fördertechnik - vielversprechend und herausfordernd zugleich. In *Konstruktion*, 64–67.
- [114] Michael, M. 2011. *Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen*. Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2011, Technische Universität Chemnitz.
- [115] Michelin, M., Baradat, C., Nguyen D.Q., und Gouttefarde, M. Simulation and Control with XDE and Matlab/Simulink of Cable-Driven Parallel Robot (CoGiRo). In *Cable-Driven Parallel Robots - Proceedings of the 2nd International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*, 71–83.
- [116] Michelin, M. und Vogel, W. 2010. Ovalisierung von hochfesten Faserseilen in Rundrillen. *Euroseil*, 57–59.
- [117] Miner, M. A. 1945. Cumulative damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics Trans ASNE* 67, 159–164.
- [118] Ming, A. and Higuchi, T. Study on a multiple degree of freedom positioning mechanism using wires, part 1 - concept, design and control. In *International Journal of the Japan society for precision engineering*, 131–138.

- [119] Molkow, M. 1982. *Die Treibfähigkeit von gehärteten Treibscheiben mit Keilrille*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [120] Morton, W. E. and Hearle, J. W. S. Physical properties of textile fibres. In *Woodhead publishing in textiles*.
- [121] MPI für Biologische Kybernetik. Seilroboter als Bewegungssimulator. In *Draht* 57.
- [122] Müller, H. 1952. Versuche an Drahtseilen und ihre Ergebnisse für den Betrieb. *Fördern und Heben* 2, 9, 229–234.
- [123] Müller, H. 1961. Das Verhalten der Drahtseile bei Wechselbeanspruchungen. *Draht-Welt* 47, 3, 193–201.
- [124] Nendel, K., Michael, M., und Risch, T. Untersuchung der Treibfähigkeit von hochfesten Faserseilen an Treibscheiben. In *4. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V.*, 1–8. DOI=10.1515/9783110947465.v.
- [125] Nendel, K. und Heinze, T. 2013. *Neue textile Zug- und Tragmittel in der Fördertechnik. High performance fibre ropes*. Technische Universität Chemnitz.
- [126] Neugebauer, R., Ed. 2014. *Handbuch ressourcenorientierte Produktion*. Hanser eLibrary. Hanser, München.
- [127] Novak, G., Winter, S., und Wehking, K.-H. 2016. Geringe Masse - wenig Energie. Einsatz hochmodularer Faserseile in Regalbediengeräten. *Hebezeuge Fördermittel*, 3, 32–34.
- [128] OIPEEC. 1988. Bulletin 56: Recommendation Nr.1. *OIPEEC Bulletin*, 56, 25–30.
- [129] Onur, Y. A. and İmrak, C. E. 2011. The influence of rotation speed on the bending fatigue lifetime of steel wire ropes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 225, 3, 520–525.
- [130] Palmgren, A. 1924. Die Lebensdauer von Kugellagern. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure VDI* 68, 339–341.
- [131] Pantucek. 1977. *Pressung von Seildraht unter statischer und dynamischer Beanspruchung*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [132] Papailiou, O. K. 1995. *Die Seilbiegung mit einer durch die innere Reibung, die Zugkraft und die Seilkrümmung veränderlichen Biegesteifigkeit*. Dissertation, Eidgenössische technische Hochschule Zürich.
- [133] Pott, A. IPAnema: Parallele Seilroboter für die Intralogistik. In *Hebezeuge Fördermittel*, 256–258.
- [134] Pott, A. *Paralleler Seilroboter zur Handhabung in allen Größen*. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart.

- [135] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. *Technisches Datenblatt, Epoxyharz L. + Härter S, L, CL, EPH 500, W 300, GL 1, GL 2, EPH 573 und EPH 161.*
- [136] Rebel, G., Verreet, R., und Briem, U. Composite Steel Wire Ropes for Mine Hoisting Applications. In *Hoist and Haul Conference 2005*, 381–390.
- [137] Red Dot World. *Red Dot Award: Product Design.* http://red-dot.de/pd/wp-content/uploads/onex_2012/big/14-4111-2012-2.jpg. Abgerufen am 18. Januar 2017.
- [138] Reinelt, O. 2015. *Zum Einfluss der Querbeanspruchung auf die Lebensdauer drehungsarmer Seile.* Dissertation, Universität Stuttgart.
- [139] Ridge, I. M. L., O'Hear, N., Verreet, R., Grabandt, O., und Das, C. A. Composite Steel Wire Ropes for Mine Hoisting Applications. In *OIPEEC Conference 2007 - How to get the most out of your ropes*, 225–240.
- [140] Rösler, J., Harders, H., und Bäker, M. 2012. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Mit 35 Tabellen und 36 Aufgaben mit vollständig vorgerechneten Lösungen.* Lehrbuch.
- [141] Rost, A. 2013. *Untersuchung von Antrieben mit Kunststoff-Faserseilen für den Einsatz in Leichtbau-Gelenkarmrobotern.* Dissertation 2013, Universität Stuttgart.
- [142] Samson Rope Technologies. 2013. *Samson Technical Bulletin. Inspection & Retirement Pocket Guide*, Ferndale, WA 98248, USA.
- [143] Samson Rope Technologies. 2016. *K-100 Synthetic Crane Hoist Line. Rope Handling, Installation, Inspection, and Retirement Guidelines*, Ferndale, WA 98248, USA.
- [144] SAS VirtualExpo. *SCARA-Roboter / 4 Achsen / industriell.* <http://www.directindustry.de/prod/adept-technology/product-6076-153983.html>. Abgerufen am 20. Januar 2017.
- [145] Schöpfer, E. and Neumann, C. 2001. *Werkzeugmaschine mit Parallelkinematik unter Verwendung von Seilantrieben.* Workshop "Modellbildung, Simulation und Optimierung von Parallelkinematiken", Aachen.
- [146] Schiffner, G. 1986. *Spannungen in laufenden Drahtseilen.* Dissertation, Universität Stuttgart.
- [147] Schindler Holding AG. 2000. *Tätigkeitsbericht 2000 73. Geschäftsjahr.*
- [148] Schlarmann, R. Operation of mobile cranes using synthetic rope. In *IFAC 6th edition.*
- [149] Schmieder, A., Heinze, T., und Michael, M. Schadensanalyse hochfester Faserseile. In *6. Fachkolloquium Innozuga, Chemnitz.*
- [150] Schönherr, S. *Einfluss der seitlichen Seilablenkung auf die Lebensdauer von Drahtseilen beim Lauf über Seilscheiben.* Dissertation, Universität Stuttgart.
- [151] Shitkow D.G. and Pospeshow I.T. 1957. *Drahtseile.* VEB Verlag Technik, Berlin.

- [152] Sloan, F. 2009. *Damage mechanisms in synthetic fibre ropes. Innovative ropes and rope applications: A celebration of 175 years of wire rope.* Proceedings of the OIPEEC conference 2009, Stuttgart.
- [153] Sloan, F., Nye, R., und Liggett, T. Improving bend-over-sheave fatigue in fibre ropes. Oceans 2003 Celebrating the Past...Teaming Toward the Future. In *IEEE Cat. No. 03CH37492*, 1054–1057.
- [154] Smeets, P., Vlasblom, M. P., und Weis, J. C. Latest improvements in HMPE rope design for steel wire rope applications. In *Innovative ropes and rope applications: A celebration of 175 years of wire rope; Proceedings of the OIPEEC conference 2009 / 3rd International Stuttgart Ropedays.*
- [155] St.Germain, G. High performance synthetic roundslings. In *Innovative ropes and rope applications: A celebration of 175 years of wire rope; Proceedings of the OIPEEC conference 2009 / 3rd International Stuttgart Ropedays*, 59–70.
- [156] Tadokoro, S., Murao, Y., Hiller, M., Murata, R., und Kohkawa, H. Matsushima, T. Motion base with 6-DOF by parallel cable drive architecture. In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 115–123.
- [157] Tension Technology International Ltd. 2005. *Yarn on Yarn Abrasion Test. Quantitative Measure of Yarn Durability.*
- [158] Teufelberger. 2016. *soLITE. Das hochfeste Faserseil für Krane. Unternehmensbroschüre.*
- [159] Universität Duisburg-Essen. 2014. *Seilroboter. Automatisierungslösungen für große Distanzen und hohe Geschwindigkeiten.* Flyer. Lehrstuhl für Mechatronik.
- [160] Unterberg H.-W. 1991. Der Einfluss der Rillenform auf die Lebensdauer von laufenden Drahtseilen. *Draht* 42, 41, 233–234.
- [161] VDI. 1990. *VDI 2500 - Faserseile: Beschreibung-Auswahl-Bemessung.*
- [162] VDI. 2012. *VDI 2358 - Drahtseile für Fördermittel*, 2358.
- [163] Verhoeven, R., Hiller, M., und Tadokoro, S. Workspace of tendon-driven Stewart Platforms: Basics, classification, details on the planar 2-DOF Classification, 871–876.
- [164] Verreet, R. Stahldrahtseile für Hebezeuge. Probleme und Lösungen. *Euroseil*, 455-457 und 487-490.
- [165] Verreet, R. 1996. Über das Drehverhalten von Drahtseilen. *CASAR Spezialdrahtseile - Firmenschrift.*
- [166] Verreet, R. 2003. Seilendverbindungen. *CASAR Spezialdrahtseile - Firmenschrift.*
- [167] Verreet, R. 2004. Eine kurze Geschichte des Drahtseils. *CASAR Spezialdrahtseile - Firmenschrift.*
- [168] Vogel, W. Dauerbiegeversuche an gedrehten und geflochtenen Faserseilen aus hochfesten Polyethylenfasern. In *Technische Textilien*, 126–128.

- [169] Vogel, W. 2003. Tragmittel für Treibscheibenaufzüge. *Lift-Report* 29, 5, 6–16.
- [170] Vogel, W. und Heinze, T. Ansätze zur Lebensdauerberechnung laufender Stahl- und Faserseile. In 5. *Fachkolloquium Innozug - Chemnitz, 07. und 08. Mai 2012*, 1–6.
- [171] Vogel, W. und Nikic, I. 2004. Neue Seildauerbiegemaschine des IFT für kleine Seildurchmesser. *Euroseil* 123, 2 (Jun. 2004), 29–30.
- [172] Vogel, W. und Wehking, K.-H. Hochfeste laufende Faserseile in der Fördertechnik und Logistik. In *Euroseil*, 44–48.
- [173] Vornbäumen Stahlseile GmbH & Co. KG. 2016. *Produktkatalog*.
- [174] Wang, N. 1990. *Spannungen in Spiralseilen mit erzwungener und freier Krümmung*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [175] Weber, T. 2013. *Beitrag zur Untersuchung des Lebensdauerverhaltens von Drahtseilen unter einer kombinierten Beanspruchung aus Zug, Biegung und Torsion*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [176] Wehking, K.-H. Endurance of high-strength-fibre ropes running over pulleys. In *OIPEEC Round table reading*.
- [177] Wehking, K.-H. *Entwicklung einer bildgebundenen Methode (CCD Kamertechnik) inklusive Beleuchtung und Analysesoftware zur Ablegereifeerkennung bei hochfesten Faserseilen*. AiF Kooperations-Projekt ZF 4018202GR5 2016.
- [178] Wehking, K.-H. 2000. *Lebensdauer und Ablegereife von Aramidfaserseilen in Treibscheibenaufzügen der Schindler AG*. Interner Forschungsbericht, Ebikon / Schweiz.
- [179] Wehking, K.-H. 2010. *Abschlussbericht Forschungsprojekt "Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik* AiF 15370/N1. Universität Stuttgart.
- [180] Wehking, K.-H. 2014. *Hochdynamische Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken*. DFG-Forschungsantrag, WE 2187/29-1. DFG-Forschungsantrag.
- [181] Wehking, K.-H. 2014. *Laufende Seile. Bemessung und Überwachung . [mit 21 Tabellen]*. Kontakt & Studium 673. expert-Verl., Renningen.
- [182] Wehking, K.-H., Winter, S., Witte, T., und Finckh-Jung, A. 2016. *Entwicklung von steifen und biege-schlaffen Zugelementen und Kraffteinleitungselementen für Flächenelemente*. Endbericht DFG-Forschungsvorhaben WE 2187/18-2.
- [183] Weis, J. C. 2015. *Parameterstudie der Kontaktspannungen in zugbelasteten Drahtseilen basierend auf der Finite-Elemente-Methode*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [184] Weis, J. C., Ernst, B., und Wehking, K.-H. Use of High Strength Fibre Ropes in Multi-Rope Kinematic Robot Systems. In *Cable-Driven Parallel Robots -*

Proceedings of the 2nd International Conference on Cable-Driven Parallel Robots.

- [185] Winter, S. 2015. *Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben KF2271507LK0. Entwicklung eines hochfesten Faserseils für Regalbediengeräte.* Institut für Fördertechnik und Logistik.
- [186] Winter, S. und Wehr, M. 2016. Neuartige monolithische Seilendverbindung für hochmodulare Faserseile. In *WGTL-Kolloquium.*
- [187] Wittel, H., Roloff, H., und Matek, W. 2009. *Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung.* Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- [188] Woernle, C. 2000. *Dynamics and control of a cable suspension manipulator.* 9th German-Japanese seminar on nonlinear problems in dynamical system-theory and applications, Gerhard-Mercator-Universität GH Duisburg.
- [189] Woernle, R. 1929. Ein Beitrag zur Klärung der Drahtseilfrage. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure VDI 73*, 13, 417–426.
- [190] Wolf, E. 1987. *Seilbedingte Einflüsse auf die Lebensdauer laufender Drahtseile.* Dissertation, Universität Stuttgart.
- [191] Yang, H. H. 1993. *Kevlar aramid fiber.* Wiley, Chichester.
- [192] Yaqing, Z. and Qi, L. Xiongwei, L. Initial test of wire-driven parallel suspension systems for low speed wind tunnels. In *Proceedings on 12th IFToMM world congress.*
- [193] Ziegler, S. 2007. *Einfluss der Drahtschwingfestigkeit auf die Lebensdauer von Seilen.* Dissertation, Universität Stuttgart.
- [194] Ziegler, S. 2013. Roboter an der langen Leine. *All Electronics.*

VI. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau eines Seilroboters [98].....	2
Abbildung 2.1: Flugsimulator mit paralleler Kinematik des Instituts für Systemdynamik der Universität Stuttgart (ISYS)	5
Abbildung 2.2: Seitenansicht eines gedrehten (geschlagenen) Seils [161]	11
Abbildung 2.3: Übersicht über geflochtene Seilkonstruktionen i.A.a. [161]	11
Abbildung 2.4: Rundgeflechte und deren Flechtlänge [161].....	12
Abbildung 2.5: Aufbau eines 12-flechtigen Rundgeflecht-Faserseils in der Seitenansicht (links) und im Querschnitt (rechts) [108]	12
Abbildung 2.6: Zugfestigkeiten verschiedener Seilwerkstoffe im Vergleich i.A.a. [108]	15
Abbildung 2.7: Retardationsvorgang (Kriechen) in Abhängigkeit der Zeit t	17
Abbildung 2.8: Relaxationsvorgang in Abhängigkeit der Zeit t	17
Abbildung 2.9: Molekulare Struktur vor und nach der Verstreckung i.A.a. [73]	19
Abbildung 2.10: Faserpreise im Vergleich [65].....	21
Abbildung 2.11: Gleitreibwerte verschiedener Faserseile auf Stahl	22
Abbildung 2.12: Reibwert verschiedener Faserseile in Abhängigkeit des Rillendurchmesser / Seildurchmesser- Verhältnisses [125]	23
Abbildung 2.13: Haftreibwerte unterschiedlicher Faserseile in Stahlrillen nach [114]	23
Abbildung 2.14: Bruchbiegewechselzahlen eines Drahtseils 16 8x19F-NFC 1650 U sZ [58].....	25
Abbildung 2.15: Einfluss des Rundrillenübermaßes auf die Bruchbiegewechselzahl [59]	28
Abbildung 2.16: Untersuchungsstand laufender Stahldraht und HM-HT- Faserseile in Anlehnung an [181]	31
Abbildung 2.17: Schädigungsmechanismen und Systemparameter laufender, hochmodularer Faserseile im Dauerbiegeversuch nach [77]	34
Abbildung 2.18: Garn-Abasionstest nach ASTM D 6661 [157].....	38
Abbildung 2.19: Vergleich der Zugfestigkeit und spezifischer Masse von HM-HT- Seilen gegenüber Stahlseilen.....	40
Abbildung 2.20: Reißlängen verschiedener Seilmaterialien	41
Abbildung 2.21: Drei Stadien des Kriechvorgangs von Polymeren	43
Abbildung 2.22: Aramidseil der Firma Schindler für den Einsatz in Aufzügen	46
Abbildung 3.1: Seildauerbiegemaschine BM12 für kleine Seildurchmesser.....	50
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung von Einfach- und Doppelbiegung [150, 175]	51
Abbildung 3.3: Geometrie der Prüfscheiben.....	54

Abbildung 3.4: Abhängigkeit der Seillebensdauer von Faserseilen N vom relativen Rillenradius r/d i.A.a. [77].....	55
Abbildung 3.5: Selbstanlegender Messschieber mit breiten Messbacken für Faserseile - „Dickenschnellmessgerät“	57
Abbildung 3.6: Zugschwellprüfmaschine mit 75 kN statischer Höchstzuglast	60
Abbildung 3.7: Vergussform für kegelige Faserseilvergüsse	63
Abbildung 3.8: Ausgehärteter Kunststoff-Kegelverguss mit (Links, Mitte) und ohne Vorspannung (Rechts).....	64
Abbildung 3.9: Versuchsmatrix zur Durchführung der Zugschwellversuche	66
Abbildung 3.10: Systematik der für Versuche zur Ermittlung der Mindestbruchkraft eingesetzten Seilendverbindungen	68
Abbildung 3.11: HIKE-Verguss an einem 2 mm HM-HT-Faserseil	68
Abbildung 3.12: Bewegungsablauf bei klassischen Dauerbiegemaschinen mit Schubkurbelantrieb	70
Abbildung 3.13: Modell des Hochdynamik-Prüfstands.....	71
Abbildung 3.14: Windenantriebe des Hochdynamikprüfstands.....	72
Abbildung 3.15: Verlegeeinheit zur Schrägzugkompensation mit Prüfscheibe	73
Abbildung 3.16: Gewichtskörbe des Hochdynamikprüfstands mit Linearführungen, Schrägzugkompensation und Prüfscheiben.....	74
Abbildung 3.17: Veränderliches Bewegungsprofil des Hochdynamikprüfstands.....	75
Abbildung 3.18: Schematische Zusammensetzung dreier verschiedener Gesamt-Biegelängen l_b mit $a_A = a_B > a_C$ und $v_A > v_B = v_C$	78
Abbildung 4.1: Lebensdauer eines Dyneema-Seils bei unterschiedlichen D/d -Verhältnissen	81
Abbildung 4.2: Dehnung im Biegeversuch	82
Abbildung 4.3: Durchmesser von Dyneema in der Biegezone über die Seillebensdauer	83
Abbildung 4.4: Lebensdauer N der Versuchsseile D2, T2 und V2 bei verschiedenen Seilzugkräften S/d^2 [N/mm ²].....	83
Abbildung 4.5: Lebensdauer N der Versuchsseile V6 und M6 unter verschiedenen Seilzugkräften	84
Abbildung 4.6: Vergleich der Lebensdauern der Versuchsseile D2, T2, V2, V6 und M6 im Standard-Biegeversuch.....	85
Abbildung 4.7: Lebensdauer N der Versuchsseile V6 und M6 in Abhängigkeit der relativen Biegelänge l/d	86
Abbildung 4.8: Dehnung des Seils D2 im Zugschwellversuch	89
Abbildung 4.9: Dehnung des Seils T2 im Zugschwellversuch.....	90
Abbildung 4.10: Dehnung des Seils V2 im Zugschwellversuch	90
Abbildung 4.11: Dehnung des Seils V6 im Zugschwellversuch	90
Abbildung 4.12: Dehnung des Seils M6 im Zugschwellversuch.....	91

Abbildung 4.13: Temperaturverlauf der Versuchsseils D2, T2, V2, V6 und M6 im Zugschwellversuch bei verschiedenen Lasten und Prüffrequenzen	91
Abbildung 4.14 Restbruchkraft des Versuchsseils D2 ohne und mit Zugschwellbelastung.....	94
Abbildung 4.15 Restbruchkraft des Versuchsseils T2 ohne und mit Zugschwellbelastung.....	95
Abbildung 4.16 Restbruchkraft des Versuchsseils V2 ohne und mit Zugschwellbelastung.....	96
Abbildung 4.17 Restbruchkraft des Versuchsseils V6 ohne und mit Zugschwellbelastung.....	96
Abbildung 4.18 Restbruchkraft des Versuchsseils M6 ohne und mit Zugschwellbelastung.....	97
Abbildung 4.19: absolute Lebensdauer D2 unter hochdynamischer Beanspruchung	100
Abbildung 4.20: relative Lebensdauer D2 unter hochdynamischer Beanspruchung	101
Abbildung 4.21: absolute Lebensdauer T2 unter hochdynamischer Beanspruchung	102
Abbildung 4.22: relative Lebensdauer T2 unter hochdynamischer Beanspruchung	102
Abbildung 4.23: absolute Lebensdauer V2 unter hochdynamischer Beanspruchung	103
Abbildung 4.24: relative Lebensdauer V2 unter hochdynamischer Beanspruchung	104
Abbildung 4.25: absolute Lebensdauer V6 unter hochdynamischer Beanspruchung	105
Abbildung 4.26: relative Lebensdauer V6 unter hochdynamischer Beanspruchung	106
Abbildung 4.27: absolute Lebensdauer M6 unter hochdynamischer Beanspruchung	106
Abbildung 4.28: relative Lebensdauer M6 unter hochdynamischer Beanspruchung	107
Abbildung 4.29: Vergleich der Lebensdauern unter hochdynamischer Beanspruchung	108
Abbildung 4.30: Lebensdauer des Versuchsseils D2 mit Übergangsversuch	109
Abbildung 4.31: Lebensdauer des Versuchsseils T2 mit Übergangsversuch.....	110
Abbildung 4.32: Lebensdauer des Versuchsseils V2 mit Übergangsversuch.....	111
Abbildung 4.33: Vergleich der Lebensdauern unter hochdynamischer Beanspruchung	111
Abbildung 4.34: Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seilennendurchmesser	112
Abbildung 4.35: Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Seilkonstruktionen	114
Abbildung 4.36: Messaufbau zur Untersuchung des Schlupfs	122

Abbildung 4.37: Schlupfmessung Versuch Dyneema D2, $v=5$ m/s, $a=10$ m/s ²	124
Abbildung 4.38: Schlupfmessung Versuch Dyneema D2, $v=5$ m/s, $a=50$ m/s ²	124
Abbildung 4.39: Schlupfmessung Versuch Dyneema D2, $v=5$ m/s, $a=100$ m/s ²	124
Abbildung 4.40: Vergrößerte Darstellung des Versuchsseils T2 aus Hochdynamikversuchen.....	125
Abbildung 4.41: Vergrößerte Darstellung des Versuchsseils V2 aus Hochdynamikversuchen.....	126
Abbildung 4.42: Vergrößerte Darstellung des Versuchsseils D2 aus Hochdynamikversuchen.....	127
Abbildung 5.1: Restbruchkraft Versuchsseil E2	131
Abbildung 5.2: Lebensdauer des Versuchsseils E2 im Biegeversuch	132
Abbildung 5.3: Vergleich Versuchsseil E2 ohne (oben, Zone 0) und mit (unten, Zone I) Biegebeanspruchung.....	133
Abbildung 5.4: Biegezone Versuchsseil E2	133
Abbildung 5.5: Lebensdauer des Referenzseils E2 unter hochdynamischer Beanspruchung.....	134
Abbildung 5.6: Lebensdauer des Referenzseils E2 unter hochdynamischer Beanspruchung.....	134
Abbildung 5.7: Lebensdauer der Seile D2 und E2 unter hochdynamischer Beanspruchung.....	135
Abbildung 5.8: Aufbau des Versuchsseils S2 [173]	138
Abbildung 5.9: Lebensdauer des Versuchsseils S2 im Biegeversuch	139
Abbildung 5.10: Lebensdauer aller Versuchsseils im Biegeversuch	139
Abbildung 5.11: Lebensdauer des Versuchsseils S2 unter hochdynamischer Beanspruchung.....	140
Abbildung 5.12: Lebensdauer des Versuchsseils S2 unter hochdynamischer Beanspruchung.....	141
Abbildung 5.13: Beispiel für Roboter A: Klassischer 6-Achs-Industrieroboter [137]	146
Abbildung 5.14: Beispiel für Roboter B: SCARA-Roboter für Flex-Picker-Aufgaben [144].....	146

VII. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Hochfeste Fasern und deren Handelsname	15
Tabelle 2.2: Eigenschaften verschiedener HM-HT-Fasern [4, 108].....	21
Tabelle 2.3: Bewertung der Eigenschaften verschiedener Zugelemente	44
Tabelle 3.1: Kennwerte der ausgewählten Versuchsseile	48
Tabelle 3.2: Kennwerte der eingesetzten Dauerbiegemaschinen	52
Tabelle 3.3: Kennwerte der verwendeten Seilscheiben.....	56
Tabelle 3.4: Konstante Versuchsparameter	77
Tabelle 3.5: Prüffrequenzen der Dynamikversuche.....	79
Tabelle 4.1: Bruchkraft F_w der ausgewählten Versuchsseile	93
Tabelle 4.2: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil D2	115
Tabelle 4.3: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil T2	115
Tabelle 4.4: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil V2	115
Tabelle 4.5: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil V6	116
Tabelle 4.6: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil M6.....	116
Tabelle 4.7: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil D2	118
Tabelle 4.8: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil T2.....	118
Tabelle 4.9: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil V2	118
Tabelle 4.10: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil V6	118
Tabelle 4.11: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil M6.....	119
Tabelle 5.1: Kennwerte der ausgewählten Referenzseile	130
Tabelle 5.2: Lage der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil E2	136
Tabelle 5.3: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil E2	136
Tabelle 5.4: Lage der Bruchstellen, Versuchsseil S2	142
Tabelle 5.5: Geschwindigkeit an der Bruchstelle [m/s], Versuchsseil S2	142

VIII. Anhang

Technische Daten – Hochdynamikprüfstand

Abmessungen:

Grundfläche:	2,00 m x 3,20 m
Gesamthöhe:	6,50 m
Hub:	4700 mm
Spannweg:	800 mm

Leistungsdaten:

Anzahl Prüfstellen:	4
Antriebsleistung:	4 x 5,6 kW
Maximale Seilgeschwindigkeit:	10 m/s
Maximale Beschleunigung:	100 m/s ²
Ruckfaktor:	0 - ∞
Masse Gewichtskorb:	25 - 800 kg
Maximaler Seildurchmesser ohne Kuppelseil:	6 mm
Maximaler Seilscheibendurchmesser:	150 mm
Schrägzug:	stufenlos einstellbar 0 – 30 °

IX. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Martin Wehr
Geburtsdatum	27.02.1985
Geburtsort	Bad Mergentheim

Bisherige Beschäftigungen

seit 02/2011	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart <ul style="list-style-type: none">- Zerstörungsfreie Seilprüfung- Regelmäßige Prüfung von Seilbahnanlagen- Anerkannter Sachverständiger für Seilbahnen, Schleppaufzüge und Vergnügungsbahnen nach § 24 Abs. 3 LSeilbG BW- Entwicklung von Sonderprüfgeräten- Forschungsprojekte
03/2010 – 07/2010	Fachpraktikum bei ThyssenKrupp Aufzugswerke GmbH in Neuhausen a.d.F.
05/2008 – 02/2011	wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart
11/2006 – 01/2008	wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Angewandte und experimentelle Mechanik (IAM), heute Institut für Nichtlineare Mechanik (INM) der Universität Stuttgart

Ausbildung

10/2005 – 02/2011	Studium des „allgemeinen Maschinenbaus“ an der Universität Stuttgart, Vertiefung Fördertechnik, Werkzeugmaschinen, Abschluss Dipl.-Ing., Gesamtnote „sehr gut“ (1,3)
07/2004 – 03/2005	Zivildienst im Logierhaus der Musikakademie Schloss Weikersheim
09/1995-07/2004	Gymnasium Weikersheim, Abschluss Abitur (1,6)