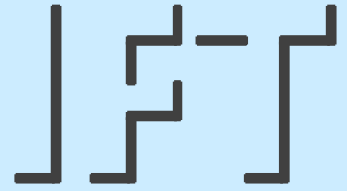


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

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

UNIVERSITÄT STUTTGART



Tobias Weber

**Beitrag zur Untersuchung des
Lebensdauerungsverhaltens von
Drahtseilen unter einer
kombinierten Beanspruchung
aus Zug, Biegung und Torsion**

September 2013

Beitrag zur Untersuchung des Lebensdauerhaltens von Drahtseilen unter einer kombinierten Beanspruchung aus Zug, Biegung und Torsion

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. Tobias Weber
aus Göppingen

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

Tag der mündlichen Prüfung: 11.09.2013

Institut für Fördertechnik und Logistik
der Universität Stuttgart

2013

Meiner Frau Claudia gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart. Das im Rahmen der Dissertation durchgeführte Forschungsprojekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert, wofür ich mich an dieser Stelle bedanke.

Bei den Seilherstellern Casar Drahtseilwerk Saar GmbH und Gustav Wolf Seil- und Drahtwerke GmbH & Co. KG bedanke ich mich für die zur Verfügung gestellten Versuchsseile.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), danke ich für die wissenschaftliche Betreuung, sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die Durchsicht meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feyrer, ehemaliger Leiter der Abteilung Seiltechnik, danke ich für die anregenden und konstruktiven Diskussionen und das Interesse an meiner wissenschaftlichen Arbeit. Seine Arbeiten und Erkenntnisse im Bereich der Seilforschung und insbesondere in der Lebensdauerbetrachtung bilden die Grundlage zu dieser Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. S. Winter, Leiter der Abteilung Seiltechnologie, und Herrn Dipl.-Ing. P. Raach, Leiter der Gruppe Laufende Seile/ Stehende Seile, danke ich für die Unterstützung und Förderung meiner Forschungsarbeit sowie für die konstruktiven Anregungen. Für das hervorragende Forschungsumfeld und die ausgezeichnete Zusammenarbeit darf ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Seiltechnologie bedanken. Bei Herrn Dr.-Ing. B. Ernst, Herrn Dipl.-Ing. K. Kühner und Herrn Dipl.-Ing. J. Weis bedanke ich mich neben der fachlichen auch für die freundschaftliche und persönliche Unterstützung.

Bei den Mitarbeitern der Werkstatt bedanke ich mich für die elektrotechnischen und mechanischen Arbeiten an den Versuchseinrichtungen.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) S. Bakschan danke ich für die Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten und der Konfektionierung der Versuchsproben.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Studierenden für ihre Tätigkeiten und Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes bedanken.

Dank gilt meinen Eltern und meinen Brüdern, deren Unterstützung ich immer erfahren darf.

Meiner Frau Claudia danke ich von ganzem Herzen für die einzigartige Unterstützung und Rücksichtnahme, sowie das unzählige Korrekturlesen meiner Arbeit.

Tobias Weber

Stuttgart, im September 2013

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
Kurzzusammenfassung	xiii
Abstract	xvii
1 Einleitung	27
1.1 Motivation	29
1.2 Zielsetzung der Arbeit	33
2 Stand der Forschung	35
2.1 Konstruktionsarten von Drahtseilen und deren Klassifizierung	35
2.2 Drehmomentbestimmung von Drahtseilen	37
2.3 Lebensdauerbestimmung von laufenden Drahtseilen	39
2.4 Ablegereife und deren Bestimmung	46
2.5 Seilverdrehung durch Höhenspannung	47
2.6 Seilverdrehung durch Schrägzug	51
3 Theoretische Untersuchungen	55
3.1 Seilgeometrie unter Verdrehung	55
3.1.1 Begriffsdefinition	55
3.1.2 Geometrische Zusammenhänge	56
3.2 Theoretische Darstellung der Seilverdrehung durch Höhenspannung . .	57
3.3 Theoretische Betrachtung der Seilverdrehung durch Schrägzug	59
3.4 Sperrung unter dem Einfluss der Verdrehung	64
3.5 Lastumverteilung unter dem Einfluss der Verdrehung	65
4 Versuchsgrundlagen	73
4.1 Prüfstand	73
4.1.1 Dauerbiegemaschine	73
4.1.2 Verdrehvorrichtung	75
4.1.3 Zugprüfmaschine	78

4.2	Versuchsseile	78
4.2.1	Kennwerte der Versuchsseile	79
4.3	Versuchsparameter	84
4.3.1	Versuchsaufstellung	85
4.3.2	Versuchsscheiben	87
4.4	Versuchsablauf	87
4.4.1	Abbruchkriterien	88
4.4.2	Versuchsende	89
4.4.3	Einrichten der Versuchsproben	89
4.4.4	Versuchsaufzeichnung	92
5	Versuchsergebnisse	95
5.1	Grundlagen zur Regressionsanwendung	95
5.2	Referenzversuche	96
5.2.1	Ergebnisse der Referenzversuche	97
5.2.2	Auswertung der Referenzversuche mittels Regression	103
5.2.3	Zusammenfassung der Referenzversuche	105
5.3	Versuche mit Verdrehung	106
5.3.1	Ergebnisse der Verdrehversuche	106
5.3.2	Auswertung der Verdrehversuche mittels Regression	110
5.3.3	Analyse der Regressionsrechnung	114
5.3.4	Zusammenfassung der Versuche mit Verdrehung	116
5.4	Ablegereife und Schädigungsverhalten	123
5.4.1	Ablegereife	123
5.4.2	Mikroskopische Untersuchung	130
5.5	Schlaglängenmessung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	143
6.1	Zusammenfassung	143
6.2	Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten	149
	Literaturverzeichnis	151
	Abbildungsverzeichnis	161
	Tabellenverzeichnis	165
	Anhang	167

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a_i	-	Konstante zur Berechnung der Seillebensdauer
A	mm^2	Querschnittsfläche
A_i	mm^2	Drahtquerschnittsfläche in Drahtlage i
A_j	mm^2	Litzenquerschnittsfläche in Litzenlage j
b_i	-	Konstante zur Berechnung der Seillebensdauer
B	-	Bestimmtheitsmaß
B_A	-	Ablegedrahtbruchzahl
c_i	-	Drehmomentkonstante
d	mm	Seildurchmesser
d_0	mm	Einheitsdurchmesser ($d_0 = 1 mm$)
d_E	mm	Durchmesser des Einheitsseilstücks ($d_E = 16 mm$)
d_L	mm	Litzendurchmesser
d_{nenn}	mm	Seilnennndurchmesser
d_{ist}	mm	Seilistdurchmesser
D	mm	Durchmesser Seilscheibe
D^*	Nm^2	Drehsteifigkeit
e_i	-	Konstante zur Berechnung der Verdrehung
f_d	-	Einfluss des Seildurchmessers auf die Lebensdauer
f_l	-	Einfluss der Biegelänge auf die Lebensdauer
$f_{N,i}$	-	Biegeweichselfaktor
$f_{N,\omega}$	-	Biegeweichselfaktor für Verdrehung
F_m	N	wirkliche Bruchkraft
F_{min}	N	Mindestbruchkraft des Seils
g	m/s^2	Gravitationskonstante
g_i	-	Konstante zur Berechnung der Ablegedrahtbruchzahl
G	N/mm^2	Schubmodul
K	-	Mindestbruchkraftfaktor
l	mm	Biegelänge
l_A	mm	Seillänge auf Rillenflanke

l_S	mm	Schlaglänge
$lg s$	-	logarithmische Standardabweichung
L	mm	Länge
L_f	mm	freie Seillänge
m	kg	Masse
M	Nm	Drehmoment
M_0	Nm	Drehmoment im unverdrehten Seilzustand
n	-	Anzahl
N	-	Lebensdauer/Bruchbiegewechselzahl
N_A	-	Ablegiebiegewechselzahl
N_B	-	Bruchbiegewechselzahl
N_m	-	mittlere Bruchbiegewechselzahl
N_i	-	experimentelle Bruchbiegewechselzahl
$N_{i,\omega}$	-	Prognosewert
N_ω	-	Bruchbiegewechselzahl unter Verdrehung
p	-	Anzahl der Variablen
q	-	Konstante zur Berechnung der Donandtkraft
r	mm	Radius/Drahtwindungsradius
R_j	mm	Litzenwindungsradius
R_0	N/mm^2	Drahtnennfestigkeit
R_D	mm	Drahtwindungsradius
R_r	N/mm^2	Seilfestigkeitsklasse
s'_Q	mm	Sperrung
S	N	Seilzugkraft
S_0	N	Einheitskraft ($S_0 = 1 N$)
S_D	N	Donandtkraft
S_N	N	Nutzlast
S/d^2	N/mm^2	durchmesserbezogene Seilzugkraft
u	mm	Bogenlänge des Teilkreises einer Litzenwendel
U	-	Umdrehung
x	mm	Länge
z	-	Anzahl
z_i	-	Anzahl der Drähte in Drahtlage i
z_j	-	Anzahl der Litzen in Litzenlage j
α	rad	Drahtschlagwinkel
β	rad	Schlagwinkel der Litzen

β_j	<i>rad</i>	Litzenschlagwinkel der Litzenlage j
Δ	-	Differenz
ϵ	%	Dehnung
ϕ	<i>rad</i>	Mittelpunktswinkel
φ	<i>rad</i>	Drehwinkel
γ	<i>rad</i>	Rillenöffnungswinkel
μ	-	Reibungskoeffizient
ω	<i>rad/mm</i>	Verdrehwinkel
ω_A	<i>rad/mm</i>	Verdrehwinkel auf der Rillenflanke
ω_f	<i>rad/mm</i>	Verdrehwinkel auf der freien Seilstrecke
ξ	<i>rad</i>	Schrägzugwinkel
Indizes	-	Bedeutung
0	-	Ausgangszustand
<i>D</i>	-	Draht
exp	-	experimentell
<i>i</i>	-	Drahtlage/Variable
<i>j</i>	-	Litzenlage
<i>L</i>	-	Litze
sim	-	Einfachbiegung
theo	-	theoretisch

Kurzzusammenfassung

Drahtseile, die zur Kategorie der laufenden Seile zählen, erfahren beim Lauf über Seilscheiben oder beim Aufwickeln auf Winden eine erzwungene Krümmung. Die daraus resultierende Biegebelastung überlagert die in axialer Richtung wirkende Zugbelastung unter Anliegen einer Zugkraft. In Laborversuchen gelingt es, den Lauf eines Seils über eine Scheibe realitätsnah abzubilden (u. a. [Feyrer1983b], [Feyrer2000] u. [Schoenherr2005]).

Die Berechnung der Seillebensdauer durch ausschließlich theoretische Betrachtung ist nicht möglich, was experimentelle Untersuchungen erforderlich macht, bei denen entsprechende Belastungsparameter abgebildet werden (vgl. [Feyrer2000]). Eine umfangreiche Datenbasis, generiert aus Laborversuchen, bildet somit die Grundlage der mittels Regressionsanalyse ermittelten Berechnungsmethode nach Feyrer, die mit guter Genauigkeit die Seillebensdauer unter Berücksichtigung verschiedener Parameter abbildet ([Feyrer2007] bzw. [Feyrer2011]).

In der praktischen Anwendung können unterschiedliche Ursachen zu einer erzwungenen Verdrehung des im Betrieb befindlichen Drahtseils führen (u. a. [Engel1958], [Rebel1997], [Chaplin2000], [Verreet2001], [Oplatka2004] u. [Feyrer2007]). Die bisherigen Untersuchungen dazu fokussieren sich u. a. auf die theoretische Beschreibung der Ursachen und deren Beobachtungen bzw. auf die messtechnische Erfassung in der Anwendung. Inwiefern sich jedoch ein diskret verdrehter Zustand auf die Lebensdauer laufender Seile auswirkt, wurde bisher nicht betrachtet.

Da laufende Drahtseile auch ohne die Möglichkeit zur freien Drehung der Seilenden einen verdrehten Zustand aufweisen können und aufgrund der bisher bestehenden Unkenntnis bezüglich des Einflusses von Verdrehungen auf die ertragbare Biegewechselzahl bzw. die Seillebensdauer, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit dieser Belastungszustand mit dem Ziel einer rechnerischen Bestimmung untersucht.

Kapitel 1 führt in die Thematik ein und beschreibt Ursachen, die zu einer Seilverdrehung führen können. In Kapitel 2 wird eine Übersicht über den Stand der Forschung bei laufenden Seilen gegeben und auf die bisherigen Erkenntnisse ausgewählter Ursachen der Seilverdrehung eingegangen. Die bestehende Beschreibung dieser Ursachen, die zu

einer Seilverdrehung führen, werden in Kapitel 3 auf theoretische Weise behandelt. Des Weiteren werden die Grundlagen und die Begrifflichkeiten von Drehung und Verdrehung beschrieben sowie die geometrischen Veränderungen innerhalb des Seils in Abhängigkeit der Verdrehung betrachtet.

Da die vorliegende Arbeit u. a. zum Ziel hat, den Einfluss diskreter Verdrehungen auf die Lebensdauer laufender Drahtseile rechnerisch abzubilden und dies, wie oben bereits dargelegt, nur durch Versuche möglich ist, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes systematische Versuchsreihen mit gezielter Variation der Untersuchungsparameter gefahren. In Kapitel 4 werden die Versuchsgrundlagen der durchgeführten Versuche beschrieben sowie die verwendeten Versuchsseile mit ihren Eigenschaften dargestellt. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten experimentellen Untersuchungen mittels Dauerbiegeversuchen und die daraus resultierenden Ergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt. Zudem wird an dieser Stelle die vorgenommene Regressionsanalyse der Versuchsergebnisse beschrieben und die daraus ermittelte Berechnungsformel zur Bestimmung der ertragbaren Bruchbiegewechselzahl laufender Drahtseile unter dem Einfluss diskreter Verdrehungen abgebildet.

Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der Verdrehung neben der Seilkonstruktion und des Verdrehgrades abhängig von der Seilzugkraft und des D/d -Verhältnisses ist. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass der Einfluss der Verdrehung in Abhängigkeit der Seilkonstruktion nicht zwangsläufig zu einer Reduzierung der Lebensdauer führt. Je nach Parameterwahl, Seilkonstruktion und Verdrehgrad ergeben sich auf Basis der systematisch durchgeführten Versuchsreihen rechnerische Lebensdauersteigerungen von bis zu 25% im Bezug zur Seillebensdauer im unverdrehten Zustand (vgl. Kapitel 5.3). Außerhalb der diskreten Verdrehwinkelbereiche in denen eine Lebensdauersteigerung auftritt, sinkt die Lebensdauer infolge der Seilverdrehung stellenweise stark ab. Besonders gravierend ist der Einfluss von Verdrehung auf die Seillebensdauer des untersuchten mehrlagigen Spiralrundlitzenseils. Durch die gegenläufige Verseilung der Litzenlagen wirkt sich die in Kapitel 3.5 dargestellte Lastumverteilung stärker aus als bei einlagigen Rundlitzenseilen. Die rechnerisch bestimmte Lebensdauerreduzierung im Bezug zur Seillebensdauer im unverdrehten Zustand liegt bei einem im Verhältnis zu den untersuchten Verdrehwinkeln der einlagigen Rundlitzenseile relativ geringen Verdrehwinkel von $\omega = 180^\circ/100d$ und entsprechender Parameterwahl bereits bei -77% (siehe Kapitel 5.3).

Durch die in dieser Arbeit auf Basis von systematischen Versuchsreihen ermittelte Berechnungsformel ist es erstmals möglich, den Einfluss diskreter Verdrehungen auf die Lebensdauer laufender Drahtseile zu bestimmen. Die vorgenommene Anpassung an die international anerkannte Gleichung zur Berechnung der Lebensdauer laufender

Drahtseile nach Feyrer (vgl. Seite 43 u. Seite 110), ermöglicht eine grundlegende und weltweite Anwendung der hier aufgestellten Berechnungsmethode zur Berücksichtigung diskreter Verdrehwinkel (vgl. [Feyrer2007] u. [Feyrer2011]).

Mit den theoretischen und experimentellen Betrachtungen zur Seilverdrehung lassen sich sowohl bei der Auslegung eines Seiltriebes als auch im Betrieb, die Seile auf eine mögliche Verdrehung hin untersuchen und der daraus resultierende Einfluss auf die Lebensdauer bestimmen. Die vorliegenden Untersuchungen sind daher für die Sicherheit in der Anwendung und für eine technische bzw. ökonomische Optimierung relevant.

Abstract

Contribution to the Study of the Lifetime Behavior of Wire Ropes under a Combined Tensile, Bending and Torsion Load

Initial Situation

The lifetime of running ropes is affected mainly by the load (tensile load and bending) and influencing factors related to the rope itself and to the rope drive (e.g. [Feyrer2007]). Decades of research in the field of wire ropes have produced detailed knowledge on different influencing factors on the rope lifetime (e.g. [Mueller1965], [Wolf1987], [Schoenherr2005] and [Feyrer2007]). Many of these influencing factors can be considered in Feyrer's lifetime prediction formula for running wire ropes [Feyrer2011]:

$$\lg N = a_0 + \left(a_1 + a_3 \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \lg \frac{R_0}{1770} \right) + a_2 \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_i \quad (1)$$

For the consideration of different characteristics of the rope itself or of the rope drive, so-called endurance factors can be taken into account [Feyrer2007]. Up to now, the up-twisted or untwisted state of a wire rope could not be considered in the lifetime prediction of running ropes.

The up or untwisting of wire ropes have various causes. Due to intensive research in this field, the reasons for rope twisting are well known and its occurrence has been described in detail (e.g. [Engel1958], [Rebel1997], [Chaplin2000], [Verreet2001], [Oplatka2004] u. [Feyrer2007]). According to the named references, the main causes of rope twist are:

- height-stress
- side deflection
- torsional interactions
- mounting/installation

Whereas twist caused by the mounting of the rope depends heavily on the accuracy of the manual work (not including height-stress or torsional interactions during installation), twist caused by the first three named points depends on the rope itself and its application. Due to the structure of round stranded wire ropes, an axial load provokes a torque around the rope axis. The torque gradient depending on the axial load differs by rope construction (e.g. [Feyrer2007]). A connection in a series of components with different torque characteristics will show rotation under load, which is called torsional interaction ([Chaplin2000] and [Hobbs2013]).

Side deflection describes the motion of a rope onto or off of a sheave in an angular direction, which is illustrated in figure 1.

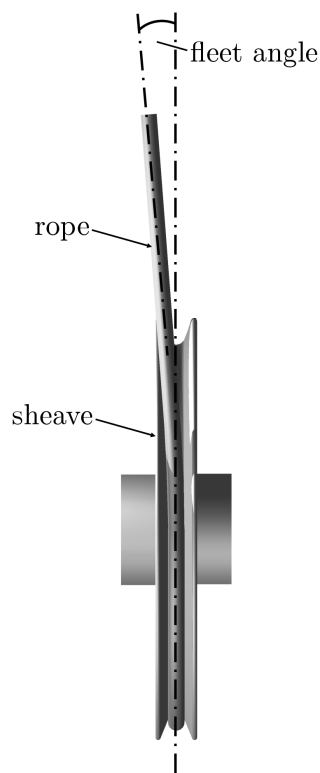


Figure 1: Side deflection of a running rope

The fleet angle is given between each axis of symmetry of the rope and the sheave. In many cases, for example in reeving systems, side deflection of the rope is necessary because of design characteristics (e.g. [Weber2013]). If a wire rope runs on a sheave under a certain fleet angle, it will first make contact with the sheave flange. From there it will move to the bottom of the groove in a combined movement of sliding and revolving [Schoenherr2005]. The revolving motion causes a rotation and therewith twisting of the running rope.

In rope drives with large differences in height, like hoisting plants, the first named

reason of rope twist occurs (e.g. [Rebel1997], [Chaplin2000] and [Feyrer2007]). At the lower level of the mine shaft, only the payload of the conveyor appears as a tensile load on the rope. At the top of the system, a higher tensile force occurs by the additional rope weight itself, which must be considered. Under the circumstance of two rotation-resistant ends, a homogeneous torque occurs, resulting in the rope twisting differently along its length. In the upper area, the rope untwists while in the lower area the rope uptwists. Figure 2 shows the twist angle of the rope as a function of height.

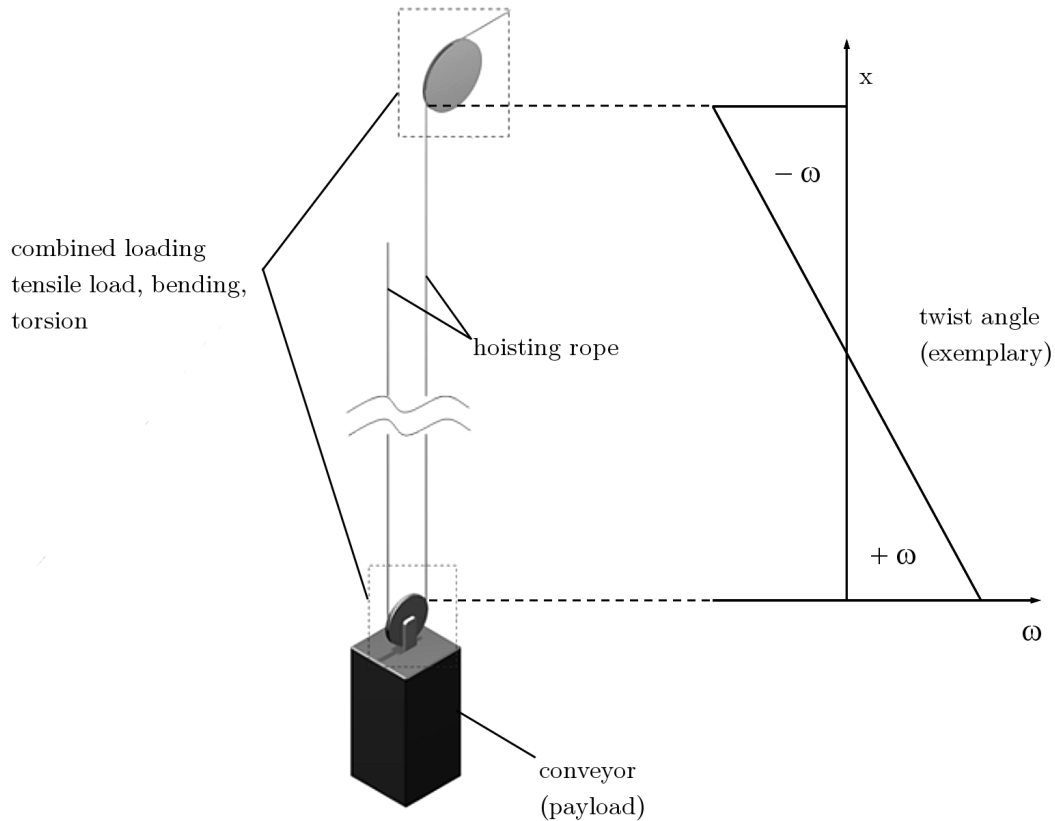


Figure 2: Schematic illustration of rope twist caused by height-stress

The reason given for rope twist is called height-stress [Feyrer2007]. In its twisted state, a movement such as lifting causes a combined load on the rope while running over a sheave. In addition to the tensile load and the bending of the rope, a torsional load exists, as shown in figure 2.

The focus of existing investigations in the field of combined loading (tensile load, bending and twist), has thus far been placed on free spinning rope ends ([Dreher1933], [Thieme1937] u. [Mannitz1958]). Furthermore a lifetime prediction under a certain rope twist is not available.

As shown above, it is known that combined tensile, bending and torque loads occur, but these causes' influences on rope life have not yet been thoroughly investigated.

This makes a systematic investigation necessary. The present work shows the causes of rope twist in detail and describes the tests on bending machines which have been made during the corresponding research project (funded by the German Research Foundation DFG). Furthermore the investigation of wire breaks as a discard criterion, microscopic analyse and the influence of twist on the lay length¹ are part of this research project. With a regression analysis of the bending test results, a mathematical equation is determined which can be integrated into Feyrer's internationally renowned lifetime prediction formula (equation (1)).

Bending Tests

In the corresponding research project mentioned above, four different rope constructions were tested:

- 8x19W-FC sZ
- 8x19W-IWRC sZ
- 6x36WS-IWRC sZ
- 35(W)x7 sZ

The rope construction 6x36WS-IWRC sZ was tested with two different rope diameters ($d = 12\text{ mm}$ and $d = 16\text{ mm}$) and all other ropes with a nominal diameter of $d = 12\text{ mm}$. Figure 3 shows the parameter configuration for one rope construction and one rope diameter.

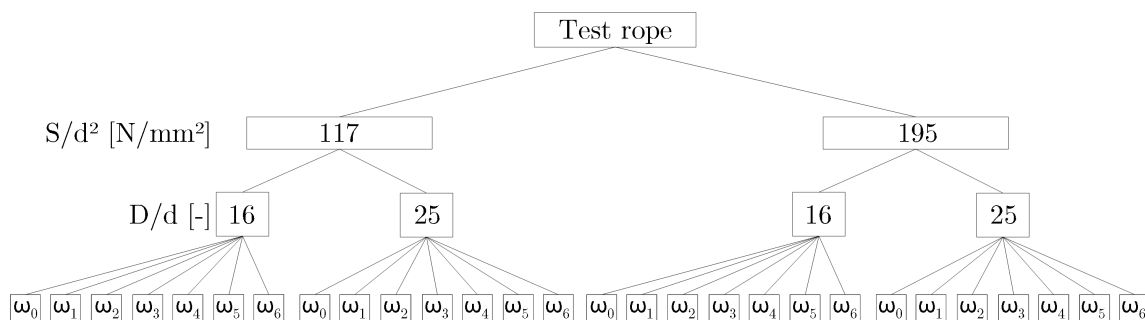


Figure 3: Test matrix

¹The experimental investigations of the influence of twist on the lay length were carried out in a research project-related bachelor's thesis [Herrmann2011], which was supported and supervised by the author.

In consideration of preliminary investigations, the parameter twist angle differs between wire ropes with one strand layer and the multi-strand rope ([Weber2010]). The tested twist angles of ropes with one strand layer are:

- $\omega = 0^\circ/100d$
- $\omega = \pm 360^\circ/100d$
- $\omega = \pm 720^\circ/100d$
- $\omega = \pm 1080^\circ/100d$

And for the multi-strand rope:

- $\omega = 0^\circ/100d$
- $\omega = \pm 45^\circ/100d$
- $\omega = \pm 90^\circ/100d$
- $\omega = \pm 180^\circ/100d$

To twist ropes on bending machines, a special application was designed and manufactured ([Hecht2011]). Figure 4 shows the test configuration of the bending tests.

The twist device (marked in figure 4 with an A) is mounted on the top of the deflection sheave (B) and, under consideration of the moment of inertia, a balance weight is mounted on the opposite side (C). Both ends of the test rope (D) are mounted on the twist application while running over the test sheave (E). Two different construction types of bending machines with the same test principle were used in the laboratory of the IFT (Institute of Mechanical Handling and Logistics) at the University of Stuttgart. The test principle of the implemented bending machines has been validated by decades of testing.

Findings and Conclusions

As a result of the systematic bending tests with and without twisting the rope, the influence of a constant twist of the rope in both directions, untwisted and uptwisted, is worked out for certain rope constructions. With the test results and a regression analysis, the following polynomial P_ω was found by the author, which for the first time allows consideration of twist in lifetime prediction. The determined polynomial P_ω in addition to Feyrer's lifetime formula ([Feyrer2011]) is:

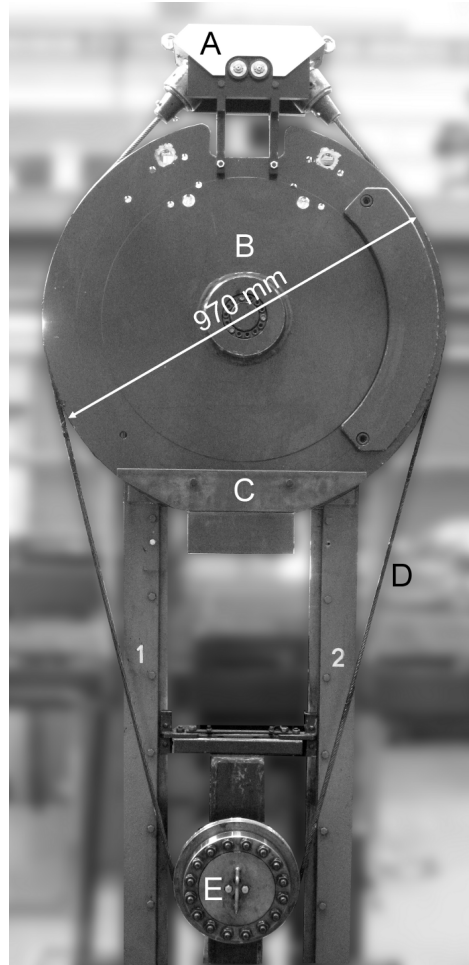


Figure 4: Bending machine with twist application

$$\begin{aligned}
 \lg N_{\omega} = & a_0 + \left(a_1 + a_3 \cdot \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} \right) + a_2 \cdot \lg \frac{D}{d} \\
 & + \lg f_d + \lg f_l + b_0 \cdot \omega + b_1 \cdot \omega^2 \cdot \underbrace{\left(\frac{S}{d^2} \frac{d_0^2}{S_0} \right)}_{P_{\omega}} + b_2 \cdot \omega^3 \cdot \frac{D}{d} \quad (2)
 \end{aligned}$$

The constants a_i for the well-known lifetime formula of Feyrer can be found in [Feyrer2011] for different rope constructions. The constants (b_0 to b_2) for the investigated rope constructions are given in table 5.4 on page 111. The determined equation enables the consideration of the influence of rope twist with good precision for the first time.

The illustrated lines in the logarithmic diagram in figure 5 show the influence of the different parameters twist angle ω , diameter-related force S/d^2 and bending ratio D/d . The influence of the diameter-related force S/d^2 under a certain twist angle ω and a certain bending ratio D/d is illustrated with A, while the influence of the twist angle ω

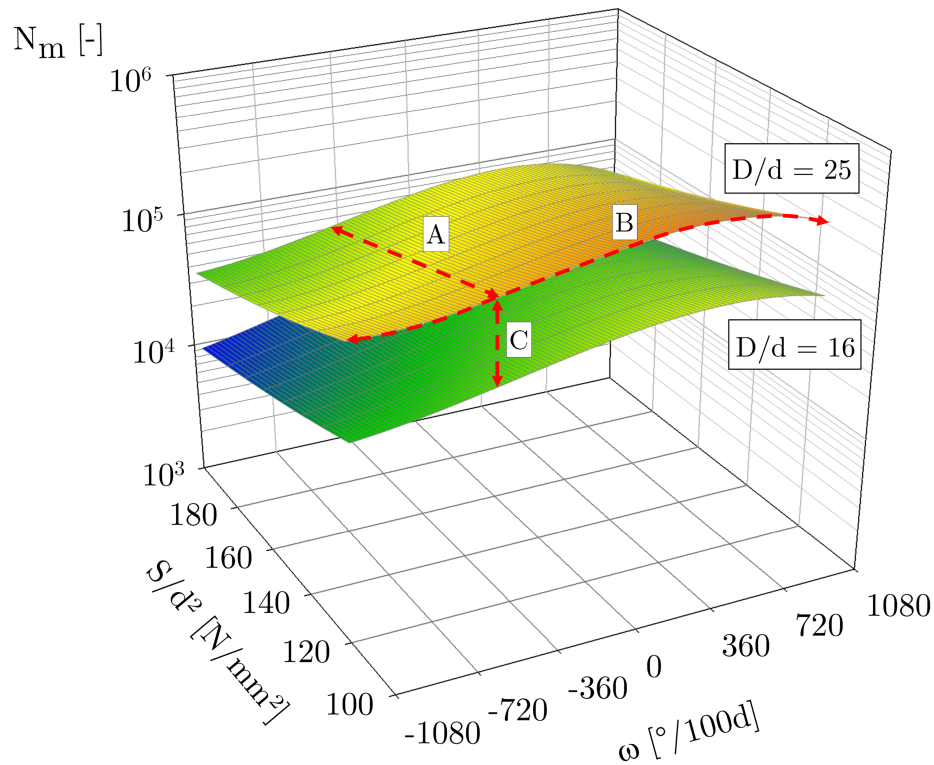


Figure 5: Rope lifetime of an 8x19W-IWRC sZ rope construction with $d = 12 \text{ mm}$ under the influence rope twist

is illustrated with the curve marked B. The influence of the bending ratio D/d on the rope lifetime under a constant load and a constant twist angle is illustrated by C.

Figures 6 through 8 show the respective percentage changes in the lifetime N_m in correlation to the twist angle ω . The reference value is the corresponding lifetime without twist under consideration of the respective load.

Rope construction 8x19W-FC (figure 6) shows a relatively flat course in the area of negative twist angles ($\omega < 0$; untwist), meaning, that the influence of the untwisting on the investigated rope is lower than in the opposite twist direction. The lifetime decreases in an uptwisted state. With an increasing angle of twist, the lifetime decreases more. Another behaviour shows the rope construction 8x19W-IWRC, in which the rope lifetime decreases in an untwisted state but first increases in the uptwist direction (see figure 7). With increasing twist angle, the lifetime of the investigated rope construction starts to decrease after exceeding a certain twist angle. On the contrary the rope construction 6x36WS-IWRC shows a maximum lifetime in an untwisted state in a certain area (see figure 8). By exceeding this area of twist angle the rope lifetime decreases rapidly. In the uptwist direction, the lifetime decreases with increasing twist angle.

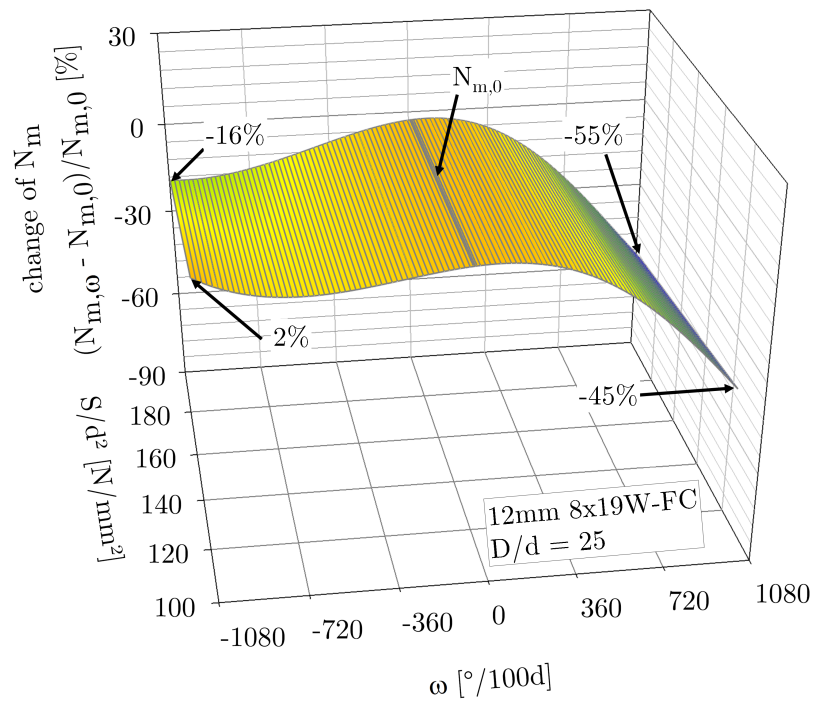


Figure 6: Percentage change of the rope lifetime under the influence of twist; 12 mm 8x19W-FC sZ

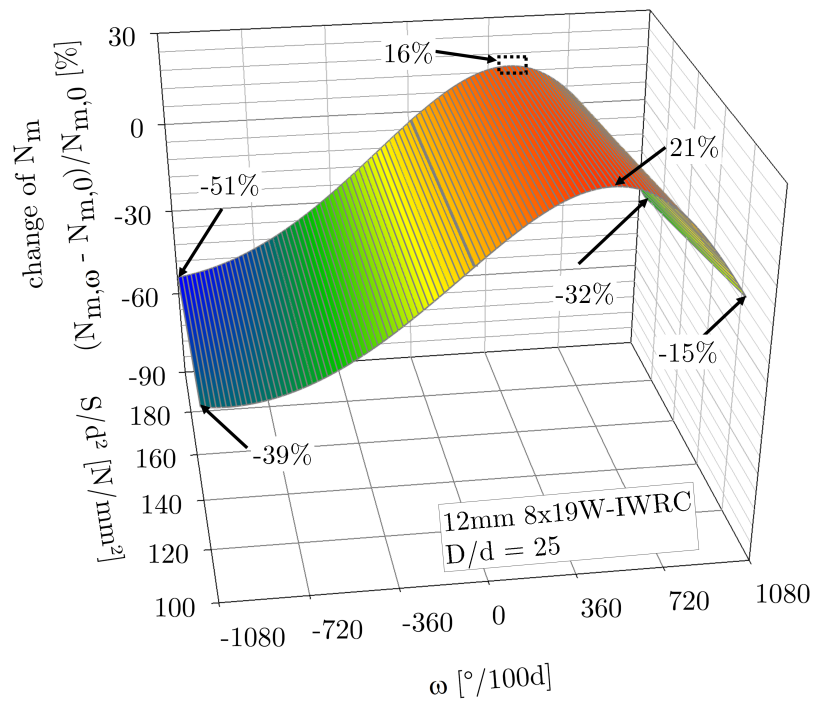


Figure 7: Percentage change of the rope lifetime under the influence of twist; 12 mm 8x19W-IWRC sZ

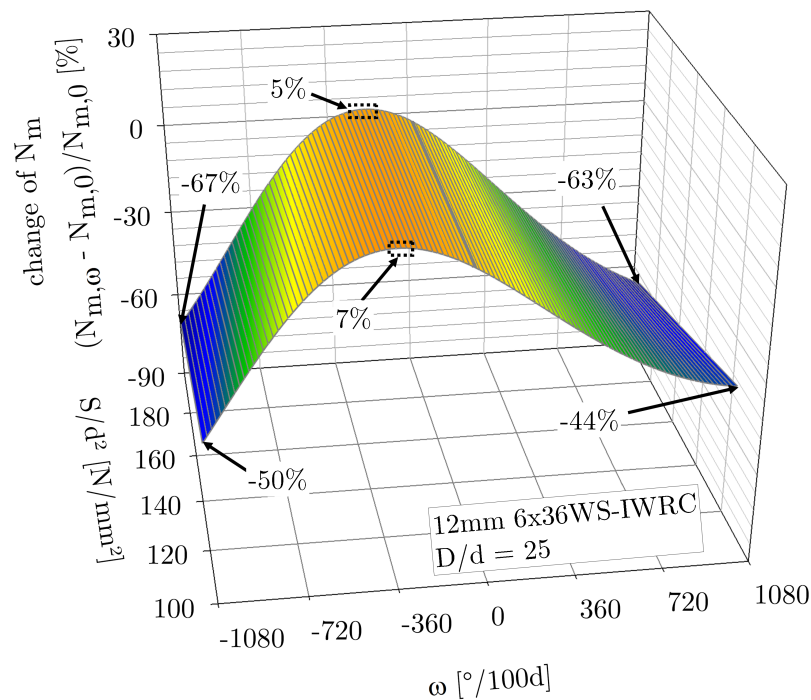


Figure 8: Percentage change of the rope lifetime under the influence of twist; 12 mm 6x36WS-IWRC sZ

As evidenced in figures 6 through 8, the influence of the twist angle is related to the rope force. The negative influence of twist on the rope lifetime increases with a higher rope force (S/d^2).

The influence on a multi-strand rope is larger than that exerted on the investigated single layer strand ropes. Figure 9 shows the calculated lifetime of the rope construction 6x36WS-IWRC sZ in comparison of the multi-strand rope construction 35(W)x7 sZ.

At a twist angle of $\omega = \pm 180^\circ/100d$ and a diameter-related rope force of $S/d^2 = 195 \text{ N/mm}^2$ the lifetime of the multi-strand rope decreases by -73% , while the lifetime of the one strand layer rope first increases under untwisting.

The bending tests with systematic parameter variation, the theoretical investigations, as well as the microscopic analyse showed that, as with lifetime prediction in a non-twisted state ([Feyrer2000]), the influence of twist is not predictable through theoretical consideration exclusively. The influence of twist is subject to:

- contact conditions of the outer strands among themselves and between the outer strands and the rope core
- pressure at the contact points inside the rope

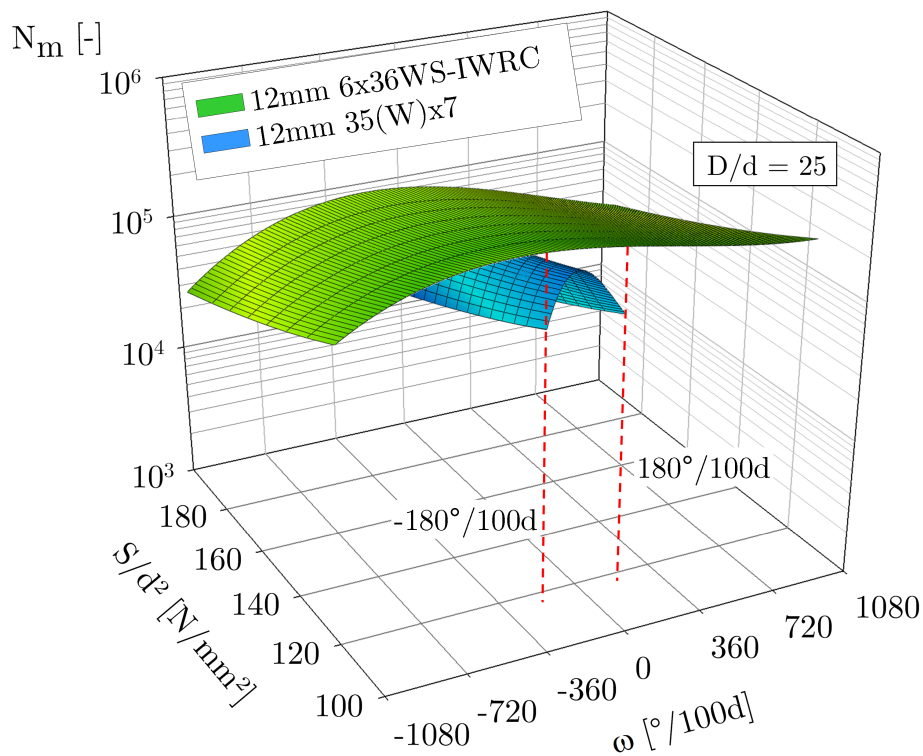


Figure 9: Comparison of lifetime curves under a constant bending ration of $D/d = 25$

- load rearrangements caused by the change of length of the wire or strand layers in the direction of the rope axis
- additional bending and torsion stress in the wires caused by twisting

In addition, production-related tolerances and inaccuracies can cause a heterogeneous stress distribution, which complicates exclusively theoretical analysis ([Ziegler2007]).

With the present work, the influence of twist on the lifetime of running ropes can be determined mathematically for the first time. Through regression analysis, the determined polynomial supplements Feyrer's world-renowned lifetime prediction formula, which hasn't considered twisting before ([Feyrer2011]). Causes for rope twist and their mathematical descriptions are identified with references their respective to sources. In combination with the determined formula, the calculated twist and its influence on the rope lifetime can now be considered in the layout design of rope drives. Furthermore an equation was determined in order to calculate the twist angle under consideration of the change of lay length for the investigated one strand layer ropes with a diameter of $d = 12$ mm (equation (5.12) on page 142). Combined with the described methods for lay length measurement (e.g. in [Briem1996], [Oplatka1999], [Ridge2001] u. [Vallan2009]), an evaluation of the twist angle of ropes in use and their lifetime prediction under consideration of the resulting twist influence is possible.

1 Einleitung

Der Aufbau eines Drahtseils² besteht im Wesentlichen aus der wendelförmigen Verseilung einzelner Drähte, die bei einer sogenannten einfachen Verseilung um einen Kern in Seillängsrichtung geschlagen³ werden. Die Wendelbahnen der verseilten Drähte beschreiben bei einer einfachen Verseilung eine einfache Helix. Werden die Drähte zwei- oder dreifach verseilt, beschreiben die Wendelbahnen der Außendrähte eine doppelte bzw. dreifache Helix (z. B. [Jenner1992]).

Die verseilten Drähte können sich durch den wendelförmigen Seilaufbau relativ zueinander bewegen und ermöglichen somit, dass ein Drahtseil in Abhängigkeit seines Aufbaus eine im Bezug zum metallischen Querschnitt relativ geringe Biegesteifigkeit aufweist.

Drahtseile zeichnen sich durch relativ hohe Festigkeiten aus, die sich aus den Einzelfestigkeiten der verseilten Drähte zusammensetzen. Die Festigkeiten der für ein Drahtseil verwendeten Stahldrähte werden durch Kaltverformung erreicht (vgl. [Feyrer2000]).

Die Eigenschaften von Drahtseilen ermöglichen ein breitgefächertes Anwendungsspektrum. Nach Wehking et al. können der Verwendungszweck und die Konstruktionsmerkmale der zur Anwendung kommenden Drahtseile für eine Einteilung herangezogen werden [Wehking2005]. Demnach wird in Anlehnung an [VDI2358:2010] unterschieden in:

- Laufende Seile
- Stehende Seile
- Tragseile
- Anschlagseile

Laufende Seile unterscheiden sich zu den anderen Einteilungsarten wesentlich in ihrer Bewegungsform in Seillängsrichtung. Beim Lauf über Seilscheiben oder dem Aufwickeln

²Die Bezeichnung Drahtseil bezieht sich in dieser Arbeit ausschließlich auf Rundseile, die nicht geflochten sind (Definitionen und Begriffe siehe [Feyrer2000]).

³Der Begriff Schlagen ist in der Seiltechnologie ein Synonym für das Verseilen [VDI2358:2010].

auf eine Winde erfahren die laufenden Seile u. a. eine zur Zugbelastung zusätzliche Biegebelastung. Die primären mechanischen Spannungen, die dabei an den Drähten auftreten, sind Zug-, Biege- und Torsionsspannungen [Wang1990].

Aufgrund der zentralen Bedeutung, die einem Drahtseil in einer fördertechnischen Anlage zukommt, ist eine Auslegung des Seils und des Seiltriebes hinsichtlich der Seillebensdauer von Interesse [VDI2358:2010]. Selbst durch eine exakte Kenntnis über die anliegenden Drahtspannungen kann eine ausschließlich theoretische Berechnung die Seillebensdauer nicht entsprechend abbilden, da die Drähte innerhalb ihrer Bewegungen relativ zueinander einem abrasiven Verschleiß ausgesetzt sind [Feyrer2000]. Die zuverlässige Bestimmung der Seillebensdauer kann daher bis heute ausschließlich anhand von Versuchen erfolgen, die den Belastungsvorgang beim Lauf des Seils über eine Seilscheibe abbilden.

Dauerbiegeversuche ermöglichen die realitätsnahe Abbildung der grundlegenden Belastungsformen beim Lauf eines Seils über eine Scheibe (siehe Abbildung 1.1).

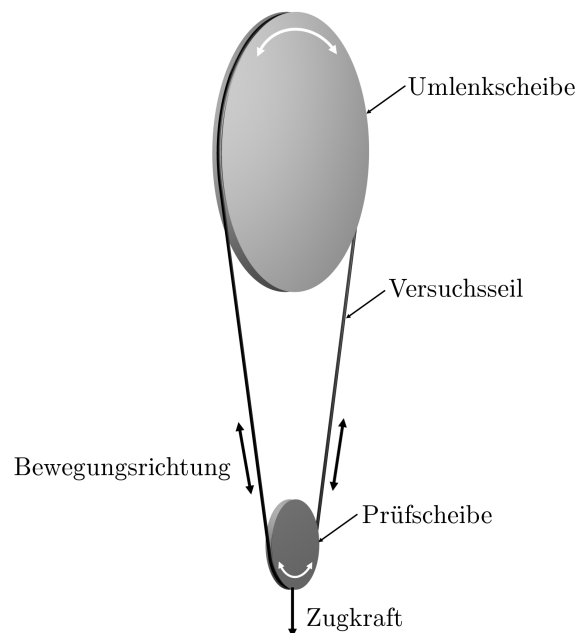


Abbildung 1.1: Prinzipdarstellung eines Dauerbiegeversuchs in Anlehnung an [Feyrer2000]

Das Prüfseil läuft dabei in einer durch die Umlenkscheibe eingebrachten Bewegung auf die Prüfscheibe auf und von ihr ab. Durch die Erfassung der Biegewechsel, bei der das Seil aus einem geraden in einen gebogenen und wieder in einen geraden Zustand überführt wird, kann der jeweilige Seilzustand in Bezug zur Summe der absolvierten Biegewechsel gesetzt werden.

Auf Grundlage einer experimentellen Datenbasis entwickelte Feyrer eine Berechnungsmethode zur Bestimmung der Seillebensdauer unter Berücksichtigung verschiedener Einflussparameter ([Feyrer2000] u. [Feyrer2011]). In verschiedenen Versuchsreihen wurden weitere Einflussparameter untersucht, die mittels sogenannter Biegegewchselfaktoren bei der Bestimmung der Lebensdauer von laufenden Drahtseilen nach der Berechnungsmethode von Feyrer Berücksichtigung finden (z. B. [Woernle1929], [Wolf1987], [Feyrer2000] u. [Schoenherr2005]).

1.1 Motivation

In der Anwendung können verschiedene Ursachen dazu führen, dass Drahtseile einen verdrehten Zustand aufweisen. Die Ursachen, die zu einer Verdrehung der im Betrieb befindlichen Drahtseile führen können, sind sowohl durch theoretische Überlegungen als auch durch Praxisbetrachtungen hinreichend bekannt (z. B. [Engel1958], [Rebel1997], [Chaplin2000], [Verreet2001], [Oplatka2004] u. [Feyrer2007]). Die in den aufgeführten Literaturstellen genannten Ursachen, die zu einer Seilverdrehung führen können, sind u. a.:

- Höhenspannung
- Schrägzug
- Torsionale Wechselwirkung unterschiedlicher Seilzugglieder
- Montage

Die genannten Ursachen zur Seilverdrehung sind im Wesentlichen von der Seilkonstruktion und der Anwendung abhängig. Dies gilt in analoger Weise für die Montage, bei der darüber hinaus die Handhabungssorgfalt eine zentrale Rolle spielt.

Aufgrund des helixartigen Aufbaus von Rundlitzenseilen erzeugen Drahtseile unter einer axialen Last ein Drehmoment um die Seillängsachse, dessen charakteristischer Verlauf in Abhängigkeit der Last konstruktionsspezifisch ist (u. a. [Feyrer2007]). Das Verbinden⁴ verschiedener Zugglieder, die unterschiedliche Verdrehcharakteristiken aufweisen, führt dazu, dass unter Last oder Eigengewicht eine Verdrehung der einzelnen Glieder (z. B. Drahtseil und Kette) stattfindet ([Chaplin2000] u. [Hobbs2013]). Diese gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Zugglieder kann als torsionale Wechselwirkung bezeichnet werden.

⁴Beispielhaft für die Anwendung von verbundenen Seilzuggliedern in Reihe stehen die sogenannten multicomponent Mooring Lines zur Verankerung von Offshoreplattformen.

Der Begriff Schrägzug bezeichnet das Auf- oder Ablaufen eines Seiles auf eine bzw. von einer Seilscheibe oder Trommel unter einem Ablenkungswinkel (vgl. [DIN-EN12385-3:2004]). Das versetzte Auf- bzw. Ablaufen eines Seiles ist in Abbildung 1.2 mit dem dazugehörigen Schrägzugwinkel dargestellt.

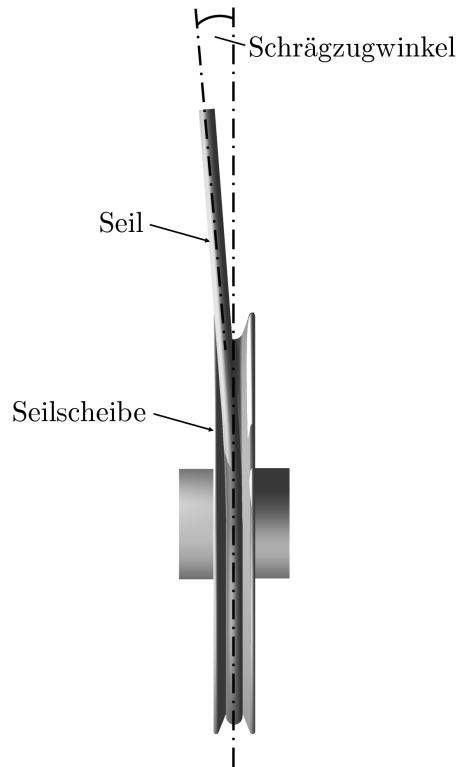


Abbildung 1.2: Darstellung des Schrägzugwinkels

In Seiltrieben kann eine versetzte Anordnung der Seilscheiben wie z. B. bei einer mehrfachen Einscherung im Kranbereich notwendig sein (vgl. [Weber2013]). Auch bei Winden führt die seitliche Bewegung des Seils während des Wickelvorgangs zu einem Ablenkwinkel zwischen Winde und feststehender vorgelagerter Seilscheibe (vgl. [DIN-EN12385-3:2004]).

Läuft ein Seil unter einem Schrägzugwinkel auf eine Scheibe auf, trifft es in Abhängigkeit der Scheibe und des Ablenkwinkels zunächst auf die Scheibenflanke. Ausgehend von der Stelle des Auftreffens führt das Seil eine Bewegung in Richtung Rillengrund der Scheibe durch (vgl. [DIN-EN12385-3:2004] u. [Schoenherr2005]). Diese Bewegungsform setzt sich aus einer Gleit- und einer Wälzbewegung zusammen. Die Wälzbewegung hat zur Folge, dass sich das Seil während der Bewegung Richtung Rillengrund dreht und sich dadurch relativ zu der drehsteifen Fixierung im Rillengrund verdreht.

Bei der Überwindung großer Höhendifferenzen⁵ wie z. B. bei sogenannten „high-rise“ Aufzügen (400m) oder bei Schachtförderanlagen (3000m) erfährt das eingesetzte Förderseil unter Berücksichtigung des Seileigengewichtes unterschiedliche Lastzustände entlang der Seilstrecke. Am unteren Ende der Seilstrecke liegt die Nutzlast an, während am oberen Ende der Seilstrecke die Nutzlast und das Eigengewicht des Seils anliegen. Die unterschiedlichen Lastzustände und die Ausbildung eines homogenen Drehmoments über die gesamte Seilstrecke führen zu unterschiedlichen Verdrehgraden pro Längeninkrement (vgl. [Feyrer2007] u. [Ernst2012]). Im oberen Bereich der Seilstrecke findet ein Aufdrehen statt, während sich das Seil im unteren Bereich definitionsgemäß⁶ zudreht.

Im Förderbetrieb läuft das durch die sogenannte „Höhenspannung“⁷ verdrehte Seil über Seilscheiben und erfährt dabei einen überlagerten Belastungszustand bestehend aus Zug, Biegung und Torsion. Je nach Anwendung können unterschiedliche Scheibenanordnungen vorliegen, die eine Seilumlenkung an der Schachtoberseite, am Fahrkorb oder die Aufwicklung auf eine Trommel vorsehen. Abbildung 1.3 veranschaulicht das Auftreten der Seilverdrehung durch „Höhenspannung“ bei einer beispielhaften Scheibenanordnung an der Schachtoberseite und am Fahrkorb.

Zur Betrachtung der Verdrehung von Drahtseilen durch Höhenspannung und dem daraus resultierenden Einfluss diskreter Verdrehungen auf die Lebensdauer stehender Seile, untersucht Ernst die ertragbare Schwingspielzahl verdrehter und unverdrehter Seile in Zugschwellversuchen [Ernst2012]. Die Lastaufbringung erfolgt dabei rein axial, wobei sich die wirkende Zugkraft in einem sinusförmigen Verlauf um die Mittellast bewegt. Diese Art der Belastung ist für die Betrachtung stehender Seile zulässig. Bei laufenden Seilen tritt zusätzlich zur axialen Zuglast eine Biegebelastung auf, die aus der erzwungenen Krümmung resultiert (vgl. [Schiffner1986]).

Wie aufgezeigt wurde, können unterschiedliche Ursachen zu einer Verdrehung der im Betrieb befindlichen Seile führen. Geometrische Betrachtungen lassen bei einer Verdrehung von Seilen u. a. auf eine Veränderung der mechanischen Spannungsverteilung zwischen den einzelnen Drähten schließen (z. B. [Dreher1933], [Haller1989] u. [Malinovsky2006]). Da es jedoch, wie oben beschrieben, nicht möglich ist, auf Basis rein theoretischer Betrachtungen auf die Seillebensdauer zu schließen, ist eine experimentelle Betrachtung des hier beschriebenen Belastungszustandes notwendig, um den Einfluss von Verdrehungen auf die Lebensdauer laufender Seile zu untersuchen.

⁵Die beispielhaften Höhenangaben dienen zur Einschätzung der in der Praxis vorkommenden Größen. Die Angaben beziehen sich auf [Vogel2009] und [Sindern2010].

⁶Auf die Begriffsdefinitionen wird in Kapitel 3.1 näher eingegangen.

⁷Der Begriff Höhenspannung wird in [Feyrer2000] verwendet und bezieht sich in dem hier betrachteten Fall auf die Seilverdrehung bei verdrehsteifer Fixierung beider Enden der Seilstrecke.

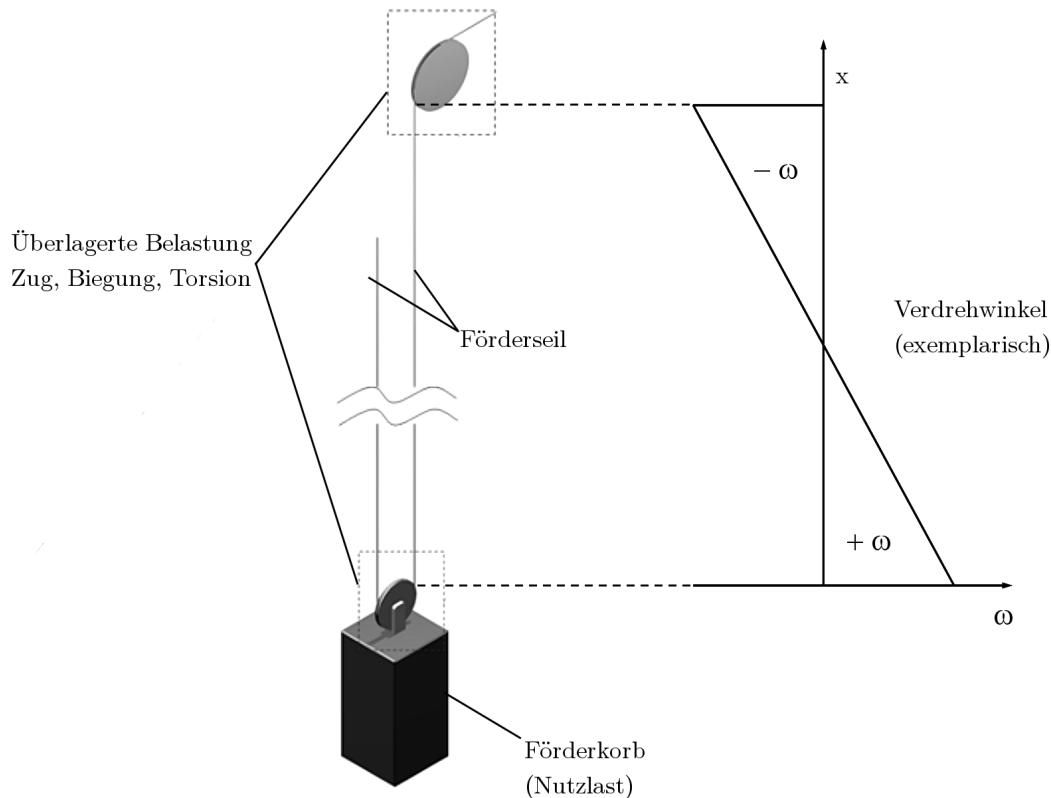


Abbildung 1.3: Beispielhafte Darstellung der Verdrehung eines Seils unter der Höhen-
spannung in einer praktischen Anwendung

Bisherige Untersuchungen im Bereich laufender Seile fokussieren sich auf die theoretische Betrachtung des Auftretens von Seilverdrehungen und deren mögliche Auswirkungen auf das Seilverhalten oder, wie in den Arbeiten von Thieme, Dreher und Mannitz, auf die experimentelle Untersuchung frei drehbarer und nicht frei drehbarer Seile ([Dreher1933], [Thieme1937] u. [Mannitz1958]). Die Versuche werden in den Arbeiten von Dreher und Thieme bis zu einer festgelegten Biegewechselzahl gefahren und anschließend geöffnet bzw. deren Restbruchkraft in einem Zugversuch ermittelt. Aussagen über die Seillebensdauer können aus den dargestellten Versuchsergebnissen nicht generiert werden.

Die Versuche von Mannitz wurden bis zum Bruch gefahren, wobei die Versuchsseile in Abhängigkeit ihres Drehbestrebens einer dynamischen Drehung unterworfen sind. In der dargestellten Versuchsanordnung drehen sich die Versuchsseile –sofern sie ein Drehbestreben besitzen– beim Heben der Versuchslast auf und beim Absetzen der Versuchslast zu [Mannitz1958]. Die wechselnde Drehung stellt dabei eine zusätzliche Ermüdungsbeanspruchung für die Seile bzw. die Drähte dar. Bei den drehungsarmen Seilkonstruktionen wurde kein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der ertragbaren Biegewechselzahl festgestellt, während sich bei den nicht drehungsfreien Seilen die

ertragbare Biegewechselzahl durch das freie Drehen reduzierte [Mannitz1958]. Das Vermeiden einer frei drehenden Aufhängung nicht drehungsfreier bzw. -armer Seile ist normativ erfasst (vgl. [DIN15020:1974]).

Wie oben bereits dargestellt wurde, können Seilverdrehungen auftreten, obwohl keine freie Drehung des Seilendes möglich ist. Aufgrund dessen und des noch unbekanntem Einflusses diskreter Verdrehungen auf die Lebensdauer laufender Drahtseile, wurde am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart durch den Autor ein Forschungsprojekt generiert. Das Forschungsprojekt⁸, welches die Grundlage für die vorliegende Arbeit bildet, wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) über die Projektlaufzeit gefördert.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Wie eingangs beschrieben, ist es bisher nicht möglich, den Einfluss von Verdrehungen auf die Lebensdauer laufender Drahtseile rechnerisch zu bestimmen, obwohl die Ursachen und das Auftreten in der Anwendung bekannt sind. Dieser sicherheitstechnische und im Sinne der Optimierung ökonomisch relevante Umstand erfordert eine grundlegende und systematische Untersuchung des Einflusses und dessen theoretische Abbildung. Die Förderung des hier beschriebenen Forschungsprojektes durch die DFG unterstreicht die Relevanz dieser Thematik sowohl für die Wissenschaft und Forschung als auch für die praxisnahe Anwendung.

Die rechnerische Bestimmung der Seillebensdauer unter dem Einfluss diskreter Verdrehwinkel richtet sich im Hinblick auf die internationale Akzeptanz und der weltweiten Anwendung nach der Lebensdauerformel von Feyrer, die bereits eine Vielzahl an Einflüssen abbildet und durch die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit erstmals die Berücksichtigung der Seilverdrehung ermöglicht (vgl. [Feyrer2007] bzw. [Feyrer2011]).

Die Zielsetzung des in der vorliegenden Arbeit behandelten Forschungsprojektes zur Untersuchung des Einflusses von Verdrehungen auf die Lebensdauer laufender Drahtseile, lässt sich im Wesentlichen mit den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Grundlegende Darstellung verschiedener Ursachen, die zu einer Verdrehung der im Betrieb befindlichen Seile führen können

⁸Projekttitel: Einfluss kombinierter Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchung auf die Lebensdauer und Ablegereife laufender Drahtseile; Förderzeitraum: 01.06.2010 - 31.05.2012; DFG-Geschäftszeichen: WE 2187/24-1.

- Theoretische Betrachtung unterschiedlicher Auswirkungen einer Verdrehung auf die unmittelbar im geometrischen Bezug der Seilkonstruktion stehenden Zusammenhänge
- Erarbeitung einer Versuchsdatenbasis auf Grundlage systematischer Versuchsreihen, die durch gezielte Parametervariation Untersuchungen von unterschiedlichen Einflüssen im Zusammenhang mit der Verdrehung ermöglichen
- Betrachtung der Versuchsergebnisse mittels Regressionsanalyse zur analytischen Beschreibung der Seillebensdauer unter dem Einfluss der Verdrehung und der Bestimmung eines Biegewechselfaktors f_{Ni} für die Berechnung der Seillebensdauer nach [Feyrer2011]
- Untersuchung des Verhaltens hinsichtlich des Ablegekriteriums Drahtbruchzahl unter dem Einfluss der Verdrehung
- Verknüpfung der Erkenntnisse aus der Forschungsarbeit mit der Praxis

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, den noch unbekanntem Einfluss von Verdrehungen auf laufende Drahtseile systematisch zu untersuchen. Dazu ist es aufgrund der bereits bestehenden Erkenntnisse zur Untersuchung von Drahtseilen hinsichtlich des Lebensdauerungsverhaltens erforderlich, experimentelle Versuche durchzuführen (vgl. [Feyrer2000]). Durch die Abbildung verdrehter Seilzustände innerhalb von Dauerbiegeversuchen und die Durchführung systematischer Versuchsreihen, soll eine Datenbasis geschaffen werden, die zum Aufstellen eines Lebensdauermodells mittels Regressionsanalyse dient. Durch die Anpassung des ermittelten Lebensdauermodells an die Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Lebensdauer laufender Drahtseile nach Feyrer [Feyrer2011], werden die Ergebnisse mit einem weiteren und damit neuen Biegewechselfaktor f_{Ni} der Anwendung zugänglich gemacht.

2 Stand der Forschung

2.1 Konstruktionsarten von Drahtseilen und deren Klassifizierung hinsichtlich Verdrehung

Drahtseile generieren durch ihren Aufbau unter axialer Zugbelastung ein Drehmoment. Je nach Wendelrichtung der Drähte bzw. der Litzen wirkt die Drehmomentrichtung. Sind Drahtseile in ihrem Aufbau immer in die gleiche Richtung verseilt, wirkt auch das auftretende Drehmoment in eine Richtung. Sind Drahtseile in ihrem Aufbau in unterschiedliche Schlagrichtungen verseilt, existieren zwei Wirkrichtungen der auftretenden Drehmomente. Unterschiedliche Schlagrichtungen der Litzen können nur bei mehrlagigen Litzenseilen erreicht werden. Litzenseile mit einer Litzenlage besitzen ausgehend von ihrer Litzenschlagrichtung eine Drehrichtung. Bei mehrlagigen Litzenseilen kann analog zum einlagigen Litzenseil eine Zuordnung der Drehrichtung der jeweiligen Litzenlage in Abhängigkeit der Schlagrichtung vorgenommen werden. Das theoretisch resultierende Gesamtmoment ist die Summe der Einzelmomente der Litzenlagen, die sich über den Materialanteil und den dazugehörigen Hebelarm definieren.

Das Prinzip der gegenläufigen Verseilung und die dabei entstehende Wirkrichtung der Drehmomente wurde bereits dargestellt [Weber2010]. Abbildung 2.1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Schlagrichtung der Litzen und der jeweiligen Wirkrichtung des auftretenden Drehmoments (Pfeile rot/blau) bei einem zweilagigen Drahtseil.

Die Einteilung von Drahtseilen hinsichtlich ihres Drehverhaltens nach Verreet u. Ridge [Verreet2001], spiegelt die in der Praxis gängige Klassifizierung wider (vgl. [DIN15020:1974] u. [Feyrer2000]). Folgende Einteilung wird dabei vorgenommen:

- Nicht drehungsfreie bzw. -arme Seile
- Drehungsarme Seile
- Drehungsfreie Seile

Die Zuordnung von Seilkonstruktionen zu den jeweiligen Klassen wird nicht einheitlich vorgenommen. So wird nach der DIN EN 12385-2 [DIN-EN12385-2:2002] lediglich eine Zuordnung von Drehungsarmut für bestimmte Seilkonstruktionen (z. B. mehrlagige

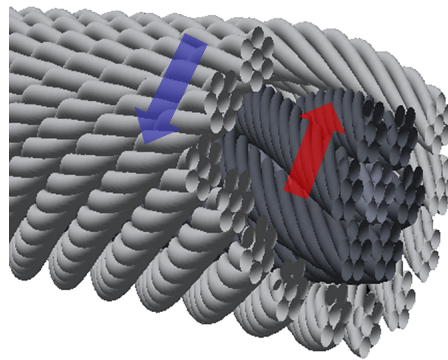


Abbildung 2.1: Prinzip der gegenläufigen Verseilung [Weber2010]

Litzenseile) vorgenommen. Um eine einheitliche Zuordnung zu erhalten, schlägt Verreet [Verreet2000] vor, den Verdrehwinkel der jeweiligen Seilkonstruktion unter einer axialen Last von 10 % der Seilmindestbruchkraft zu messen. Je nach Größe des Verdrehwinkels ist die Einteilung in die oben aufgezählten Kategorien vorzunehmen. Feyrer schlägt zur Klassifikation ein ähnliches Verfahren vor, wobei jedoch der Drehwinkel über einen fest definierten Lastbereich (bezogen auf den Seildurchmesser) gemessen wird [Feyrer2000]. Der maximal erreichte Drehwinkel wird zur Klassifizierung herangezogen. Dabei gilt nach Feyrer [Feyrer2000] ein Seil als drehungsfrei, wenn bei einer Belastung von 0 N/mm^2 bis

$$\frac{S}{d^2} = 150 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (2.1)$$

eine längenbezogene maximale Verdrehung von

$$\frac{\varphi}{L} = \frac{360^\circ}{1000d} \quad (2.2)$$

nicht überschritten wird.

Der internationale Standard ISO 21669 [ISO21669:2005] bezieht sich nur indirekt auf die Klassifizierung von Drahtseilen. Vielmehr wird auf die Empfehlung zur Verwendung eines Wirbels innerhalb des Seiltriebs eingegangen, was wiederum mit den Empfehlungen zur Anwendung von Wirbeln bezüglich der einzelnen Seilklassen weitestgehend korreliert (vgl. [Verreet2001]). Zur Empfehlungseinteilung schlägt dieser Standard in Analogie zu den oben vorgestellten Empfehlungen von Feyrer und Verreet eine Belastung des zu messenden Seils von 20% der F_{min} vor. Anhand der auftretenden Drehung in Grad bezogen auf 1000d erfolgt die Empfehlungseinteilung, wobei die Klasse der drehungsarmen Seile eine Grauzone bei der Verwendung eines Wirbels bildet. Hier verweist der ISO-Standard auf Empfehlungen des Seilherstellers oder auf das Hinzuziehen von Fachleuten. Auf-

grund des Drehbestrebens und der daraus resultierenden inhomogenen Lastverteilung innerhalb des Seilverbandes⁹ weist Feyrer darauf hin, dass bei drehungsarmen Seilen keine Wirbel zu verwenden sind [Feyrer2000].

2.2 Drehmomentbestimmung von Drahtseilen

Bei der Drehmomentbestimmung von Drahtseilen lassen sich im Wesentlichen zwei Vorgehensweisen unterscheiden. Zum einen kann durch die geometrischen Größen einer Seilkonstruktion das Drehmoment zugehörig zu einer definierten Last berechnet werden. Zum anderen ist eine experimentelle Bestimmung möglich. Die Herangehensweise zur Bestimmung des Drehmoments mittels geometrischer Größen stößt an ihre Grenzen, sobald das Seil im Ausgangszustand bereits verdreht ist. Eine wirklichkeitsnahe Berechnung des Drehmoments bei bereits verdrehten Seilen ist rein analytisch nur bedingt möglich (vgl. [Feyrer1986]).

Zur Bestimmung des Drehmoments nach der Analytik und der Betrachtung der Seil- bzw. Litzengeometrie zeigt zunächst Heinrich einen Ansatz auf [Heinrich1942]. Ähnlich wie Heinrich bestimmen Costello und Sinha das Drehmoment unter vereinfachten Kontaktbedingungen durch Vernachlässigung der Querkontraktion und der inneren Reibung [Costello1977]. Feyrer formuliert seinen Ansatz der Drehmomentbestimmung mit [Feyrer2000]:

$$M_0 = c_{1L} S d_L \quad (2.3)$$

Die Konstante c kann sowohl für Spiralseile oder Litzen (c_{1L}) als auch für ein- und mehrlagige Rundlitzenseile (c_1) berechnet werden.

$$c_{1L} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i r_i A_i \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i}{d_L \sum_{i=0}^n z_i A_i \cos^3 \alpha_i} \quad (2.4)$$

$$c_1 = \frac{\sum_{j=1}^n z_j A_j R_j \cos^2 \beta_j \sin \beta_j + \sum_{j=0}^n z_j A_j d_{Lj} c_{1Lj} \cos^3 \beta_j}{d \sum_{j=0}^n z_j A_j \cos^3 \beta_j} \quad (2.5)$$

⁹Drahtseile mit einem helixartigen Aufbau, entwickeln unter axial anliegender Last ein von der Seilkonstruktion abhängiges Drehmoment (vgl. [Feyrer2000]). Verfügen drehungsarme Seile an einem Ende über einen rotatorischen Freiheitsgrad um die Seilachse, resultiert dies unter einem auftretenden Drehmoment in einer Drehung. Die Drehung des Seilendes führt vor dem Hintergrund der geometrischen Zusammenhänge innerhalb des Seilaufbaus zu einer ungleichmäßigen Längung der Drähte bzw. Litzen und somit zu einer Lastumverteilung (vgl. [Feyrer2007] u. Kapitel 3.5).

Wie einleitend beschrieben, ist die Bestimmung des Seildrehmoments von bereits verdrehten Seilen unter Zugbeanspruchung rein analytisch nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich und kann daher nur durch Unterstützung von Versuchen ermittelt werden. Feyrer und Schiffner sowie Chaplin et al. untersuchten den Zusammenhang zwischen Zugkraft und Drehmoment verdrehter und unverdrehter Drahtseile in experimentellen Versuchen ([Feyrer1986] u. [Chaplin2000]). Unter Berücksichtigung der Verdrehwinkel im Ausgangspunkt, erweitern Feyrer und Schiffner [Feyrer1986] die Gleichung 2.3 zu:

$$M = c_1 d S + c_2 d^2 S \omega + c_3 G d^4 \omega \quad (2.6)$$

In Abhängigkeit der Seil- bzw. Litzenkonstruktion sind die Konstanten c_1 bis c_3 experimentell zu bestimmen. Für gängige Seilkonstruktionen liegen Werte für die Konstanten c_1 bis c_3 vor [Feyrer2000].

Zur Bestimmung der Konstanten c_1 bis c_3 sind Versuche notwendig, bei denen das zu untersuchende Drahtseil in eine Drehmomentmessvorrichtung eingespannt wird, wie sie in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Die Seilenden sind dabei fixiert.

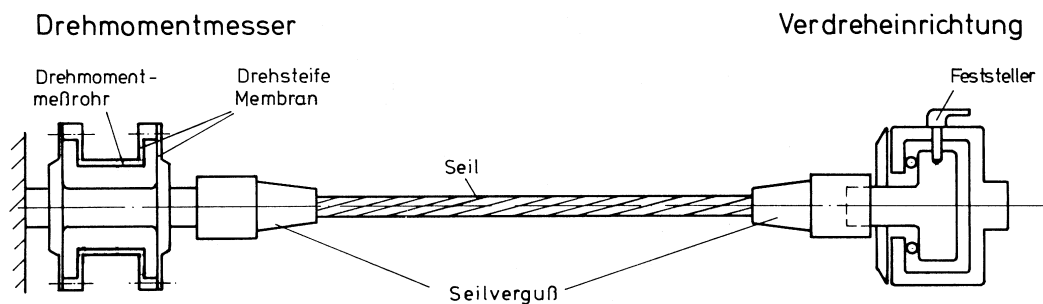


Abbildung 2.2: Drehmomentmesseinrichtung [Feyrer1986]

Die Vorrichtung befindet sich bei der Versuchsdurchführung in einer Axial-Zugmaschine montiert, mit der die erforderliche Zugkraft aufgebracht wird. Durch die Verdrehmöglichkeit der rechten Seite kann ein diskreter Winkel vor Versuchsbeginn aufgebracht werden. Dies ist insbesondere zur Ermittlung der Konstanten c_2 und c_3 erforderlich. Mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) auf dem Messglied und der entstehenden Verwindung der Messachse kann das anliegende Drehmoment ermittelt werden. Anhand der gemessenen Drehmomentkennlinien und der analytischen Vorgehensweise von Feyrer und Schiffner [Feyrer1986] können die Konstanten c_2 und c_3 sowie mit Gleichung (2.6) das entstehende Drehmoment eines zuvor verdrehten Seiles bestimmt werden.

Die Drehsteifigkeit D^* von Drahtseilen beschreibt das Verhältnis der Differenzen des Drehmoments ΔM und des Verdrehwinkels ω (vgl. [Engel1966] u. [Schoenherr2005]). Mit der Gleichung (2.6) kann die Drehsteifigkeit D^* in Abhängigkeit der Konstanten c_2

und c_3 berechnet werden. Die Drehsteifigkeit ergibt sich rechnerisch zu:

$$D^* = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M - M_0}{\omega}. \quad (2.7)$$

2.3 Lebensdauerbestimmung von laufenden Drahtseilen

In Abhängigkeit des Aufbaus von Drahtseilen bestehen eine Vielzahl an Kontaktstellen der Drähte untereinander. Werden Drahtseile gebogen, verschieben sich die einzelnen Drähte relativ zueinander, wie z. B. beim Lauf über eine Seilscheibe (vgl. [Schiffner1986], [Papailiou1995] u. [Vogel2003]). An den Kontaktstellen führt die auftretende Relativbewegung zu einem Verschleiß an den Drahtoberflächen (vgl. [Schiffner1986] u. [Wang1990]). Selbst wenn die durch Zug und wechselnde Biegung entstehenden mechanischen Drahtspannungen im Dauerfestigkeitsbereich liegen, führt der auftretende Verschleiß zu einer Schwächung der Drähte und schließlich zum Versagen. Zusätzlich zu dem im Seilinneren stattfindenden Verschleiß an den Kontaktstellen der Drähte, können die Außendrähte eines Drahtseils beim Lauf über eine Scheibe einen Verschleiß an ihrer Oberfläche erfahren.

Drahtseile unterliegen zudem komplexen Zuständen, wie z. B. der Spannungsverteilung oder der Kontakt- bzw. Pressungsverhältnisse, deren Auswirkungen sich mit der Nutzungszeit, durch z.B. Drahtbrüche oder Verschleiß an den Drahtoberflächen, verändern können. Eine eindeutige Bestimmung des Kräfteverlaufs bzw. der Kräfteverteilung über die gesamte Lebensdauer ist bisher nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Die Analytik zur Spannungsberechnung von Drähten im Seil ist derzeit lediglich auf einen sequenziellen temporären Idealzustand unter gewissen Vereinfachungen anwendbar. Selbst bei Kenntnis über die gesamte Spannungsverteilung im Seil, ist eine Lebensdaueraussage basierend allein auf dieser Größe nicht möglich [Feyrer2000].

Mit zunehmender Biegewechselzahl, steigt die Zahl von Drahtbrüchen im Seilverband (vgl. [Feyrer2000]). Jahne nennt als Ursache für das allmähliche Versagen der Drähte die schwingende Beanspruchung und den durch Relativbewegung entstehenden Verschleiß [Jahne1992]. Die entstandenen Drahtbrüche führen, so Jahne weiter, zu einer lokal begrenzten Lastumverteilung auf die noch intakten Drähte und damit zu einer höheren Belastung [Jahne1992].

Der Lauf eines Seils über eine Scheibe kann nach Wang in drei Zonen eingeteilt werden: die Auflaufzone, die gleichmäßige Biegezone und die Ablaufzone [Wang1990].

Jede Zone für sich betrachtet, hat unterschiedliche Einflüsse und Auswirkungen auf die unterschiedlichen Relativbewegungen und auf die Drahtspannungen. Schiffner und Wang untersuchten die Spannungszustände im Seil, die beim Lauf über eine Seilscheibe entstehen, zunächst analytisch und anschließend durch messtechnische Erfassung ([Schiffner1986] u. [Wang1990]). Die zur Spannungsmessung verwendeten Dehnungsmessstreifen ließen eine eindeutige Bestimmung der Drahtspannungen innerhalb des Seils jedoch nur erschwert zu. Zur Bestimmung der Drahtspannungen unter verschiedenen Belastungsarten wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode Simulationen an verschiedenen Seilkonstruktionen durchgeführt (z. B. [Eshkenazy2003], [Witt2007], [Ziegler2007] u. [Weis2013]). Der von Ziegler aufgestellte Ansatz zur theoretischen Berechnung der Lebensdauer zugschwellbelasteter Drahtseile basiert nach dessen Autor auf Annahmen, deren Überprüfung sowie die weiterführende experimentelle Analyse des Berechnungsmodells zunächst notwendig sind [Ziegler2007]. Eine Ableitung zur Lebensdauerberechnung von biegebelasteten Drahtseilen fand zudem nicht statt. Nach Feyrer wurden auf Basis von analytischen Spannungsberechnungen unterschiedliche Ansätze und Vorgehensweisen zur Seillebensdauerberechnung vorgestellt ([Rossetti1975], [Pantucek1977], [Jehmlich1980] u. [Tonghini1980]). Eine genaue Kenntnis über die Drahtspannungen und Zeitfestigkeiten der Drähte allein, so Feyrer weiter, reicht nicht für eine Seillebensdauerprognose aus [Feyrer2000]. Feyrer wählte einen anderen Ansatz, um die Lebensdauer von laufenden Drahtseilen zu beschreiben [Feyrer1981]. Auf Basis zahlreicher Versuchsreihen formulierte Feyrer mittels Regressionsanalyse eine Lebensdauerformel in Abhängigkeit der grundlegendsten Seiltriebsparameter.

Das in Abbildung 2.3¹⁰ dargestellte Diagramm zeigt beispielhaft einen typischen, experimentell ermittelten Lebensdauerverlauf eines Drahtseils in Abhängigkeit der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 und des D/d -Verhältnisses.

In der logarithmischen Darstellung ist ersichtlich, dass mit zunehmender durchmesserbezogener Seilzugkraft ein starkes Abfallen am sogenannten Sprungpunkt stattfindet. Dieser beispielhaft dargestellte Verlauf ist charakteristisch für die Lebensdauerläufe von Drahtseilen. Die Kraft am sogenannten Sprungpunkt, bei dessen Überschreitung die Fließgrenze des Drahtmaterials zunehmend erreicht wird, wird in der Fachliteratur als Donandtkraft bezeichnet und berechnet sich nach Feyrer [Feyrer2007] für Einfachbiegung wie folgt:

$$S_{D,sim} = q_0 \cdot F_{min} + q_1 \cdot \frac{d}{D} \cdot F_{min} \quad (2.8)$$

¹⁰Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine vom Autor erstellte Nachzeichnung des Originals aus [Feyrer2000].

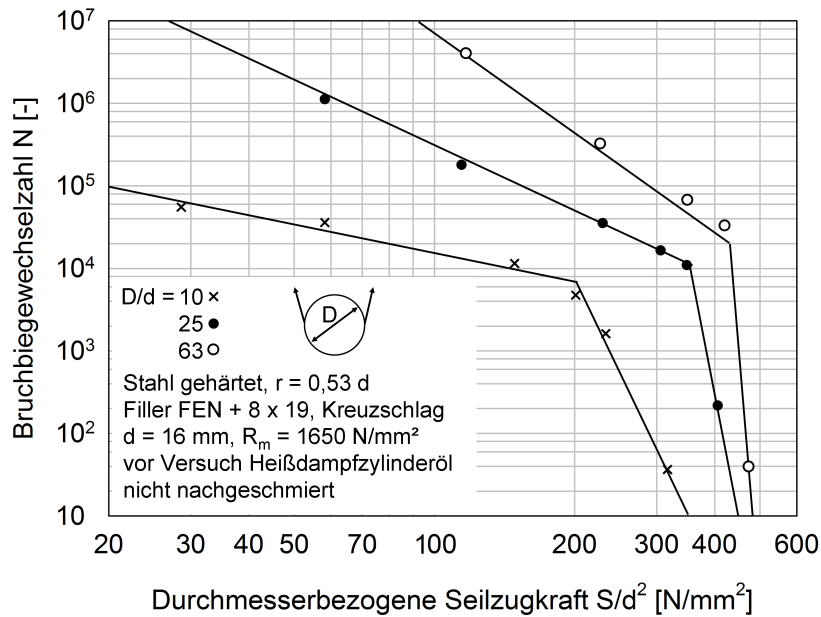


Abbildung 2.3: Beispielhafte Darstellung des Lebensdauerverlaufes von Drahtseilen [Feyrer2000]

Die Konstanten q_0 und q_1 müssen hierbei je nach Seilkonstruktion gewählt werden. Für die gängigsten Seilkonstruktionen liegen Werte in Tabellenform vor [Feyrer2007].

Um eine möglichst realitätsnahe Abbildung eines Seiltriebes zu erreichen und alle möglichen Einflussparameter abbilden zu können, existieren für die Lebensdauerformel nach Feyrer sogenannte Biegewechselfaktoren und Seilkraftfaktoren.

Biegewechselfaktoren beschreiben einen direkten Einfluss auf die ertragbare Biegewechselzahl und werden jeweils mit dem Ergebnis der Lebensdauerformel multipliziert. Bis heute jedoch konnten nicht alle Einflussparameter untersucht werden, da die Versuchsreihen stellenweise sehr aufwändig und zeitintensiv sind. Die Lebensdauerformel nach Feyrer [Feyrer2000] stellt sich wie folgt dar:

$$\begin{aligned}
 \lg N = b_0 + \left(b_1 + b_4 \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} \frac{d_0^2}{S_0} - 0,4 \lg \frac{R_0}{1770} \right) + b_2 \lg \frac{D}{d} \\
 - 0,32 \lg \frac{d}{d_0} + \frac{1}{b_5 + \lg \frac{l}{d}}
 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Seilkraftfaktoren ermöglichen eine an den jeweiligen Seiltrieb angepasste und möglichst genaue Beschreibung der anliegenden Seilzugkraft. Die Genauigkeit der Seilzugkraft ist, wie in Gleichung (2.9) ersichtlich, für die Ergebnislänge der errechneten Seillebensdauer mit von zentraler Bedeutung. Die Darstellung der Einflussparame-

ter auf die Seilzugkraft und deren Annahmewerte oder Berechnungsverfahren sind in [Feyrer2000] und [Feyrer2007] ausführlich erläutert. Eine weitere Anpassung der Lebensdauerformel (2.9) an die jeweiligen Umstände eines zu berechnenden Seiltriebs kann, wie bereits dargestellt, über Biegewechselfaktoren erfolgen. Die bereits bekannten Biegewechselfaktoren wurden durch systematische Variation der zu untersuchenden Einflussparameter überwiegend an Biegeversuchen ermittelt. Eine Übersicht über die vorhandenen Einflussgrößen findet sich in [Feyrer2000] und [Feyrer2007].

Der Einfluss der Drahtfestigkeit wurde u. a. in den Arbeiten von Woernle, Müller sowie Shitkow und Pospechow betrachtet ([Woernle1929], [Mueller1965] u. [Shitkow1957]). Nach Feyrer sind die Ergebnisse aufgrund der relativ geringen Datenbasis und der relativ großen Streuung nicht aussagekräftig genug [Feyrer1992]. Wolf hat eine Vielzahl an Biegeversuchen, getrennt für Seile mit Fasereinlage und Seile mit Stahleinlage, betrachtet [Wolf1987]. Die Auswertung der Ergebnisse aus Biegeversuchen an Seilen mit Fasereinlage und variiertes Drahtfestigkeit weicht von den Ergebnissen von Seilen mit Stahleinlage in der Höhe der Lebensdauerzunahme wesentlich ab. Wolf nennt als Beispiel eine Steigerung der Lebensdauer bei Seilen mit Fasereinlage von 34% bei einer Anhebung der Drahtfestigkeit von 1500 N/mm^2 auf 2000 N/mm^2 . Die Auswertung der Biegeversuche an Seilen mit Stahleinlage ergab einen nur gemäßigten Anstieg der Seillebensdauer. Entscheidend für den geringen Anstieg ist nach Ansicht von Wolf die durch Draht-Draht-Berührung zwischen der Einlage und den Außenlitzen entstehende Querpressung auf der Drahtoberfläche. Damit lässt sich der verhältnismäßig größere Lebensdaueranstieg bei Stahlseilen mit Fasereinlage erklären, bei denen die überlagerte Querpressung und Kerbspannung zwischen Stahleinlage und Außenlitzen nicht vorhanden sind [Wolf1987]. Feyrer arbeitete diese und weitere Ergebnisse auf und stellte ein Verhältnis des Einflusses der Drahtnennfestigkeit auf die Seillebensdauer dar [Feyrer1992].

Der Einfluss des Seildurchmessers auf die Lebensdauer von laufenden Seilen wurde bereits vielfach untersucht ([Shitkow1957], [Costello1990], [Ciuffi1995] u. [Feyrer2007]). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei gleichem D/d -Verhältnis und gleicher durchmesserbezogener Seilzugkraft die Seillebensdauer mit steigendem Seildurchmesser abnimmt. Shitkow und Pospechow wählen als Ansatz zur Begründung dieses Zusammenhangs die Betrachtung der Flächenveränderungen am Draht mit zunehmendem Drahtdurchmesser bei zunehmendem Seildurchmesser. Die Querschnittsfläche eines Drahtes, vereinfacht als Kreisquerschnitt betrachtet, nimmt mit dem Drahtdurchmesser im Quadrat proportional zu. Die zwischen benachbarten Drähten existierende Berührfläche nimmt nach dieser Theorie dagegen nur unwesentlich zu. Die dadurch entstehende höhere Flächenpressung zwischen den Drähten wirkt sich u. a. durch tribologischen

Verschleiß in einer Reduzierung der Seillebensdauer aus. Der erhöhte Verschleiß im Seilinneren wird von Shitkow und Pospechow auch als Grund für die Lebensdauerreduzierung bei Zunahme der Drahtzahl gesehen. Unabhängig vom Einfluss der Kontaktbedingungen zeigen die Ergebnisse von Ziegler, dass die in Drahtumlaufbiegeversuchen untersuchte Schwingfestigkeit mit zunehmendem Drahtdurchmesser abnimmt, was laut Ziegler auf die in der Festigkeitslehre bekannten Ursachen zurückgeführt werden kann [Ziegler2007].

Die Länge der Biegezone, in der ein Seil beim Lauf über eine Scheibe gebogen wird, wird als Biegelänge bezeichnet. Ihr Einfluss auf die Seillebensdauer wurde u. a. von Müller untersucht, indem er durch gezielte Variation der Biegelänge die Bruchbiegewechselzahl im Biegeversuch ermittelte [Mueller1961a]. Mit variiertem Biegelänge ergibt sich als Ergebnis der Untersuchungen von Müller eine nahezu gleichbleibende Bruchbiegewechselzahl bis zu einer Biegelänge, die kleiner ist als die Schlaglänge. Unterhalb dieses Bereichs steigt die Lebensdauer an, da, so Müller, nicht alle Litzen des Seils eine Wechsellast erfahren. Feyrer unternimmt zum Einfluss der Biegelänge auf die Seillebensdauer weitere Biegeversuche und findet heraus, dass die Lebensdauer auch bei einer Zunahme der Biegelänge nicht konstant bleibt sondern stetig abnimmt [Feyrer1981a]. Dies begründet Feyrer mit der wachsenden Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen im Seil, die zu einem Ausfall führen können. Ein wahrscheinlichkeitsbasierter Ansatz ist daher auch Grundlage für eine mathematische Beschreibung des Einflusses der Biegelänge auf die Seillebensdauer (vgl. [Feyrer2000]).

Aufgrund neuer Erkenntnisse bezüglich des Einflusses des Seildurchmessers und der Seilbiegelänge wurde die Lebensdauerformel von Feyrer in überarbeiteter Weise wie folgt dargestellt [Feyrer2011]:

$$\lg N = a_0 + \left(a_1 + a_3 \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \lg \frac{R_0}{1770} \right) + a_2 \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_l \quad (2.10)$$

Insbesondere die beiden Einflussgrößen Seildurchmesser und Biegelänge werden in der Gleichung (2.10) neu berücksichtigt.

Der Seildurchmesser geht dabei mit dem Glied $\lg f_d$ in die Formel ein, welches in der Form f_d den Mittelwert einzelner Biegewechselverhältnisse f_{di} darstellt. Mit f_{di} werden einzelne Verhältnisse zwischen den Biegewechselzahlen von Seilen mit dem Bezugsdurchmesser von $d_E = 16 \text{ mm}$ und einem jeweils untersuchten Seildurchmesser d gebildet. Das aus diesem Ansatz hervorgehende f_d stellt sich in vereinfachter Schreibweise wie folgt dar [Feyrer2011]:

$$f_d = \frac{0,52}{-0,48 + \left(\frac{d}{16} \right)^{0,3}} \quad (2.11)$$

Die Durchmessergrößen der Gleichung (2.11) werden von Feyrer auf $6\text{ mm} \leq d \leq 44\text{ mm}$ festgelegt, da außerhalb dieser Grenzen kein aussagekräftiges Ergebnis zu erwarten ist [Feyrer2011].

Ähnlich wie beim ursprünglichen Ansatz wird bei der neuen Formulierung des Einflusses der Biegelänge von einer Wahrscheinlichkeitsrechnung ausgegangen. Ausgehend von der Neuformulierung des effektiven Biegelängenverhältnisses, stellt Feyrer über die Ausfallwahrscheinlichkeit einen mathematischen Zusammenhang auf, der sich lediglich rechnergestützt lösen lässt. Als Vereinfachung formuliert Feyrer eine Näherungsgleichung für das Glied f_l [Feyrer2011].

$$f_l = \frac{1,54}{2,54 - \left(\frac{\frac{l}{d} - 2,5}{57,5} \right)^{-0,14}} \quad (2.12)$$

Neben den in den Lebensdauerformeln (2.9) und (2.10) vertretenen Einflussparametern wie der Seilzugkraft S , welche meist durchmesserbezogen (S/d^2) ist, und dem Biegeverhältnis D/d zwischen Scheibendurchmesser und Seildurchmesser, sind die zuvor genannten Biegewechselfaktoren zu berücksichtigen. Vereinfacht kann festgehalten werden, dass, wie in Abbildung 2.3 zu erkennen ist, die Seillebensdauer mit zunehmender Seilzugkraft und/oder mit abnehmendem D/d -Verhältnis auf seilspezifische Weise abnimmt. Die Biegewechselfaktoren spiegeln verschiedene Einflüsse wider und ermöglichen eine möglichst präzise Abbildung der Realität innerhalb der Lebensdauerbestimmung. Die bisher untersuchten Biegewechselfaktoren sind in [Feyrer2007] tabellarisch mit der entsprechenden Zuordnung aufgeführt. Eine Untersuchung zum Einfluss der Verdrehung von Seilen beim Lauf über Scheiben fand bisher noch nicht statt und konnte daher nicht als Biegewechselfaktor berücksichtigt werden.

Die Seilschmierung, welche von Müller auf ihren Lebensdauereinfluss hin untersucht wurde, wird in [Feyrer2000] als Biegewechselfaktor in zwei Bemessungsgrößen aufgeführt ([Mueller1965]). Bei gut geschmierten Seilen wird der Biegewechselfaktor zu 1, während er für ungeschmierte Seile zu 0,2 gesetzt wird (vgl. [Feyrer2000]). Eine objektive Beurteilung und Auswahl eines geeigneten Faktors ist hier aufgrund der unklaren Abgrenzung nur schwer möglich. Müller veröffentlichte Ergebnisse von Biegewechselversuchen, bei denen der Einfluss der Schmierung auf die Lebensdauer von Seilen untersucht wurde [Mueller1965]. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass gefettete Seile gegenüber ungefetteten Seilen eine signifikante Lebensdauerzunahme erreichen. Ausschlaggebend dafür ist nach Feyrer die verminderte Reibung zwischen den Drähten bzw. Litzen und die Reduzierung der schwellenden sekundären Zugspannungen bei einer Biegebelastung des

Seils [Feyrer2000]. Der Einfluss einer zyklischen Schmierung der Seile im Betrieb, auch Nachschmierung genannt, wurde u. a. von Feyrer untersucht [Feyrer1998]. Es wurde festgestellt, dass Seile, die während des Dauerbiegeversuchs nachgeschmiert wurden, meist eine erhöhte Lebensdauer sowie eine höhere Biegewechselzahl bis zur Ablegereife erreichten als Seile, die nicht nachgeschmiert wurden. Die Ausnahme bilden hierbei Seilversuche, die durch die Versuchsparemeterwahl im ungeschmierten Zustand eine maximale Biegewechselzahl von $N_B = 80000$ bis zum Bruch oder $N_A = 50000$ bis zur Ablegereife erreichten. Unterhalb dieser Biegewechselzahlen werden Lebensdauer und Ablegiebiegewechselzahl durch Nachschmierung reduziert. Feyrer [Feyrer1998] beschreibt diese Umkehrung mittels zweier im Seil relevanter Effekte:

- Reduzierung der Reibung und damit Verminderung der schwellenden sekundären Zugspannung
- Die Strecke, bis ein gebrochener Draht wieder die volle anteilige Zugkraft übernimmt, ist durch die verbesserten Gleiteigenschaften vergrößert

Mit dieser Theorie ist bei hohen Lasten und damit geringeren erreichbaren Biegewechselzahlen der zweite Effekt am dominantesten, während bei geringeren Lasten, und damit höheren erreichbaren Biegewechselzahlen, der erste Effekt dominiert [Feyrer1998].

In den Lebensdauerformeln (2.9) und (2.10) können mit den Konstanten b_i bzw. a_i eine Vielzahl gängigster Seilkonstruktionen berücksichtigt werden ([Feyrer2007] bzw. [Feyrer2011]). Ergänzend hierzu können mit festgelegten Werten für den Biegewechselfaktor unterschiedliche Merkmale der Seilkonstruktion, wie z. B. eine abweichende Litzenanzahl von sechs anstatt acht erfasst werden. Ebenso lassen sich abweichend von der Einlagenart wie FC¹¹ oder IWRC¹² unterschiedliche Einlagen berücksichtigen [Feyrer2007].

Wie bereits beschrieben, wird die Lebensdauer von laufenden Seilen durch verschiedene Einflussgrößen bestimmt. Weitere Einflussgrößen, auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird oder welche in weiterfolgenden Kapiteln ausführlich dargestellt werden, sind:

- Scheibenbeschaffenheit und Rillengeometrie
- Umschlingungswinkel
- Gegenbiegung

¹¹FC steht für „fibre core“ (Fasereinlage) [DIN-EN12385-2:2002].

¹²IWRC steht für „independent wire rope core“ (Drahtseileinlage, gesondert verseilt) [DIN-EN12385-2:2002].

- Wechselnde Zugbelastungen
- Schrägzug (Kapitel 2.6)

In der praktischen Anwendung können in einem Seiltrieb mehrere Einflüsse auf das Seil wirken, die in ihrer Ausprägung unterschiedlich sind, wie z. B. unterschiedliche Seilzugkräfte und Scheibendurchmesser [Feyrer2007]. Zur Bestimmung der Lebensdauer in einem Seiltrieb wird die höchstbeanspruchte Seilzone ermittelt und die Einflüsse auf die Lebensdauer werden akkumuliert. Mit der Schadensakkumulations-Hypothese, welche in der Fachliteratur auch als Palmgren-Miner-Regel bekannt ist, kann die erreichbare Schwingspielzahl bzw. Biegewechselzahl eines Seils unter verschiedenen Belastungen bestimmt werden (vgl. [Feyrer2007], [Palmgren1924], [Miner1945], [Rossetti1975], [Ciuffi1979] und [Wohlrab1980]).

2.4 Ablegereife und deren Bestimmung

Durch die vielfältige Beanspruchung von Drahtseilen im Betrieb entstehen Schädigungsmechanismen, die unterschiedliche Auswirkungen auf das Seil haben können. Zu nennen sind hier beispielhaft der Oberflächenverschleiß durch Reibkontakt, die Werkstoffermüdung der Drähte durch dynamische Belastungen, die Verformung des Seilverbands oder der Gewaltbruch von Drähten.

Damit ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann, müssen die eingesetzten Seile regelmäßigen Inspektionen unterzogen und deren Zustand nach definierten Kriterien bewertet werden. Damit die Kriterien zur Zustandsbewertung einheitlich sind, wurden sie normativ erfasst (vgl. u. a. [DIN15020:1974], [ISO4344:2004(E)], [ISO4309:2010(E)]). Ein Seil gilt als ablegereif, sobald eines der normativen Kriterien des entsprechenden Anwendungsgebietes erfüllt ist.

In der Seilanwendung hat sich ein Kriterium besonders herausgebildet, das u. a. von Ren und Feyrer als das wichtigste Kriterium zur Feststellung der Seilablegereife angesehen wird: Die Anzahl an Drahtbrüchen auf einer definierten Seillänge ([Ren1996] u. [Feyrer2000]).

Die Ermittlung der vorhandenen Drahtbrüche in einem Seil kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Nach Feyrer ist die visuelle und die taktile Lokalisierung von Drahtbrüchen und deren Zählung die gängigste Methode [Feyrer2000]. Eine weitere Erfassung von Drahtbrüchen in Seilen kann mittels magnetischer Messgeräte vorgenommen werden (z. B. [Mueller1957], [Jahne1992] u. [Nussbaum1999]). Mit dieser Messmethode, können im Vergleich zu der visuellen und taktilen Vorgehensweise sowohl außen liegende als

auch innen liegende Drahtbrüche detektiert werden. Die visuelle und taktile Prüfung beschränkt sich dagegen auf die Seiloberfläche.

Die Anwendung der jeweiligen Methode zur Ermittlung der Drahtbrüche hängt dabei maßgeblich von der Seilkonstruktion und den verwendeten Seilscheiben (Scheibenmaterial und Rillenform) ab. Anhand von Versuchen hat Jahne herausgefunden, dass bei der Kombination von Gleichschlagseilen und Seilscheiben mit Rundrillen die Ablegereife durch äußerlich erkennbare Drahtbrüche¹³ in Bezug auf die Ablegekriterien der DIN 15020 nicht zuverlässig bestimmt werden kann ([Jahne1992] u. [DIN15020:1974]). Feyrer fasst die aktuellen Erkenntnisse zusammen und empfiehlt daraus das entsprechende Verfahren zur Ermittlung von Drahtbrüchen [Feyrer2007]. Für Drahtseile in Kreuzschlagverseilung ergeht daraus hervor, dass die Anwendung der visuellen und taktilen Methode geeignet ist. Besteht die Scheibenrinne aus Kunststoff empfiehlt Feyrer die magnetische Prüfung anzuwenden, da davon ausgegangen wird, dass durch vornehmlich innere Drahtbrüche die Ablegereife äußerlich nicht zuverlässig bestimmt werden kann [Feyrer2007]. Eine mögliche Ausnahme bildet hier u. a. der versuchsbasierte Nachweis einer sicheren Ablegereifeerkennung durch visuelle und taktile Inspektion [Feyrer2008a].

Die theoretische und experimentelle Bestimmung der Drahtbruchentwicklung und -verteilung wurde bereits hinreichend untersucht (z. B. [Woernle1929], [Feyrer1983], [Feyrer1983a], [Feyrer1984], [Jahne1992] u. [Ren1996]). Feyrer entwickelte auf Basis von Versuchen eine Berechnungsmethode zur Bestimmung der Ablegedrahtbruchzahl in Abhängigkeit des Seilaufbaus, des Verhältnisses zwischen Seildurchmesser d und dem Scheibendurchmesser D sowie der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 (vgl. [Feyrer1984] u. [Feyrer2000] bzw. [Feyrer2007]). Auf die unterschiedlichen Ablegedrahtbruchzahlen und deren Festlegung bzw. Berechnung wird in Kapitel 5.4 näher eingegangen.

2.5 Seilverdrehung durch Höhenspannung

In der Praxis spielt die Höhenspannung bei der Überwindung großer Höhendifferenzen, wie sie z. B. in Schachtförderanlagen, Offshore-Anwendungen oder „high-rise“-Aufzügen auftreten, eine wichtige Rolle.

Die Höhenspannung bei Schachtförderanlagen wurde u. a. von Chaplin und Rebel eingehend untersucht ([Chaplin2005], [Chaplin2008] u. [Rebel1997]). Es wird grundlegend zwischen zwei unterschiedlichen Antriebs- bzw. Förderkonzepten unterschieden, die schematisch in Abbildung 2.4¹⁴ dargestellt sind.

¹³Die Bezugslänge hierfür gibt Jahne mit $30d$ an (vgl. [Jahne1992]).

¹⁴Die in Klammern dargestellten Übersetzungen wurden vom Autor der original Abbildung aus [Chaplin2008] beigefügt.

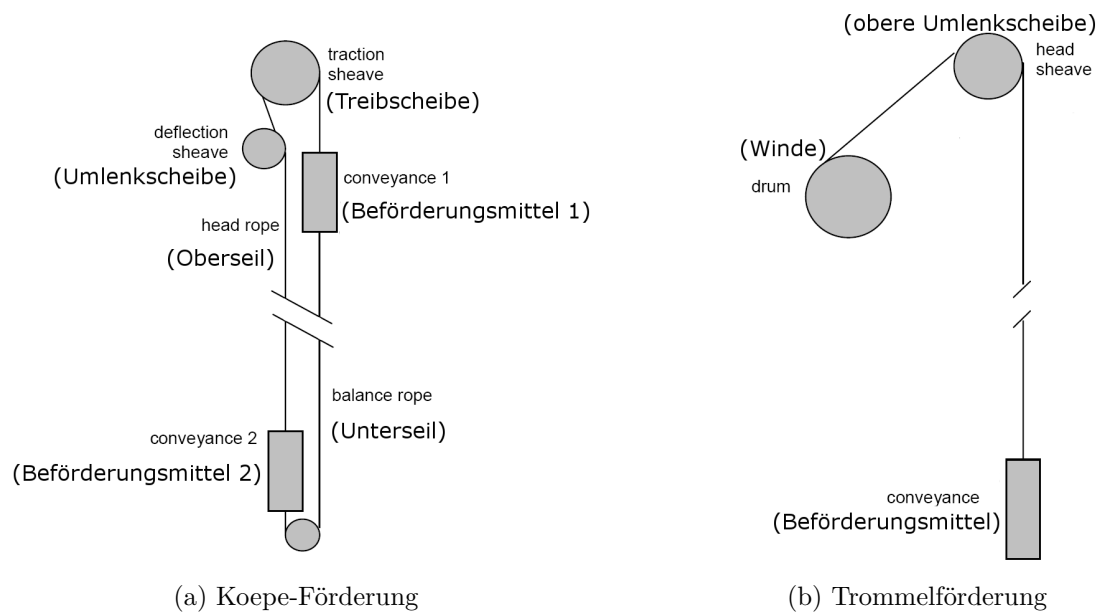


Abbildung 2.4: Förderkonzepte in Schachtförderanlagen [Chaplin2008]

Bei dem Prinzip der Koepe-Förderung (a), läuft das Seil (Oberseil) ausgehend vom Fördermittel 1 über die Treib- und Umlenkscheibe zur Befestigung an der Oberseite des Fördermittels 2. Das Unterseil ist an den jeweiligen Unterseiten der Fördermittel befestigt und läuft über eine Seilscheibe. Damit das generelle Funktionsprinzip eines Treibscheibensystems gewährleistet ist, wird mittels der Verbindung der beiden Fördermittel sowie mit dem Unterseil als Ausgleich zum Oberseil ein gewisses Massen- oder auch Lastgleichgewicht geschaffen.

Die Förderung mittels Seilwinde (b) erfolgt dagegen ohne Massenausgleich, wobei das Förderseil über eine an der Schachtoberseite angebrachte Umlenkscheibe zur Seiltrommel läuft.

Um die Seilverdrehung, die bei einer gängigen Fördertiefe einer Koepe-Förderung auftritt, zu untersuchen, verwendete Chaplin die in den Kapiteln 2.2 und 3.2 dargestellten Gleichungen [Chaplin2008]. Chaplin ermittelt die Drehmomentkonstanten für ein Dreikantlitzenseil in Versuchen und bestimmt damit die Verdrehung eines 44 mm Seils über der Schachttiefe mit einer wirkenden Nutzlast eines leeren 12 t Fördermittels (siehe aufbereitetes Diagramm in Abbildung 2.5¹⁵) [Chaplin2008].

Aus dem in Abbildung 2.5 dargestellten Diagramm ist ersichtlich, dass bei einer für Koepe-Antriebe realitätsnahen Fördertiefe von 1000 m eine Verdrehung des untersuchten Dreikantlitzenseils von ca. $1070^\circ/100d$ auftritt. Umgerechnet in Umdrehungen pro Meter

¹⁵Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine vom Autor erstellte Nachzeichnung und Übersetzung des Originals aus [Chaplin2008].

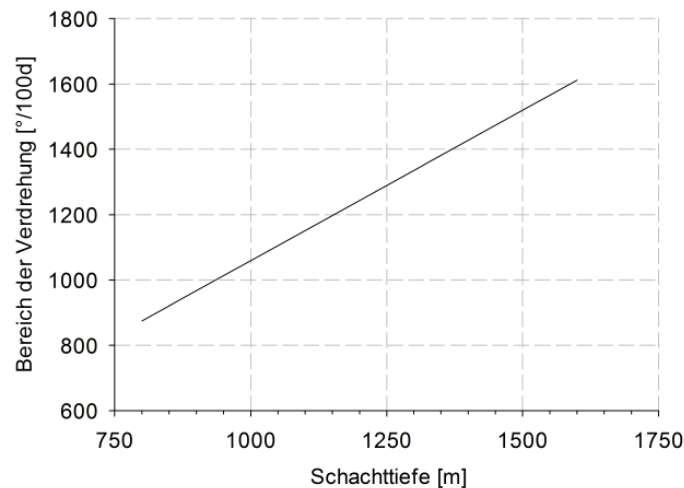


Abbildung 2.5: Verdrehung eines Dreikantlitzenseils aufgrund der Höhenspannung [Chaplin2008]

(U/m) ergibt dies $0,675 U/m$. Rebel führt in seiner Arbeit [Rebel1997] einen Wert aus seinen Untersuchungen auf, der für ein neu installiertes Seil in einer Schachtförderanlage bei einer Höhe von 1000 m umgerechnet $0,694 U/m$ beträgt. Abweichend davon findet Rebel bei Messungen nach einer Einsatzzeit von 76,5 Monaten einen um den Faktor 2,16 höheren Wert ($\approx 1,5 U/m$) bei 1000 Metern [Rebel1997]. Rebel nimmt an, dass sich u. a. durch die Installation des Seils und dessen Betrieb eine bleibende Verdrehung im Seil befindet, die die Seilstruktur entsprechend veränderte [Rebel1997].

Das durch Installation und Höhenspannung verdrehte Seil läuft somit in seinem verdrehten Zustand bei jeder Hub- und Senkbewegung über mindestens eine Seilscheibe (vgl. [Rebel1997] u. [Chaplin2005]). Dabei muss der Fokus nicht ausschließlich auf die oben angebrachte Umlenk- bzw. Treibscheibe oder Trommel gerichtet sein, sondern es kann auch bei einer 2:1-Aufhängung die Biegung des verdrehten Seil auf der oben am Fördermittel angebrachten Umlenkscheibe betrachtet werden. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben und in Abbildung 1.3 beispielhaft dargestellt, dreht sich ein Drahtseil mit verdrehsteifen Enden unter „Höhenspannung“ im unteren Bereich zu und im oberen Bereich auf. An der am Fördermittel angebrachten Umlenkscheibe liegt eine positive Seilverdrehung (zugesdreht) und an der Seilscheibe an der Schachtoberseite eine negative Seilverdrehung (aufgedreht) vor. Beim Lauf des Seils sind somit beide Verdrehrichtungen (positiv und negativ) zu berücksichtigen.

Bestehen in Seilsträngen unterschiedliche Zustände hinsichtlich des Drehmoments oder des Verdrehgrades, findet bei einer dynamischen Betrachtung ein Ausgleich statt. Werden dazu, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, an einer Seilscheibe zwei Seilstränge $Strang_1$ und $Strang_2$ betrachtet, die unterschiedliche Zustände in der Verdrehung

aufweisen ($\omega_1 \neq \omega_2$), läuft bei einer Bewegung in Richtung *Strang*₂ der Seilstrang *Strang*₁ auf die Scheibe auf und wird im Rillengrund fixiert. Sobald *Strang*₁ von der Seilscheibe läuft, findet ein Ausgleich statt und ω_2 wird zu $\omega_{2,Neu}$.

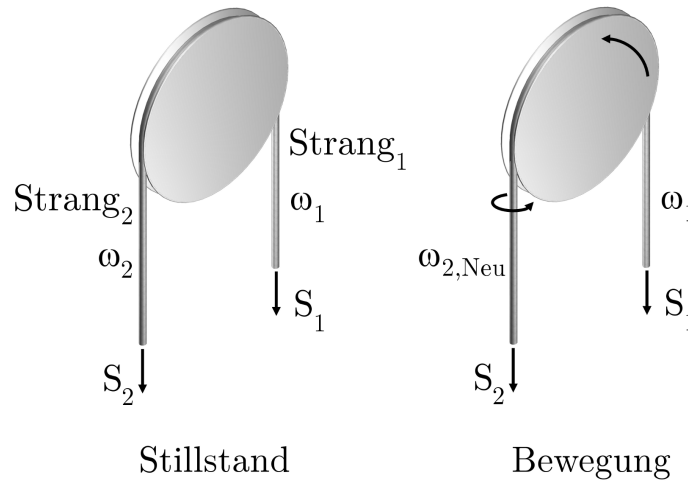


Abbildung 2.6: Aus der Höhenspannung resultierende Strangzustände an Scheiben

Bei Treibscheiben, bei denen ein Schlupf in Richtung der Seilachse auftritt, kann nach Chaplin während der Seilbewegung in Umfangsrichtung der Treibscheibe auch ein um die Seilachse auftretender rotatorischer Schlupf stattfinden, was er am Beispiel von Koepe-Förderanlagen zeigt ([Chaplin2005], vgl. [Berner2011]). In Anlehnung an das Modell von Hymans und Hellborn findet bei Treibscheiben damit ein Ausgleich von unterschiedlichen Zuständen in den jeweiligen Strängen in einer sich an die Ruhezone anschließenden Schleichzone statt (vgl. [Hymans1927]). Die Folgen sind ein durch die Relativbewegung zwischen Scheibenrinne und Seil stattfindender abrasiver Verschleiß¹⁶ und eine dynamisch wechselnde Torsionsbelastung, welche hinsichtlich einer möglichen Ermüdungsbeanspruchung zu beachten ist.

Rebel beschreibt in seiner Arbeit, dass sich die Zustände vor der Umlenkscheibe und zwischen Umlenkscheibe und Winde bei Trommelförderern nach der Installation mit jedem Hub angleichen, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt [Rebel1997]. Inwiefern sich bei unterschiedlichen Strangzuständen und einem stattfindenden dynamischen Vorgang die jeweiligen Zustände über die Betriebszeit annähern und damit den Zustand durch Höhenspannung überlagern, ist nicht bekannt.

Um den Zustandsänderungen eines Stahlseils resultierend aus der Höhendifferenz entgegenzuwirken, beschreiben Verreet sowie Malinovsky und Tarnavskaya die Anwendung von Seilen, bei denen während der Seilfertigung die Schlaglänge entsprechend

¹⁶Das Auftreten von Verschleißerscheinungen durch die Rotationsbewegung des Seils in der Scheibenrinne wird in [Chaplin2005] aus einem Bericht von Berry und Wainwright wiedergegeben.

variiert wird ([Verreet2002] u. [Malinovsky2006]). Eine durch den auf- oder zugeordneten Zustand des Seils hervorgerufene ungleichmäßige Verteilung der Drahtspannungen wird durch dieses Verfahren weitgehend homogenisiert [Malinovsky2006]¹⁷.

Stahlseile, die bei Anwendungen in der Offshore-Industrie zum Überwinden größerer Höhendifferenzen eingesetzt und dabei an ihrem obersten Punkt über eine Scheibe abgelenkt werden, wie es z. B. bei Verankerungssträngen sogenannter Mooring Lines oder bei Krananlagen auf Deck vorkommt, erfahren auf der Seilscheibe einen überlagerten Belastungszustand bestehend aus Zug, Biegung und der aus der Höhenspannung resultierenden Torsion. Zusätzlich zu der Verdrehung des Seils durch Höhenspannung kann es bei Mooring Lines durch Montage oder torsionale Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten des Verankerungssystems zu weiterer Seilverdrehung kommen [Chaplin1998] (vgl. Kapitel 1.1).

Die aus der Höhenspannung resultierenden und in diesem Kapitel beschriebenen Verdrehzustände (oberer Seilbereich aufgedreht und unterer Bereich zugeordnet) können in entsprechender Weise auf weitere Seilanwendungen wie z. B. Seilbahnen oder „high-rise“-Aufzüge übertragen werden.

2.6 Seilverdrehung durch Schrägzug

Wie einleitend in Kapitel 1 bereits aufgezeigt wurde, kommt es in der praktischen Anwendung von Seiltrieben häufig zu einem schrägen Auflaufen des Seils auf die Seilscheibe. Konstruktiv ist dieser Umstand häufig unausweichlich, weshalb ein Schrägzug des Seils normativ in Grenzen akzeptiert wird (vgl. [Wehking2003], [DIN15020:1974] u. [DIN-EN12385-3:2004]).

Der Schrägzugwinkel ξ ist der eingeschlossene Winkel aus verlängerter Mittellinie der Seilscheibe und der Mittelachse des Seils (vgl. Abbildung 1.2). Liegen beide Linien aufeinander, nimmt der Schrägzugwinkel ξ den Wert 0° an. Bei einer Zunahme des Schrägzugwinkels läuft das Seil nach den geometrischen Beschreibungen von Unold auf die Scheibenflanke an immer höher liegenden Stellen auf, bis es über die Scheibenflanke „geknickt“ wird [Unold1923]. Abgesehen von dem zu vermeidenden kritischen Zustand, bei dem das Seil über die Scheibenflanke „geknickt“ wird, ist mit einem entsprechenden Einfluss auf die Seillebensdauer bei hohen Schrägzugwinkeln zu rechnen (vgl. [Schoenherr2005]).

¹⁷In [Malinovsky2006] sind sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen hierzu dargestellt.

Der direkte Einfluss von Schrägzug auf die Lebensdauer wurde bereits hinreichend untersucht (vgl. [Neumann1987], [Heepen1995] u. [Schoenherr2005]). Die genannten Untersuchungen haben u. a. gezeigt, dass ein auf eine Scheibe schräg auflaufendes Seil zuerst auf die Rillenflanke trifft und sich in einer Mischung aus Gleiten und Wälzen in Richtung Rillengrund bewegt (vgl. Abbildung 2.7).

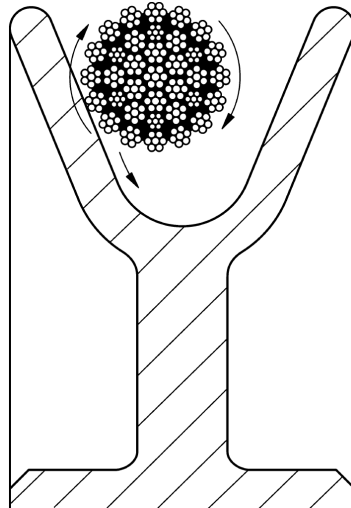


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Seilbewegung unter Schrägzug [DIN-EN12385-3:2004]

Die sich durch das Gleiten ergebende Relativbewegung zwischen Seil und Scheibenflanke wirkt sich in einem abrasiven Verschleiß der Drahtoberflächen bzw. der Scheibenoberfläche¹⁸ aus (vgl. [Schoenherr2005]). Hier kann somit von einem direkten Einfluss von Schrägzug auf die Seillebensdauer gesprochen werden. Die sich durch die Wälzbewegung ergebende Verdrehung des Seils kann sowohl an der Seilscheibe mit Schrägzugwinkel als auch bei folgenden Scheiben einen Einfluss auf die Seillebensdauer haben. Zum einen wird das Seil während des Auflaufens bzw. Ablaufens auf die bzw. von der Scheibe unter Schrägzug verdreht und gebogen. An weiteren folgenden Scheiben, bei denen je nach Konstellation kein Schrägzug vorliegt, kann zum anderen diese bereits ins Seil eingebrachte Verdrehung einen Einfluss auf die Seillebensdauer haben, der bisher jedoch unbekannt war und in der vorliegenden Arbeit erstmals untersucht wird.

Schoenherr, die in ihrer Arbeit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt hat, beschreibt theoretisch die Unterschiede, bei denen durch Schrägzug eine Drehung oder eine Verdrehung des Seils stattfindet [Schoenherr2005]. Eine Drehung der freien Seilstrecke kann nach Schoenherr nur stattfinden, wenn das Seilende ein gleich großes Drehmoment in gleicher Richtung erfährt oder es sich frei drehen lässt. Ein Seil kann unter anderem

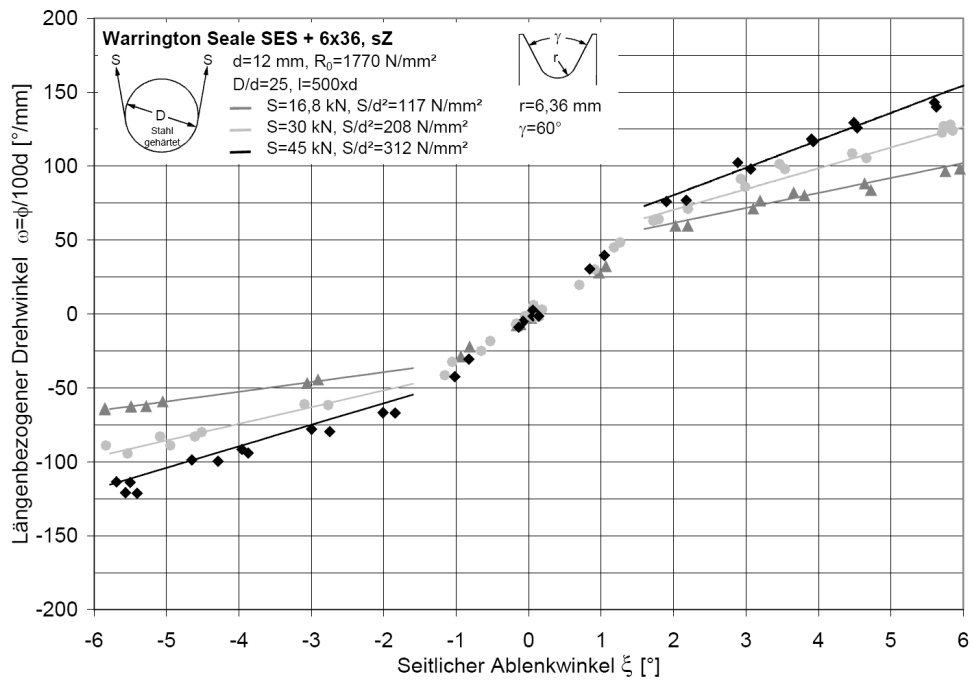
¹⁸Ein Verschleiß der Scheibe kann sich durch die Oberflächen- bzw. Formänderungen negativ auf das Seil auswirken (vgl. [Schoenherr2005]).

eine freie Drehung ausführen, wenn bei geeigneter Seilkonstruktion nach der Scheibe ein Wirbel folgt oder wenn das Seil im ungeführten einsträngigen Betrieb z. B. mit einem Kranhaken endet (Einschränkungen zum einsträngigen Betrieb sind in der DIN 15020 aufgeführt [DIN15020:1974]). Verreet und Ridge weisen darauf hin, dass bei einem mehrfach eingesicherten System selbst unter Verwendung eines Wirbels nur ein gewisser Anteil des Seils „entdreht“ wird [Verreet2001]. Dies hängt damit zusammen, dass ein Seil im Scheibengrund fixiert und daher der rotatorische Freiheitsgrad um die Seilachse gleich null ist. Ein Wirbel in einer Mehrfacheinscherung kann daher nicht auf alle Stränge wirken.

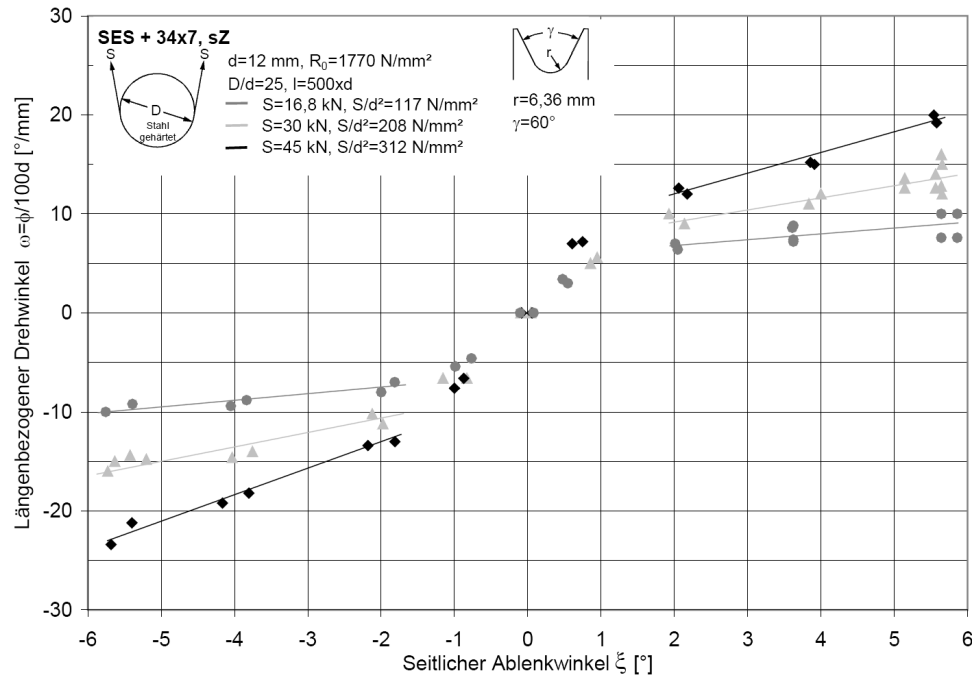
Neumann und Heepen, die sich in ihren Arbeiten jeweils mit der Thematik Schrägzug von Seilen auseinandersetzten, konnten in ihren jeweiligen Versuchen ein Drehen des Seils auf der freien Stecke beobachten ([Neumann1987] u. [Heepen1995]). Bei Neumann wurde das Versuchsseil auf der freien Strecke gedreht, da durch die Anordnung des Versuchsstandes auf der darauffolgenden Scheibe ein Drehen des Seils in gleicher Richtung und Größe erfolgte. Heepen dokumentierte das Drehen des Versuchsseils über der Biegewechselzahl. Auf die näheren Ursachen wird in seiner Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen. Zudem erfolgt bei den Begriffen Drehung und Verdrehung nach Meinung des Autors keine einheitliche Unterscheidung.

In der Arbeit von Schönherr wird das Auftreten von Drehung und Verdrehung verursacht durch Schrägzug experimentell für ausgewählte Seilkonstruktionen untersucht [Schoenherr2005]. Zwei auf die Seilkonstruktion bezogene Ergebnisse aus den Versuchen für das freie Seilende sind in Abbildung 2.8 gegenübergestellt (vgl. [Schoenherr2005]).

Aus den Diagrammen in Abbildung 2.8 lässt sich der Zusammenhang zwischen seitlichem Ablenkwinkel ξ und dem längenbezogenen Drehwinkel ω deutlich erkennen. Die Diagramme zeigen zudem, dass ω abhängig von der Seilkonstruktion bzw. der damit zusammenhängenden Drehsteifigkeit ist. Das Spiralrundlitzenseil mit drei Litzenlagen in Diagramm (b) weist bei gleichem Schrägzugwinkel einen deutlich kleineren längenbezogenen Drehwinkel auf als das einlagige Rundlitzenseil (a).



(a)



(b)

Abbildung 2.8: Längenbezogener Drehwinkel ω bei unterschiedlichen Schrägzugwinkeln [Schoenherr2005]

3 Theoretische Untersuchungen

3.1 Seilgeometrie unter Verdrehung

3.1.1 Begriffsdefinition

Wie bereits Ernst aufzeigt, werden in der einschlägigen Fachliteratur häufig unterschiedliche Begriffe für Drehung oder Verdrehung verwendet [Ernst2012]. So finden sich neben der oft gleichbedeutenden Verwendung von *Drehung* und *Verdrehung* etwa *Seildrall* oder *Verdrillung* (vgl. [Schoenherr2005] u. [Ernst2012]). Um eine einheitliche Sprachregelung zu finden, werden in der vorliegenden Arbeit die Begriffe Drehung und Verdrehung nach Ernst in Anlehnung an den angelsächsischen Sprachraum verwendet [Ernst2012].

- Drehung = Ein Seil wird um seine Achse gedreht, wobei alle Seilquerschnitte einer Seilstecke sich in Betrag und Richtung gleich drehen.
- Verdrehung = Ein Seil wird um seine Achse gedreht, wobei sich die Seilquerschnitte einer Seilstrecke relativ zueinander drehen.

Durch eine Verdrehung eines Drahtseils¹⁹ kann es je nach Schlagrichtung des Seils und nach Verdrehrichtung „aufgedreht“ oder „zugedreht“ werden (vgl. [Feyrer2000]).

- Aufdrehen = Ein Drahtseil wird gegen die Schlagrichtung des Seils verdreht (Verdrehwinkel ω negativ).
- Zudrehen = Ein Drahtseil wird in Schlagrichtung des Seils verdreht (Verdrehwinkel ω positiv).

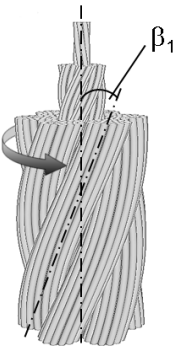
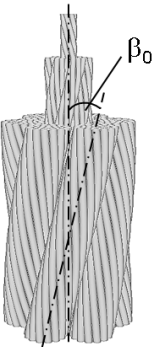
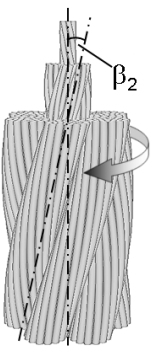
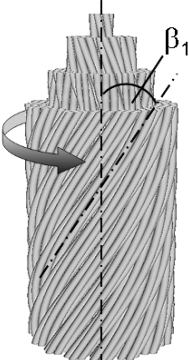
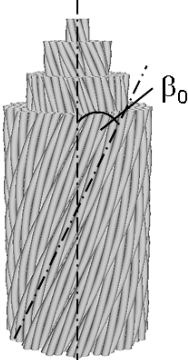
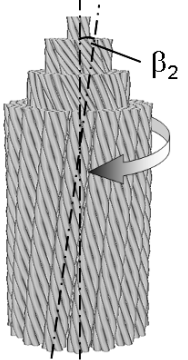
Eine Verdrehung eines Seils wird immer mit einem längenbezogenen Drehwinkel angegeben. Häufig wird als Bezugslänge ein ganzzahliges Vielfaches des Seilnennendurchmessers d_{nenn} verwendet (vgl. [Chaplin2008] u. [Feyrer2000]).

¹⁹Der Begriff Drahtseil bezieht sich in dieser Arbeit ausschließlich auf Drahtseile, deren Drähte bzw. Litzen im rotatorischen Sinn um die Seilachse verseilt sind.

3.1.2 Geometrische Zusammenhänge

Wird ein Drahtseil verdreht, ändert sich die geometrische Ursprungsform des Seils je nach Aufbau. Tabelle 3.1 zeigt die drei Verdrehzustände („zugedreht“, „unverdreht“ und „aufgedreht“) anhand von zwei unterschiedlichen Seilkonstruktionen in vereinfachten und beispielhaften Darstellungen²⁰.

Tabelle 3.1: Geometrische Veränderungen in Abhängigkeit der Verdrehzustände

Rund- litzenseil	„zugedreht“ ($\omega > 0$)	„unverdreht“ ($\omega = 0$)	„aufgedreht“ ($\omega < 0$)
einlagig			
mehrlagig			

Bei dem dargestellten einlagigen Rundlitzenseil mit Stahleinlage erfolgt das Zudrehen definitionsgemäß in Schlagrichtung des Seils (die Drehrichtung ist mit einem Pfeil dargestellt²¹). Durch das Zudrehen verkürzt sich die Schlaglänge und der Litzenschlagwinkel β vergrößert sich entsprechend ($\beta_0 < \beta_1$). Da die Litzen der Stahleinlage in die gleiche Richtung wie die Außenlitzen verseilt sind, werden diese ebenfalls zugedreht und der Schlagwinkel vergrößert sich relativ zum Ausgangsschlagwinkel. Da im dargestellten

²⁰Die Darstellungen der geometrischen Veränderungen an Drahtseilen erfolgt in Anlehnung an [Ernst2012].

²¹Die Drehung des Seils erfolgt an dem oberen Ende, während das untere Ende verdrehsteif gelagert ist.

Beispiel die Drähte in allen Litzen in die entgegengesetzte Richtung der Litzen verseilt sind (Kreuzschlag), erfolgt beim Zudrehen des Seils ein Aufdrehen der Litzen. Die jeweiligen Drahtschlagwinkel in den einzelnen Litzen werden entsprechend kleiner im Bezug zu den ursprünglichen Drahtschlagwinkeln im unverdrehten Zustand. Beim Aufdrehen des Seils ($\omega < 0$) erfolgen die Veränderungen in umgekehrter Weise. Die Schlaglänge der Außenlitzen und der Litzen der Stahleinlage verlängern sich und die Litzenschlagwinkel verkleinern sich entsprechend relativ zu den Litzenschlagwinkeln im unverdrehten Zustand ($\beta_0 > \beta_2$). Aufgrund der gegenläufigen Verseilung erfolgt ein Zudrehen der Litzen und die Drahtschlagwinkel nehmen entsprechend zu.

Ein mehrlagiges Spiralrundlitzenseil ist aus einzelnen Litzenlagen aufgebaut, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Schlagrichtungen unter Last für einen gewissen Ausgleich des entstehenden Drehmoments sorgen. Die unterschiedlichen Schlagrichtungen der einzelnen Litzenlagen haben bei einer Verdrehung von mehrlagigen Spiralrundlitzenseilen zur Folge, dass die geometrischen Veränderungen innerhalb des Seils entgegengesetzt verlaufen. Wird diese Seilkonstruktion, wie in Tabelle 3.1 dargestellt, zugedreht, erfolgt eine Vergrößerung des Seilschlagwinkels ($\beta_0 < \beta_1$). Die inneren Litzenlagen sind in die entgegengesetzte Richtung geschlagen, weshalb hier ein Aufdrehen stattfindet und die Litzenschlagwinkel entsprechend verkleinert werden. Je nach Schlagrichtung und Ausführung der einzelnen Litzen (Gleich- oder Kreuzschlag) erfolgt ein Auf- oder ein Zudrehen. Wird das mehrlagige Spiralrundlitzenseil aufgedreht, vergrößert sich die Schlaglänge der Außenlitzen und der Schlagwinkel wird entsprechend kleiner ($\beta_0 > \beta_2$). Die inneren Litzenlagen werden bei diesem Vorgang zugedreht und der Schlagwinkel dieser Lagen entsprechend vergrößert.

3.2 Theoretische Darstellung der Seilverdrehung durch Höhenspannung

Eine Höhendifferenz, die mit einem Drahtseil überwunden wird, führt in Abhängigkeit des längenbezogenen Seileigengewichts dazu, dass entlang der Seilachse die zu tragende Last linear zunimmt. Am oberen Seilende muss die Nutzlast sowie das komplette Seilgewicht getragen werden, während am unteren Ende lediglich die Nutzlast anliegt. Die daraus resultierende Lastdifferenz bei fixierten Seilenden wird als Höhenspannung bezeichnet [Feyrer2000].

Das in den Kapiteln 2.1 und 2.2 dargestellte Drehmoment M unter einer axialen Last tritt bei der Höhenspannung im Seil nicht äquivalent linear zur Last auf, sondern nimmt aufgrund der zusammenhängenden Struktur des Seils einen über die Seillänge hinweg

gleichmäßigen Betrag an. Damit ein durchgängig gleichgroßes Drehmoment anliegen kann, muss sich die Seilstruktur entsprechend verdrehen. Sind die in axialer Seilrichtung rotatorischen Freiheitsgrade an beiden Seilenden gleich Null, kann die theoretische Drehung des Seils nicht gleichmäßig erfolgen. Sie nimmt in einer parabolischen Form ein Maximum an, das nahe der Mitte der Höhendifferenz ist. Die Ableitung des Drehwinkels φ über die Länge des Seils x ergibt den Verdrehwinkel ω .

$$\omega = \frac{d\varphi}{dx} \quad (3.1)$$

Abbildung 3.1 zeigt Zusammenhang und schematischen Verlauf des Drehwinkels φ , des Verdrehwinkels ω und der Schlaglänge l_S entlang der freien Seillänge L_f in Anlehnung an [Feyrer2000], [Malinovsky2006] und [Ernst2011].

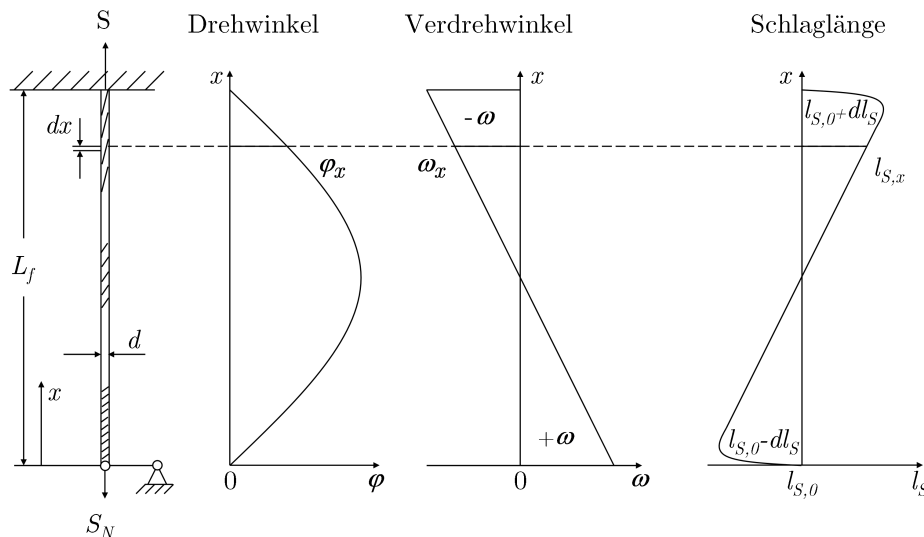


Abbildung 3.1: Schematische Zusammenhänge bei Höhendifferenz in Anlehnung an [Feyrer2000], [Malinovsky2006] und [Ernst2011]

Die folgenden Ausführungen sind im Hinblick auf Kapitel 2.2 nach Feyrer dargestellt, der in Abhängigkeit der theoretisch und versuchsbedingten Drehmomentkonstanten c_1 bis c_3 die Zusammenhänge bei Höhendifferenz analytisch erfasst [Feyrer2000].

Durch Umformen der Gleichung (2.6) nach dem längenbezogenen Drehwinkel ω ergibt sich nach Feyrer folgender Zusammenhang:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{M - c_1 d (S_N + m g x)}{c_2 d^2 (S_N + m g x) + c_3 G d^4} \quad (3.2)$$

Durch Integration und die Randbedingungen, dass das Seil an beiden Enden rotatorisch fixiert und somit $\varphi = 0$ ist, ergibt sich nach Feyrer das über die gesamte Seillänge L_f konstante Drehmoment M zu:

$$M = -\frac{c_1 c_3 G d^3}{c_2} - \frac{c_1 d m g L_f}{\ln\left(\frac{c_2 S_N + c_3 G d^2}{c_2 S_N + c_2 m g L_f + c_3 G d^2}\right)} \quad (3.3)$$

Aufbauend darauf leitet Feyrer den Drehwinkel φ und die Stelle mit dem maximalen Drehwinkel $x(\varphi_{max})$ her. Diese stellen sich in ihren Beziehungen wie folgt dar [Feyrer2000]:

$$\varphi = -\frac{c_1 x}{c_2 d} + \frac{c_1 L_f}{c_2 d} \frac{\ln\left(\frac{c_2 m g}{c_2 S_N + c_3 G d^2} x + 1\right)}{\ln\left(\frac{c_2 m g}{c_2 S_N + c_3 G d^2} L_f + 1\right)} \quad (3.4)$$

$$x(\varphi_{max}) = -\frac{c_2 S_N + c_3 G d^2}{c_2 m g} + \frac{L_f}{\ln\left(\frac{c_2 m g L_f}{c_2 S_N + c_3 G d^2} + 1\right)} \quad (3.5)$$

Der Verdrehwinkel ω lässt sich mit den Gleichungen 3.2 und 3.3 berechnen.

3.3 Theoretische Betrachtung der Seilverdrehung durch Schrägzug

Zur Berechnung des auftretenden Drehmoments, der Seildrehung sowie der Seilverdrehung eines unter Schrägzug auf- oder ablaufenden Seils auf bzw. von einer Scheibe, finden sich in den Arbeiten von Matthias, Petkow und Schönherr die notwendigen Zusammenhänge ([Matthias1966], [Petkow1968] u. [Schoenherr2005]).

Mit der Gleichung (2.7) und der in Gleichung (3.1) dargestellten Beziehung ergibt sich nach Schönherr [Schoenherr2005] folgender Zusammenhang zwischen dem Drehmoment M , der Drehsteifigkeit D^* und dem längenbezogenen Drehwinkel ω :

$$M = D^* \cdot \omega = D^* \cdot (\omega_A + \omega_f) = D^* \cdot \left(\frac{d\varphi}{dl_A} + \frac{d\varphi}{dL_f}\right) \quad (3.6)$$

Schönherr ermittelt in ihrer Arbeit die Zusammenhänge zur Berechnung des wirkenden Drehmoments. Eingesetzt in die Gleichung (3.6) ergibt sich mit der Seilzugkraft S , dem Reibungskoeffizienten μ , dem Rillenöffnungswinkel γ und dem Schrägzugwinkel ξ folgende Beziehung [Schoenherr2005]:

$$M = \frac{\mu \cdot S \cdot \xi \cdot d_{nenn}}{2 \cdot \cos \frac{\gamma}{2}} = D^* \cdot \left(\frac{d\varphi}{dl_A} + \frac{d\varphi}{dL_f} \right) \quad (3.7)$$

Lässt sich nach Schönherr das freie Seilende frei drehen oder wirkt am anderen Ende der freien Seilstrecke ein gleich großes und gleich gerichtetes Drehmoment, wird ω_f entsprechend zu Null ($dL_f = \infty$). Der Drehwinkel φ ist bei beiden Strecken (dL_f und dl_A) gleich groß. Dieser kann durch Umformung der Gleichung (3.6) berechnet werden.

$$d\varphi = \frac{M \cdot dl_A \cdot dL_f}{D^* \cdot (dl_A + dL_f)} \quad (3.8)$$

Mit dem Drehwinkel φ können durch die jeweiligen Längen dl_A und dL_f die Verdrehwinkel ω_A und ω_f berechnet werden.

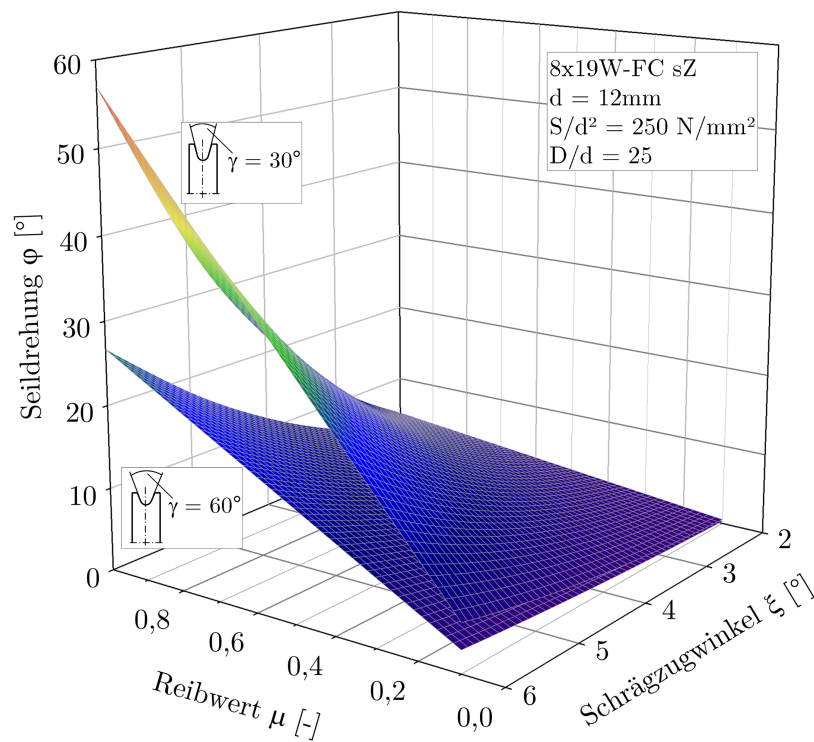
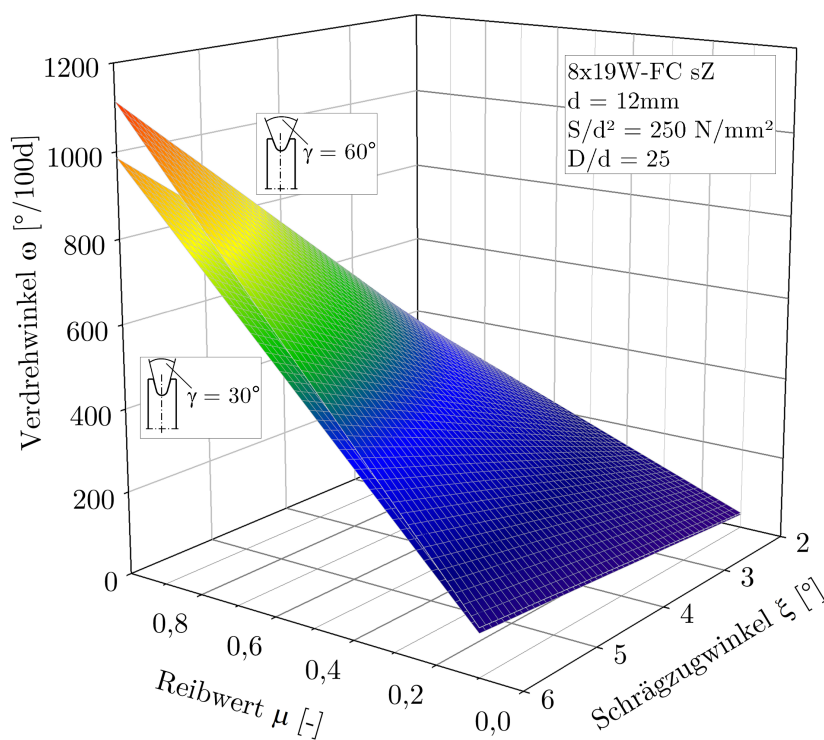
Je größer die freie Seilstrecke dL_f ist, desto geringer ist der Einfluss auf den Drehwinkel. Sobald sich jedoch die freie Seilstrecke dL_f ändert, hat dies Auswirkungen auf den Drehwinkel φ , was insbesondere bei Hub- und Senkvorgängen von Einscherungen zu beachten ist, bei denen sich die Seillängen zwischen den Scheiben ändern, wenn die Scheibenachsen zueinander beweglich sind.

Für die weitere Betrachtung soll angenommen werden, dass die freie Seilstrecke am anderen Ende ein gleich großes und gleich gerichtetes Drehmoment erfährt und somit $\omega_f = 0$ ist. Durch diese Annahme können im Folgenden die Einflüsse auf das Drehmoment M , den Drehwinkel φ und des Verdrehwinkels ω_A herausgearbeitet werden.

Das Diagramm in Abbildung 3.2 zeigt den Einfluss des Schrägzugwinkels ξ und des Reibungskoeffizienten μ auf den Drehwinkel φ exemplarisch für eine Seilkonstruktion auf. Wie aus der Gleichung (3.7) ersichtlich und in Abbildung 3.2 zu erkennen ist, wird der Drehwinkel φ mit zunehmendem Reibungskoeffizienten μ zwischen Seil und Rillenflanke und zunehmendem Schrägzugwinkel ξ größer. Einen weiteren Einfluss auf die Größe des Drehwinkels φ hat der Rillenöffnungswinkel²² γ der Seilscheibe. Bei einem Rillenöffnungswinkel von $\gamma = 30^\circ$ steigt der Drehwinkel mit zunehmendem μ und zunehmendem ξ stärker an als bei einem Rillenöffnungswinkel von $\gamma = 60^\circ$.

Bei der Betrachtung des längenbezogenen Drehwinkels (siehe Gleichung (3.1)) zeigt sich, dass dieser im Vergleich der beiden Rillenöffnungswinkel von $\gamma = 60^\circ$ und $\gamma = 30^\circ$ bei einem größeren Rillenöffnungswinkel größere Werte annimmt als bei einem kleineren Rillenöffnungswinkel ($\omega_{30^\circ} < \omega_{60^\circ}$). In Abbildung 3.3 ist analog zur Darstellung des Drehwinkels φ in Abbildung 3.2 der längenbezogene Drehwinkel ω in Abhängigkeit des Schrägzugwinkels ξ und des Reibungskoeffizienten μ dargestellt.

²²Der Rillenöffnungswinkel γ beschreibt denjenigen Winkel, der von den innen liegenden Flächen der Scheibenflanken eingeschlossen wird (vgl. [Feyrer2000]).

Abbildung 3.2: Drehwinkel φ in Abhängigkeit verschiedener EinflussgrößenAbbildung 3.3: Verdrehwinkel ω in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen

Für die unterscheidende Betrachtung des Drehwinkels φ und des Verdrehwinkels ω ist die Länge des Seilstücks zwischen dem Auflaufpunkt auf der Scheibe und dem fixierten Seilquerschnitt im Rillengrund (dl_A) von zentraler Bedeutung. Bei einem Rillenöffnungswinkel von $\gamma = 30^\circ$ ist diese Seilstrecke (dl_A) größer als bei einem Rillenöffnungswinkel von $\gamma = 60^\circ$, was sich wiederum auf die theoretische Berechnung des Drehwinkels φ und des Verdrehwinkels ω auswirkt (vgl. Gleichung (3.7)).

Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs von Rillenöffnungswinkel γ , dem Auflaufpunkt und der Länge des Seilstücks zwischen dem Auflaufpunkt auf der Scheibe sowie dem fixierten Seilquerschnitt im Rillengrund (dl_A), stellt Abbildung 3.4 hierzu zwei Rillenöffnungswinkel einer Seilscheibe vergleichend dar.

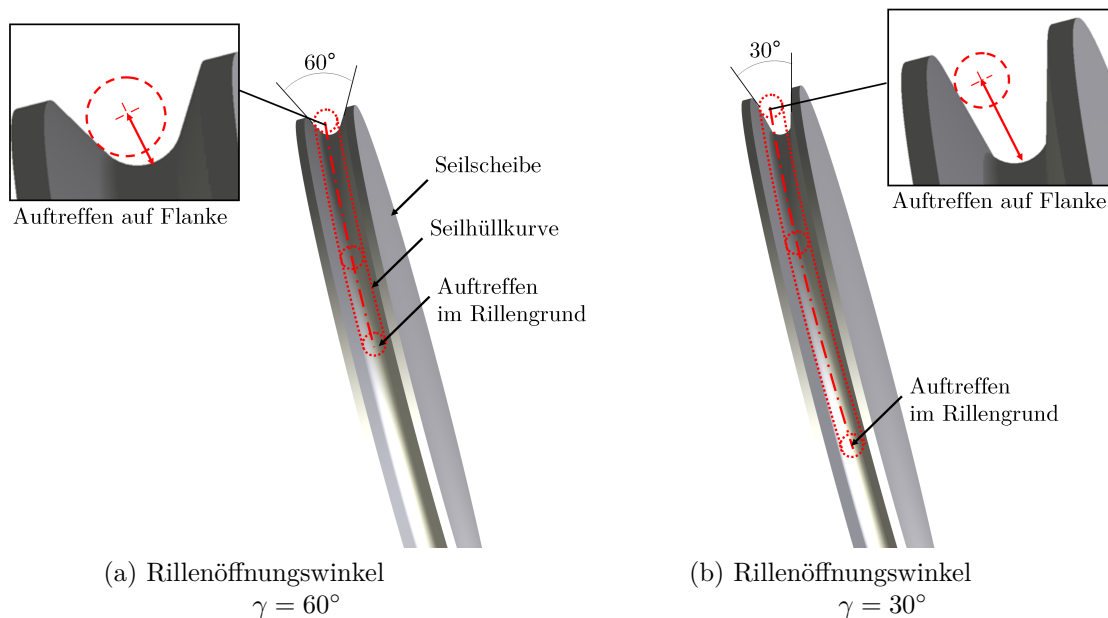


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung unterschiedlicher Rillenöffnungswinkel und des damit zusammenhängenden Seilverlaufs unter Schrägzug

Der Auflaufpunkt eines Seils unter einem Schrägzugwinkel liegt bei einem kleineren Rillenöffnungswinkel weiter oben auf der Scheibenflanke als bei einem größeren Rillenöffnungswinkel. Die Strecke, die das Seil vom Auflaufpunkt auf der Scheibenflanke bis zum Auftreffen im Rillengrund zurücklegt, ist, wie oben beschrieben, ebenfalls unterschiedlich lang. Die Länge dieser Strecke ist bei einer geometrischen Betrachtung entscheidend für den längenbezogenen Drehwinkel, welcher die Verdrehung des Seilstücks beschreibt.

Wie in Kapitel 3.1.1 erläutert, gilt für eine Verdrehung, dass die Seilquerschnitte eines betrachteten Seilstücks relativ zueinander gedreht sind. Den Ausgang für eine Seilverdrehung bildet somit eine Drehung von Seilquerschnitten relativ zueinander innerhalb einer diskreten Seilstrecke (vgl. [Schoenherr2005]).

Durch die unter Schrägzug auftretende Drehbewegung des Seils auf der Scheibenflanke, welche in Kapitel 2.6 erläutert wurde, werden die Seilquerschnitte unmittelbar zueinander gedreht, woraus eine Verdrehung der Seilstrecke zwischen Auf- bzw. Ablaufpunkt und Rillengrund resultiert. Die angrenzende freie Seilstrecke, welche sich nicht auf der Scheibe befindet, wird, wie einleitend bereits erläutert und in [Schoenherr2005] dargestellt, durch das an der Scheibenflanke wirkende Drehmoment (siehe Gleichung (3.7)) ebenfalls gedreht oder in Abhängigkeit des weiteren Verlaufs verdreht. Wird die freie Seilstrecke zunächst gedreht, liegt keine Verdrehung vor. Trifft dieses gedrehte Seilstück im weiteren Verlauf des Seiltriebes z. B. bei einer Hub- oder Senkbewegung auf ein unverdrehtes oder relativ hierzu gedrehtes Seilstück, resultiert daraus eine Verdrehung. Für eine bessere Unterscheidung einer unmittelbar auftretenden Verdrehung und einer erst im weiteren Verlauf des Seiltriebs auftretende Seilverdrehung sollen in dieser Arbeit folgende Begriffe erstmals eingeführt werden:

- direkte Verdrehung
- indirekte Verdrehung.

Als direkte Verdrehung wird dabei eine Verdrehung bezeichnet, bei der ein Drehen von Seilquerschnitten unmittelbar zu einer Verdrehung der betrachteten Seilstrecke führt. Bei der indirekten Verdrehung führt die Seildrehung zunächst nicht zu einer Verdrehung der betrachteten Strecke, da Anfang und Ende in Richtung und Betrag gleich gedreht wurden (gilt auch bei einem frei drehenden Ende). Diese Drehung resultiert jedoch im Seiltrieb, z. B. im Bereich einer Seiltrommel, die ein fixes Ende darstellt, in einer Verdrehung.

Die Bedeutung dieser hier eingeführten Unterscheidung stellt sich bei der Betrachtung der Veröffentlichungen von Verreet und Schönherr einmal mehr als notwendig und wichtig dar ([Verreet1999] u. [Schoenherr2005]). Verreet weist darauf hin, dass mit abnehmendem Rillenöffnungswinkel γ die Drehung²³ (φ) des unter Schrägzug auflaufenden Seils zunimmt und aufgrund dessen ein größerer Rillenöffnungswinkel einem kleineren zu bevorzugen ist [Verreet1999]. Bei Seiltrieben, bei denen eine indirekte Verdrehung auftritt, ist eine Betrachtung des Drehwinkels zu deren Bestimmung notwendig. Schönherr betrachtet in ihrer Arbeit u. a. die nach der hier eingeführten Definition bezeichnete direkte Verdrehung und kommt zu dem Schluss, dass bei einem kleineren Rillenöffnungswinkel γ eine geringere Verdrehung des Seils auftritt als bei einem größeren Rillenöffnungswinkel [Schoenherr2005].

²³In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe Drehung und Verdrehung nach der Definition in Kapitel 3.1 verwendet.

Wie oben beschrieben, sind beide Betrachtungsweisen für eine Seiltriebsanalyse hinsichtlich der auftretenden Verdrehung durch Schrägzug relevant. Für eine zielführende Betrachtung ist es jedoch wichtig, dass eine deutliche Unterscheidung der beiden eingeführten Verdrehungsarten erfolgt.

3.4 Sperrung unter dem Einfluss der Verdrehung

Durch das Verdrehen von Drahtseilen ändert sich die Schlaglänge der Seile relativ zur Ausgangsschlaglänge. Durch den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Schlagwinkel und Schlaglänge erfährt somit auch der Schlagwinkel eine entsprechende Änderung. Diese Änderung hat wiederum Auswirkungen auf die ursprünglich vorliegende Sperrung zwischen den Litzen. Beim Verdrehen eines Drahtseiles werden die Litzen um ihre Achse verdreht, wobei sich die Schlaglänge bzw. der Schlagwinkel der Litze ändert und sich somit die Sperrung zwischen den Drähten in der Litze entsprechend des Drehsinns und der Schlagart vergrößert oder verkleinert.

Ein unverseilter Runddraht besitzt in seiner Ursprungsform einen runden Querschnitt. Werden Runddrähte zu einer Litze verseilt und die hergestellte Litze in einem 90° -Winkel zur Litzenachse geschnitten, so weicht der Drahtquerschnitt in Abhängigkeit des Schlagwinkels von der runden Querschnittsform ab. Die Form des Querschnitts ändert sich dabei von rund über näherungsweise elliptisch, zu einer Art „bohnenförmigem“ Querschnitt²⁴ bis hin zu einem Ring. Dies gilt nur bei theoretischer Betrachtung, bei der die Schlaglänge den Wert Null annimmt. Diese Zustände von rund über elliptisch bis zu der sogenannten Bohnenform wird von Jenner in seiner Arbeit beschrieben [Jenner1992]. Jenner beschreibt in seiner Arbeit zudem die Berechnung der Sperrung zwischen benachbarten Drähten bzw. Litzen unter Annahme einer sich zur Ellipse annähernden Form des Drahtes bzw. der Litze im Querschnitt.

Die in Abbildung 3.5 dargestellten geometrischen Größen bilden die Grundlage für die Berechnung der Sperrung s'_Q nach Jenner.

Die Gleichung zur Berechnung der Sperrung s'_Q zwischen benachbarten Drähten stellt sich nach Jenner wie folgt dar:

$$\frac{s'_Q}{2} = R_D \cdot \sin \phi_D - r_D \cdot \sqrt{1 + \cos^2 \phi_D \cdot \tan^2 \alpha_D} \quad (3.9)$$

Dabei gilt nach Shitkow und Pospechow [Shitkow1957]:

$$\phi_D = \frac{\pi}{z_D} \quad (3.10)$$

²⁴Der Begriff des „bohnenförmigen“ Querschnitts wird in [Jenner1992] verwendet und dargestellt.

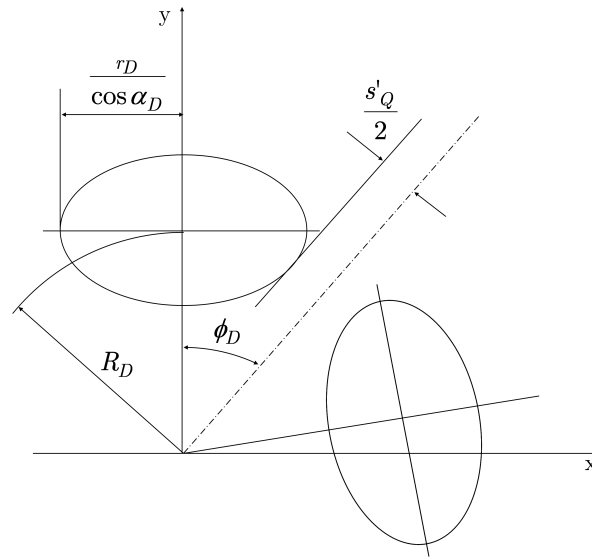


Abbildung 3.5: Geometriedarstellung zur Sperrungsberechnung nach [Jenner1992]

Die Berechnung der Sperrung von benachbarten Litzen erfolgt analog zu der dargestellten Berechnung der Sperrung zwischen benachbarten Drähten in einer Lage.

Wie Jenner in seiner Arbeit zeigt, weicht die Annahme einer Ellipse als geometrische Berechnungsgrundlage von der nur numerisch iterativ berechenbaren Sperrung basierend auf einer Bohnenform bis zu einem Schlagwinkel von ca. 20° nur unwesentlich ab.

Wolf zeigt in seiner Arbeit, dass die in Biegeversuchen ermittelte Lebensdauer von Parallelschlagseilen mit Stahleinlage von der Sperrung der Litzen abhängt [Wolf1987]. Briem weist des Weiteren darauf hin, dass bei einer Litzenberührung ein Verschleiß an den Litzen auftreten kann und dies zu einer Minderung der Bruchkraft führt (vgl. [Briem1995] u. [Briem1996]).

3.5 Lastumverteilung unter dem Einfluss der Verdrehung

Bei einer Verdrehung von Drahtseilen ändern sich u. a. die Schlaglängen der im Seil befindlichen Litzen und Drähte. Der geometrische Zusammenhang ist in Abbildung 3.6 analog zu [Feyrer2007] dargestellt.

Ein Aufdrehen des Seil ($\omega < 0$) hat bei Litzen, die in gleicher Richtung wie die Außenlitzen verseilt sind, eine Vergrößerung von L zur Folge, während ein Zudrehen ($\omega > 0$) eine Verkleinerung von L hervorruft. Mit den geometrischen Abhängigkeiten aus Abbildung 3.6 u. a. wird in [Feyrer2007] die Längenänderung von Litzen in Richtung

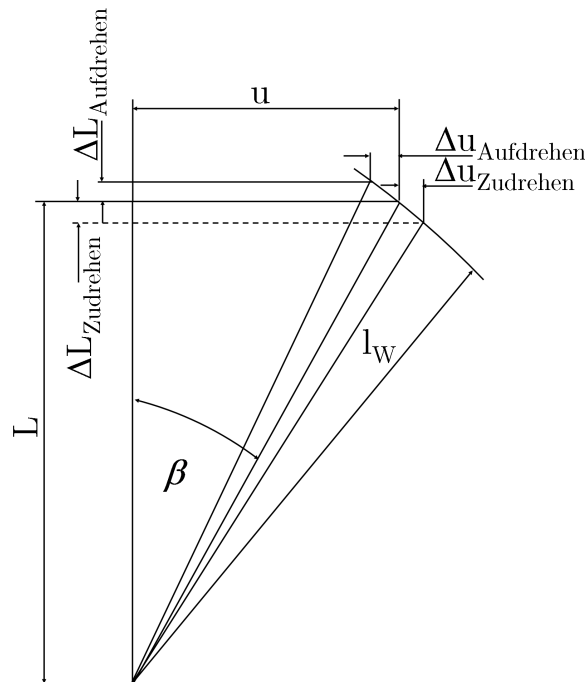


Abbildung 3.6: Zusammenhänge der axialen Längenänderung (analog zu [Feyrer2007])

der Seilachse in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω , des Litzenwindungsradius R_j und des Litzenschlagwinkels β_j wie folgt hergeleitet:

$$\Delta L_j = L \sqrt{1 - 2 \cdot R_j \cdot \omega \cdot \tan \beta_j - R_j^2 \cdot \omega^2} - L \quad (3.11)$$

Die jeweilige Änderung in Bezug auf die ursprüngliche Länge in Seilachsrichtung ergibt sich zu:

$$\epsilon_j = \frac{\Delta L_j}{L} \quad (3.12)$$

Innerhalb eines Seilverbandes mit j Litzenlagen kann es durch eine Verdrehung des Seils vorkommen, dass unterschiedliche Längenänderungen in Seilachsrichtung in Abhängigkeit der Litzenlage auftreten. Bei einer seitlichen Betrachtung des Seilquerschnitts im verdrehten Zustand, würde dieser bei einem Seil mit $j > 1$ eine Unebenheit aufweisen, d.h. die Litzenlagen würden sich in ihrer jeweiligen Länge in Seilachsrichtung unterscheiden. Wenn der Seilquerschnitt als eben betrachtet wird, werden die theoretisch gedachten „kürzesten“ Litzen am meisten gedehnt und damit am stärksten auf axiale Spannung, hervorgerufen durch die Längenänderung, beansprucht. Die in Abbildung 3.7 dargestellten Zustände eines Beispielseils der Machart 6x36WS-IWRC sZ zeigen die theoretischen Längenänderungen in Seilachsrichtung der einzelnen Litzenlagen im „zugesdrehten“ ($\omega > 0$) sowie im „aufgedrehten“ ($\omega < 0$) Fall. Als Referenz ist die

Seilgeometrie im „unverdrehten“ ($\omega = 0$) Zustand ebenfalls dargestellt. Die Längenänderung der Drähte in Richtung der Seilachse wird in den grafischen Veranschaulichungen vernachlässigt.

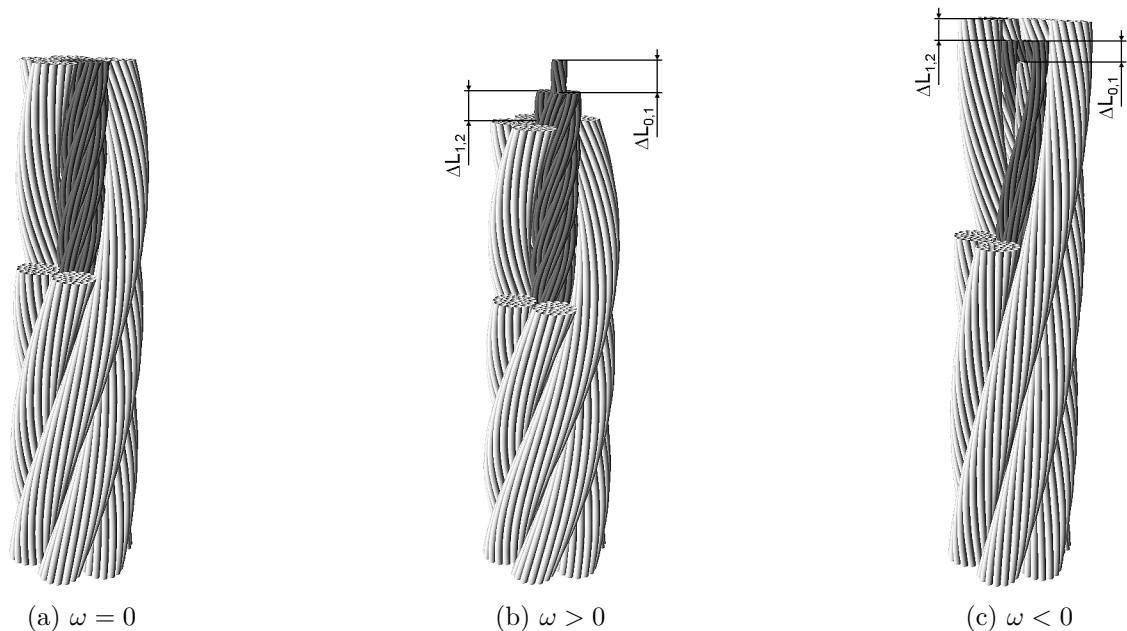


Abbildung 3.7: Längenänderung der Litzenlagen in Richtung der Seilachse bei verschiedenen Verdrehzuständen

Die Längenänderung der Drähte in axialer Richtung der Litzen verhält sich analog zu der Längenänderung der Litzen in Seilachsrichtung und wird in [Feyrer2007] beschrieben. Ist das Seil in Kreuzschlag verseilt, drehen sich bei einem Zudrehen des Seils die Litzen auf. Eine gegensätzliche Längenänderung tritt ein. Bei Gleichschlageilen drehen sich die Litzen unter einer Verdrehung achsenbezogen in die gleiche Richtung wie das Seil. Da die Windungsradien der Drähte im Vergleich zu den Litzen in der Regel kleiner sind und daher die Längenänderung in Seilachsrichtung entsprechend kleiner ist, wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter auf die Längenänderung der Drähte unter Verdrehung eingegangen²⁵.

Die dargestellten Diagramme in den Abbildungen 3.8 bis 3.12 zeigen die Veränderung der Litzenlänge in Bezug zur ursprünglichen Länge der jeweiligen Litzenlage für die untersuchten Seilkonstruktionen²⁶.

²⁵Als beispielhafte Veranschaulichung beträgt bei der untersuchten Seilkonstruktion 8x19W - IWRC und einem Verdrehwinkel von $\omega = 1080^\circ/100d$ die relative Längenänderung der Außenlitze im Betrag das 5,7fache der relativen Längenänderung eines Außendrahtes dieser Litze.

²⁶Die für die numerischen Berechnungen verwendeten geometrischen Größen wurden in der projektbezogenen und vom Autor betreuten Bachelorarbeit [Herrmann2011] ermittelt.

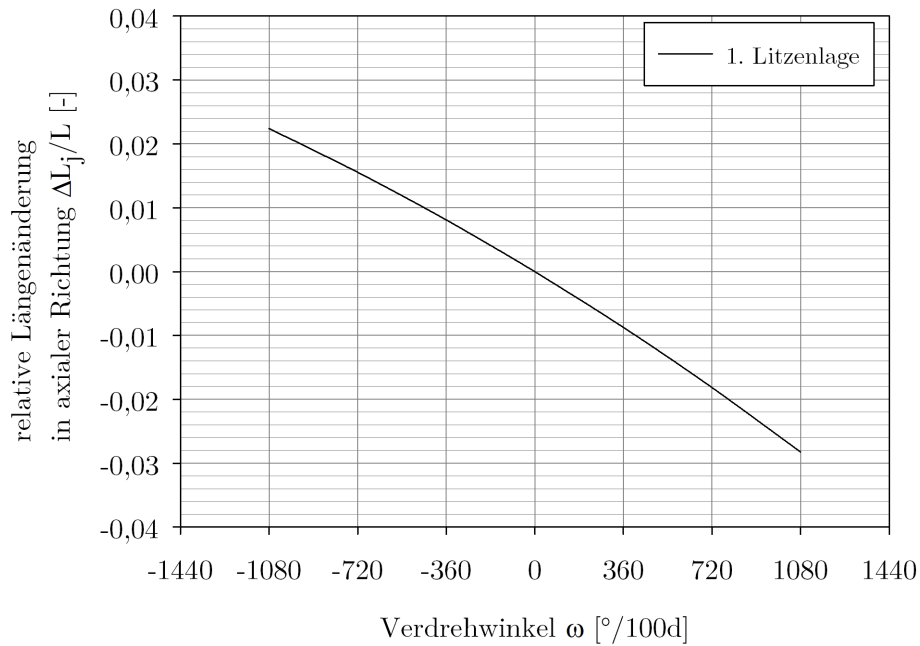


Abbildung 3.8: Längenänderung der Litzenlagen in Seilachsrichtung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 12 mm 8x19W-FC sZ

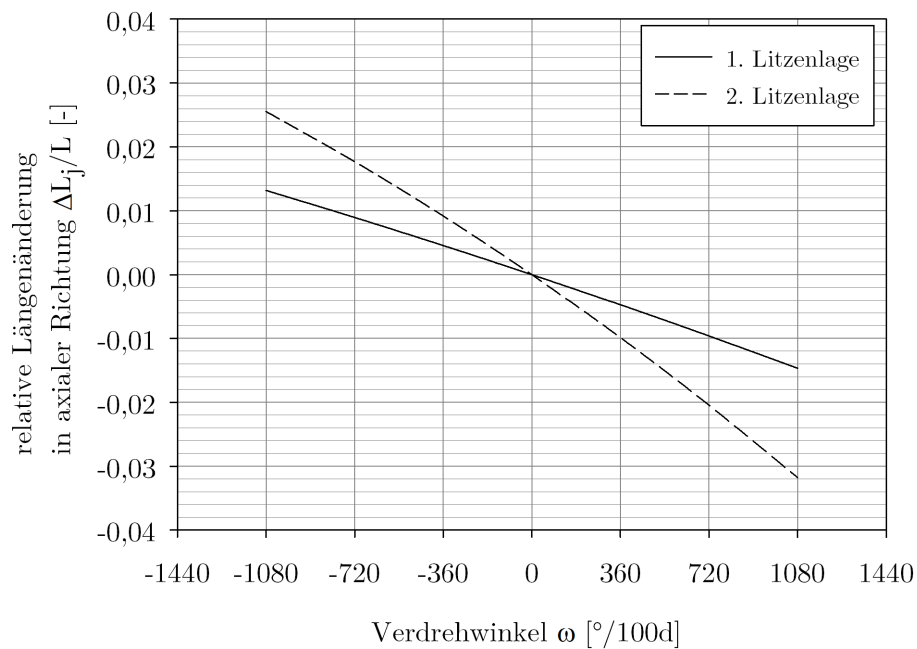


Abbildung 3.9: Längenänderung der Litzenlagen in Seilachsrichtung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 12 mm 8x19W-IWRC sZ

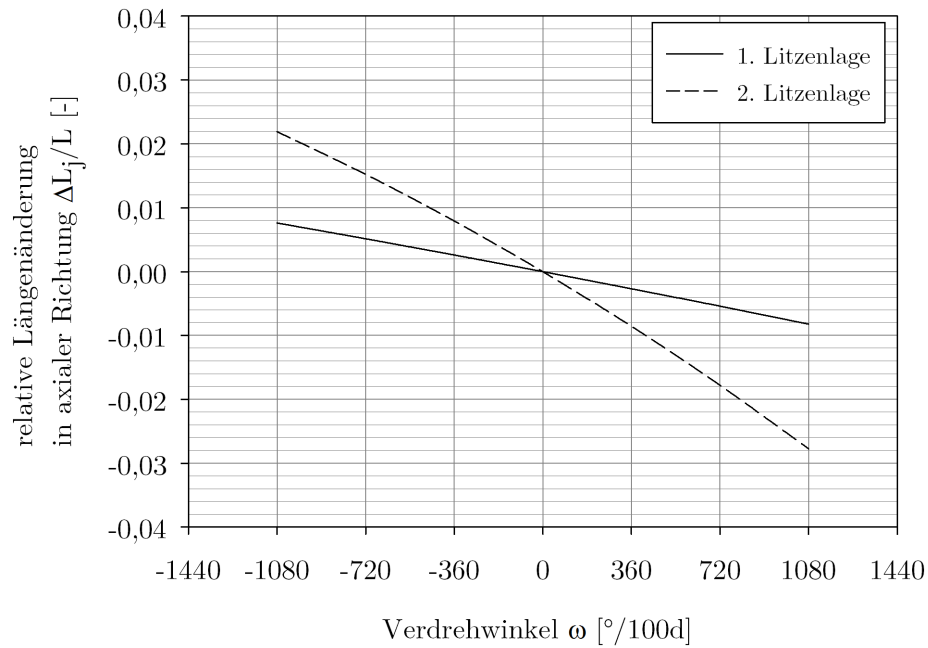


Abbildung 3.10: Längenänderung der Litzenlagen in Seilachsrichtung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 12 mm 6x36WS-IWRC sZ

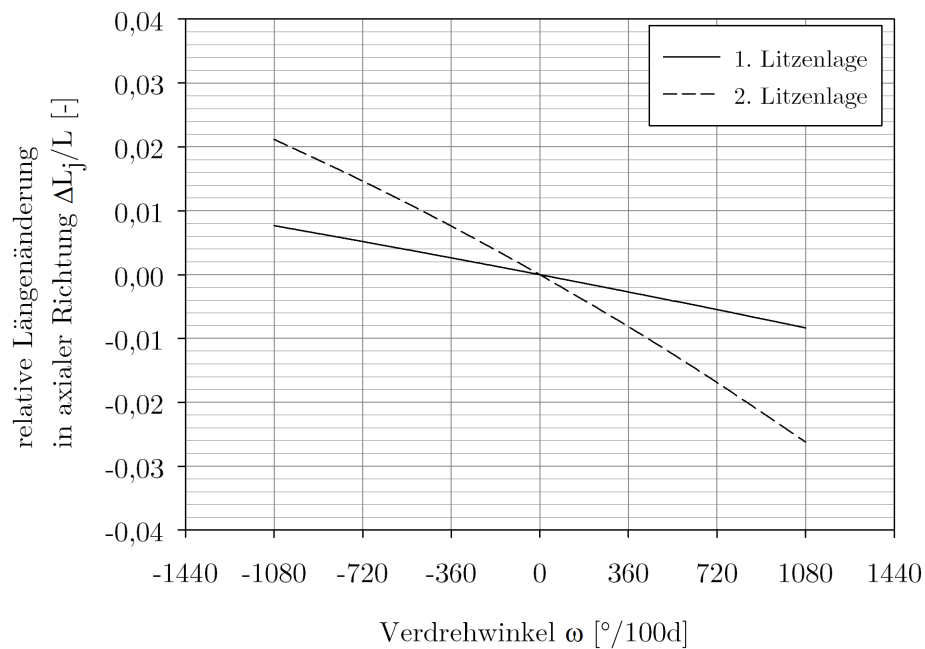


Abbildung 3.11: Längenänderung der Litzenlagen in Seilachsrichtung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 16 mm 6x36WS-IWRC sZ

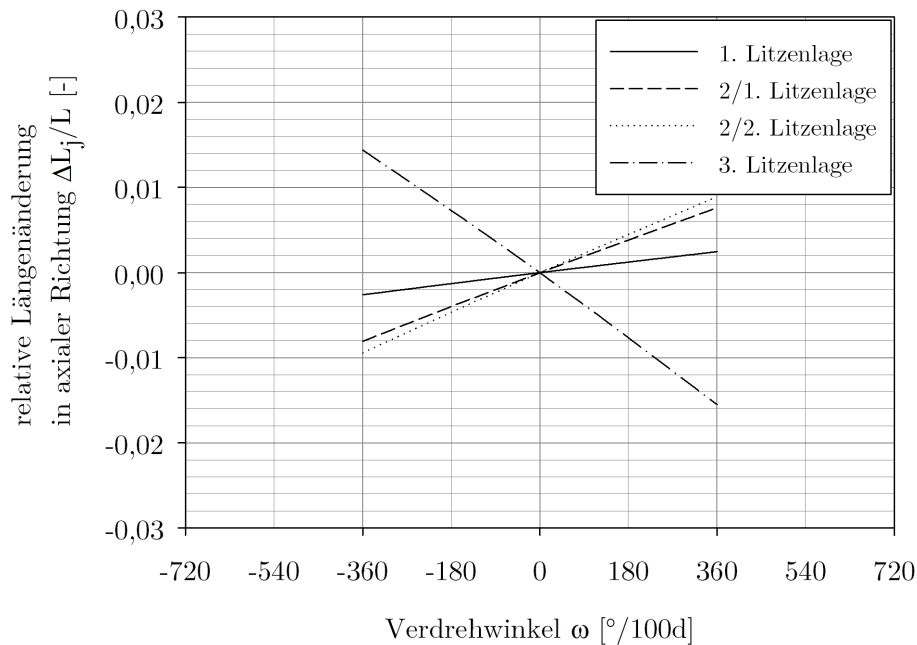


Abbildung 3.12: Längenänderung der Litzenlagen in Seilachsrichtung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 12 mm 35(W)x7 sZ

Aus den Diagrammen in Abbildung 3.8 bis 3.12 ist ersichtlich, dass die einzelnen Litzenlagen der betrachteten Seilkonstruktionen sich unter Verdrehung unterschiedlich in Seilachsrichtung längen bzw. verkürzen (vgl. Abbildung 3.7). Da bei der Seilkonstruktion 8x19W - FC lediglich eine Litzenlage vorhanden ist, entspricht die Längung der Litzen in Seilachsrichtung auch der Längung des Seils (Abbildung 3.8). Feyrer betrachtet hierzu u. a. die Längenänderung der Drähte, die bei einem einlagigen Rundlitzenseil mit Fasereinlage auftreten [Feyrer2007]. Bei den weiteren hier untersuchten Seilkonstruktionen liegen unter Berücksichtigung der Stahleinlage mehrere Litzenlagen vor, deren Litzenlängen in Seilachsrichtung sich unter Verdrehung entsprechend ihrer geometrischen Ausgangsparameter, wie z. B. Litzenschlaglänge, Schlagrichtung und Windungsradius, jeweils unterschiedlich ändern. Bei der Seilkonstruktion 8x19W-IWRC ist die relative Längenänderung etwas größer als bei der Seilkonstruktion 6x36WS-IWRC, wobei die Differenz zwischen erster und zweiter Litzenlage nicht größer ist (vgl. Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10). Ein nahezu identischer Verlauf liegt bei den unterschiedlichen Durchmessern der Seilkonstruktion 6x36WS-IWRC vor (vgl. Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11). Auffallend ist die gegenläufige Verseilungsrichtung bei der Seilkonstruktion 35(W)x7 in Abbildung 3.12, welche bei gleichem Verdrehgrad je nach Litzenlage j eine Verlängerung oder eine Verkürzung der Litzen in Seilachsrichtung hervorruft. Wird das mehrlagige Spiralrundlitzenseil verdreht, findet somit eine gegenläufige Längenänderung derjenigen Litzenlagen statt, die in unterschiedlicher Richtung verseilt sind. Diejenige

Litzenlage, deren Längung am kleinsten ist bzw. deren Kürzung in Seilachsrichtung am größten ist, wird im Verhältnis höher belastet (vgl. Abbildung 3.7). Dies kann bei Vorhandensein eines Stahlkerns und einer negativen Verdrehrichtung ($\omega < 0$; Aufdrehen) der Kern selbst sein, da dieser -vereinfacht angenommen- seine Länge in Abhängigkeit der Verdrehung nicht ändert.

4 Versuchsgrundlagen

4.1 Prüfstand

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden Prüfmaschinen des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart verwendet.

Für dynamische Biegeversuche wurden Dauerbiegemaschinen verwendet, die durch zyklische Rotationsbewegungen den Lauf von Seilen über Seilscheiben abbilden (vgl. Abbildungen 1.1 u. 4.3).

Die Lastaufbringung in axialer Richtung zur Messung der Bruchkraft und zur Ermittlung der Drehmomentkonstanten erfolgte auf einer Zugprüfmaschine mit hydraulischem Zylinder.

4.1.1 Dauerbiegemaschine

Die verwendeten Dauerbiegemaschinen sind so konzipiert, dass durch einen E-Motor und eine Schubstange eine oszillierende Rotationsbewegung an der Umlenkscheibe entsteht. Diese Rotationsbewegung wird auf das Versuchsseil übertragen, welches in einem Umschlingungswinkel über eine gelagerte und nicht angetriebene Versuchsscheibe läuft und diese mitbewegt. Mittels der Einstellung von Schubstange und Exzentrerscheibe, kann der Rotationswinkel der Umlenkscheibe und somit der Hub bestimmt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Dauerbiegemaschinen und Abbildungen befinden sich in [Feyrer1983b].

Zur Durchführung der Versuche wurden die am IFT vorhandenen Dauerbiegemaschinen verwendet, die sich in beschriebenem Funktionsprinzip²⁷ nicht unterscheiden. Stellvertretend für die verwendeten Dauerbiegemaschinen stehen die beiden Typen 3 und 7²⁸, die sich vornehmlich in ihren Leistungskennwerten²⁹ unterscheiden.

²⁷Das Funktionsprinzip der verwendeten und am IFT vorhandenen Dauerbiegemaschinen wird bereits seit mehreren Jahrzehnten angewandt und hat sich bis heute bewährt. Unzählige Versuche, die nach diesem Prinzip geprüft wurden, bilden die Grundlage für die nach Feyrer aufgestellte Gleichung zur Berechnung der Lebensdauer laufender Drahtseile (vgl. [Feyrer1983b], [Feyrer2000] u. [Feyrer2011]).

²⁸Die Bezeichnung richtet sich nach der institutsinternen Nummerierung und soll hier lediglich zur Unterscheidung dienen.

²⁹Die Leistungskennwerte wurden institutsinternen Unterlagen und [Feyrer1983b] entnommen.

Tabelle 4.1: Kennzahlen Dauerbiegemaschinen

Typ	7	3
max. S [kN]	30	100
max. Hub [mm]	ca. 800	ca. 1400
Prüfstellen	1	1

Mittels der Hubeinstellung kann die Länge der Seilzone festgelegt werden, die auf die Versuchsscheibe alternierend auf- und abläuft. Je nach Einstellmöglichkeiten und Prüfkonfiguration können so Einfachbiegungen oder Doppelbiegungen realisiert werden. Bei einer Einfachbiegung erfährt die Seilbiegezone pro Hub eine Überführung aus dem geraden Zustand in den gekrümmten Zustand (während des Auflaufens auf die Seilscheibe) und wieder eine Überführung in den geraden Zustand (während des Ablaufens von der Seilscheibe) (vgl. u. a. [DIN15020:1974], [VDI2358:1984], [OIPEEC-Recommendation], [Feyrer2000]).

Bei einer Doppelbiegung läuft die Seilbiegezone (im Gegensatz zur Einfachbiegung) einmal komplett über die Versuchsscheibe und zurück in die Ausgangsposition, wobei sie die doppelte Anzahl an Wechseln aus dem geraden in den gekrümmten Zustand erfährt. Die Unterscheidung einer Einfach- zu einer Doppelbiegung mit den geometrischen Zusammenhängen ist in Abbildung 4.1 grafisch dargestellt³⁰.

Da die hier durchgeführten Versuche ausschließlich mit Einfach- bzw. Doppelbiegung gefahren wurden, wird im Folgenden auf die Gegenbiegung als Biegewechselvariante nicht weiter eingegangen.

Die Seilzugkraft wird mittels Gewichtsplatten über einen definierten Hebelarm auf das Versuchsseil über die Versuchsscheibe übertragen. Durch ein manuell zu betätigendes Spannelement wird das Versuchsseil soweit belastet, bis der Hebelarm sich in der waagerechten Position befindet. Eine mögliche Längung des Versuchsseils während des Versuchs kann durch das Spannelement ausgeglichen werden.

³⁰Die Darstellung erfolgt in Anlehnung an institutsinterne Unterlagen und [Schoenherr2005].

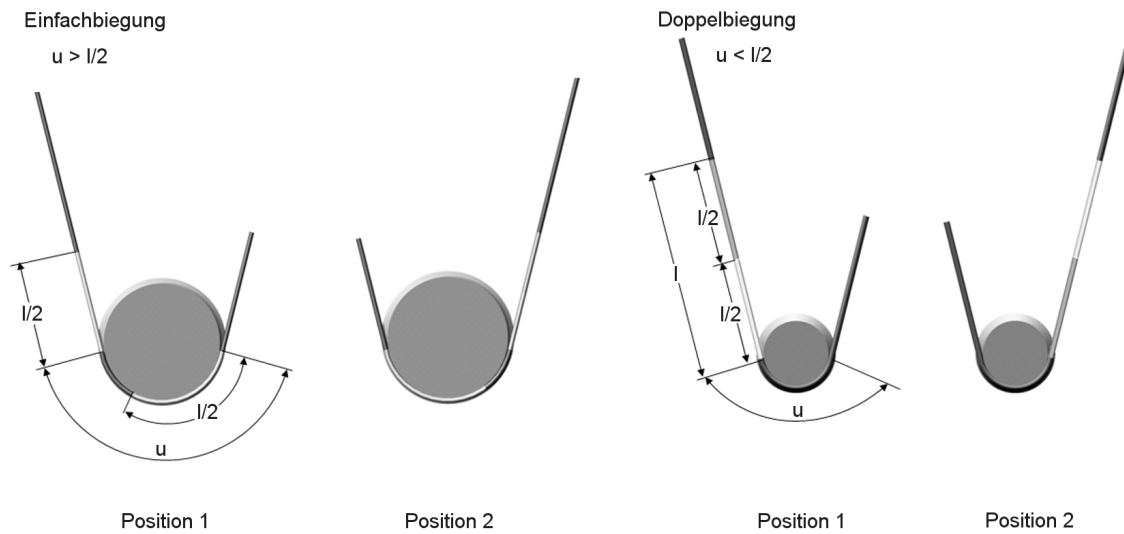
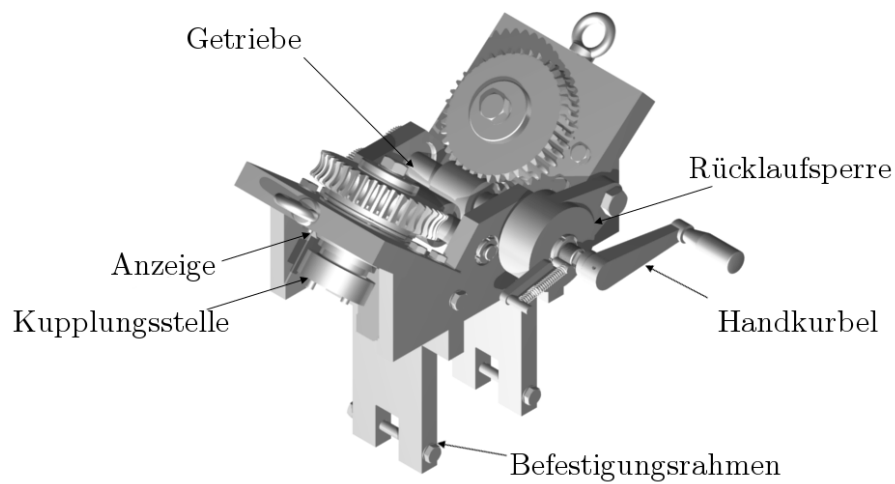


Abbildung 4.1: Grafische Darstellung der Doppel- und Einfachbiegung in Anlehnung an [Schoenherr2005]

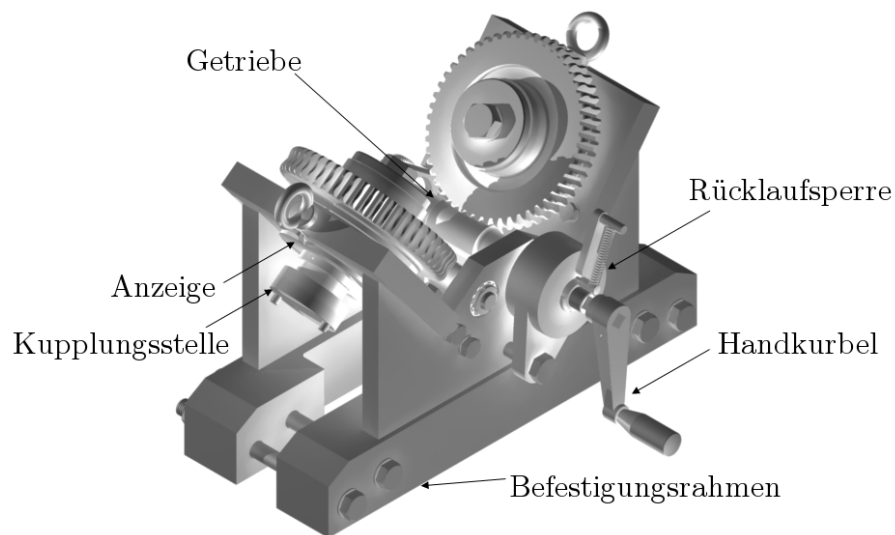
4.1.2 Verdrehvorrichtung

Eine speziell für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konzipierte Vorrichtung³¹ ermöglicht erstmals die maschinelle Verdrehung von Seilen auf Dauerbiegemaschinen. Grundlagen für die Anwendung waren neben der Möglichkeit zur Adaption an die bestehenden Biegemaschinen, eine gleichmäßige Verdrehung des Versuchsseils zu ermöglichen und die Übertragung der Kräfte bzw. Momente während des gesamten Versuchs sicherzustellen. Damit eine Anbringung der Verdrehvorrichtung an die oben beschriebenen, unterschiedlichen Typen der Dauerbiegemaschinen möglich ist und damit einhergehend unterschiedliche Seildurchmesser geprüft werden können, wurden zwei Varianten konstruiert und gefertigt (Typ VBM7: Adaption auf Baureihe Biegemaschine Typ 7; Typ VBM3: Adaption auf Baureihe Biegemaschine Typ 3). Abbildung 4.2 zeigt die beiden Varianten der Vorrichtung, welche im Funktionsprinzip zur Einleitung der Verdrehung identisch sind.

³¹Die Verdrehvorrichtungen wurden in der projektbezogenen und vom Autor betreuten Studienarbeit [Hecht2011] erstellt (verwendetes CAD-Programm: Autodesk Inventor Professional 2010).



(a) Typ VBM7



(b) Typ VBM3

Abbildung 4.2: Verdrehvorrichtungen

Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht über die Spezifikationen³² der beiden Varianten.

Tabelle 4.2: Kennzahlen Verdrehvorrichtungen

Typ	VBM7	VBM3
max. S [kN]	45	101
max. M [Nm]	150	250
Einstellgenauigkeit	1°	1°

³²Die Angaben beziehen sich auf die Anforderungsliste [Hecht2011].

Die Einstellung des Verdrehgrades kann stufenlos erfolgen, sodass eine hohe Einstellgenauigkeit erreicht wird. Die Einstellgenauigkeit wird durch die Anzeigenskalierung auf 1° begrenzt. Die Ausführung der Aufnahme für die Seilendverbindung ermöglicht die Anbringung von Vergusshülsen, welche als Standard am IFT verwendet werden.

Durch die Verbindung der beiden Schneckenwellen mittels Zahnräder erfolgt unter Betätigung der Verdrehvorrichtung eine gleichmäßige und gegenläufige Verdrehung der beiden Abtriebsseiten. Das gleichzeitige Drehen der beiden Enden des Versuchsseils hat den Vorteil des homogenen Verdrehens der Versuchsseile und ermöglicht, dass durch das beidseitige gegenläufige Drehen der Abtriebsseiten lediglich um die Hälfte des absolut einzustellenden Winkels gedreht werden muss.

Auf der gegenüberliegenden Seite der Umlenkscheibe sind Gewichtsplatten entsprechend der Lage und des Gewichtes der jeweiligen Verdrehvorrichtung angebracht. Abbildung 4.3 zeigt die Verdrehvorrichtung des Typs VBM7 in eingebautem Zustand.

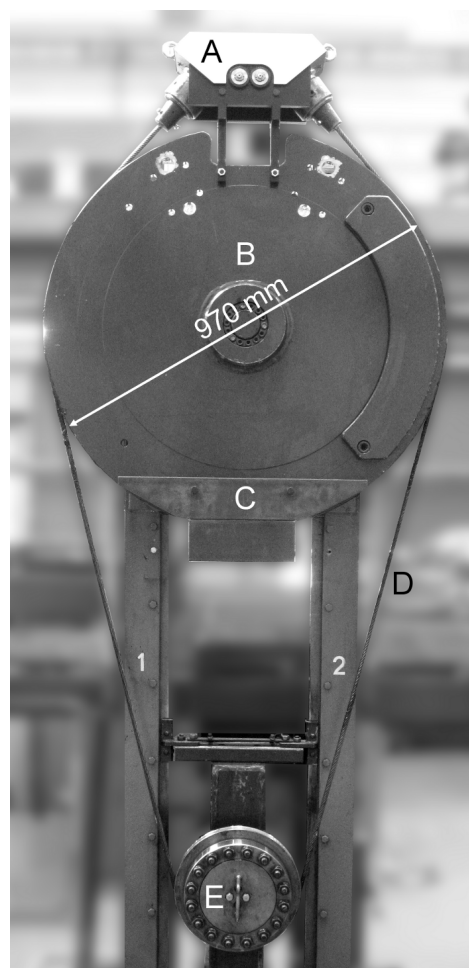


Abbildung 4.3: Aufbau eines Dauerbiegeversuchs mit der Verdrehvorrichtung des Typs VBM7

Das Versuchsseil (D) ist mit der auf der Umlenkscheibe (B) befindlichen Verdrehvorrichtung (A) an beiden Seilenden verdrehsteif verbunden. Bei einer oszillierenden Rotationsbewegung der Umlenkscheibe (B) läuft das Versuchsseil (D) auf die Prüfscheibe (E) auf und in der Gegenrichtung entsprechend von ihr ab. Die an der Umlenkscheibe angebrachten Stahlplatten (C) dienen als Ausgleichsgewicht für die auf der gegenüberliegenden Seite befindliche Verdrehvorrichtung.

4.1.3 Zugprüfmaschine

Zur Ermittlung der Bruchkräfte und der Drehmomentkonstanten der Versuchsseile wurde eine Zugprüfmaschine am IFT verwendet, die abhängig vom verwendeten Querhaupt eine Höchstzugkraft von 200 kN bzw. 2500 kN besitzt. Die Zugprüfmaschine besteht im Wesentlichen aus einem waagrechten Maschinenrahmen, einem daran fixierbaren Querhaupt und einem Hydraulikzylinder zur Kraftaufbringung. Mit der angeschlossenen Steuer- und Regelungseinheit lässt sich die Zugmaschine kraft- oder weggeregelt steuern.

Maschinenseitig befinden sich Laschen, die mittels Bolzen zur Lastübertragung auf die geeignete Seilendverbindung dienen. Zur Messung des entstehenden Seildrehmoments unter Zuglast, wurde die in Abbildung 2.2 dargestellte Vorrichtung verwendet (vgl. Kapitel 2.2).

4.2 Versuchsseile

Um eine möglichst große Bandbreite an konstruktionsbedingten Einflussparametern abdecken zu können, erfolgte die Auswahl in Anlehnung an [Schoenherr2005]. Diese Auswahl an gängigen Seilkonstruktionen, so Schönherr, umfasst die Seilkonstruktionsarten Warrington (W) und Warrington-Seale (WS), einlagige Rundlitzenseile mit Stahleinlage und Fasereinlage sowie einer Variation von sechs und acht Außenlitzen und einem Spiralrundlitzenseil mit drei Litzenlagen (vgl. [Schoenherr2005]). Mit der dargestellten Auswahl ist ein Vergleich der Lebensdauerberechnung nach Feyrer, welche eine Verdrehung unberücksichtigt lässt, mit den hier untersuchten Dauerbiegeversuchen unter verdrehtem und unverdrehtem Seilzustand gewährleistet (vgl. [Feyrer2000] u. [Feyrer2011]). Die Abbildung 4.4 zeigt die jeweilige Seilkonstruktionen.

In Tabelle 4.3 sind die Norm-Bezeichnungen (vgl. [DIN-EN12385-4:2003]) der in Abbildung 4.4 dargestellten Versuchsseile mit den dazugehörigen Nenn-Durchmessern (d_{nenn}) und den gemessenen Ist-Durchmessern (d_{ist}) aufgeführt.

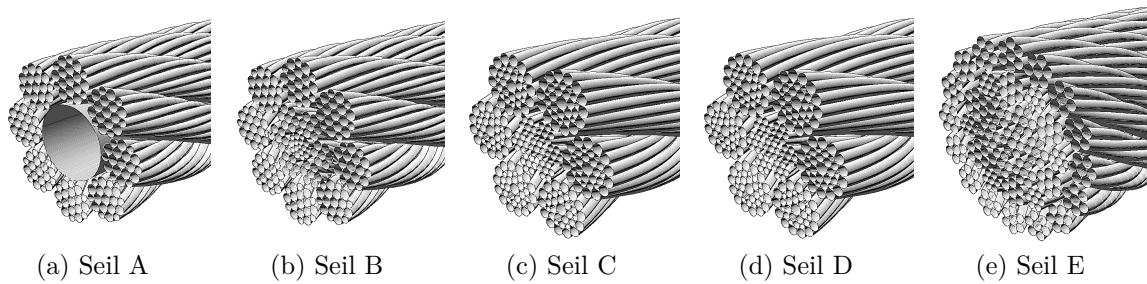


Abbildung 4.4: Seilkonstruktionen der Versuchsseile

Tabelle 4.3: Bezeichnung der Versuchsseile

	A	B	C	D	E
Normbezeichnung	8x19W-FC	8x19W-IWRC	6x36WS-IWRC	6x36WS-IWRC	35(W)x7
d_{nenn} [mm]	12,0	12,0	12,0	16,0	12,0
d_{ist} [mm]	12,4	12,4	12,5	16,3	12,4

Alle Versuchsseile besitzen eine Drahtnennfestigkeit von $R_0 = 1770N/mm^2$, eine Kreuzschlagverseilung³³ (sZ) und eine blanke Drahtoberfläche³⁴ (U).

Untersuchungen von Woernle und Müller haben, so Feyrer, gezeigt, dass bei einem betrachteten Lastfall kein nennenswerter Unterschied in den Versuchsergebnissen von Dauerbiegeversuchen mit blanken oder verzinkten Drähten besteht [Feyrer2007]. Zimmerman und Reemsnyder fanden in Untersuchungen heraus, dass mit steigender Last die Drahtseile mit blanken Drähten eine höhere Biegewechselzahl bis zum ersten Drahtbruch und schließlich bis zum Bruch erreichen, als Drahtseile mit verzinkten Drähten [Zimmerman1983]. Bei allen hier untersuchten Versuchsseilen werden aufgrund der Vergleichbarkeit ausschließlich blanke Drähte verwendet.

Die verwendeten Versuchsseile stammen pro Konstruktion aus jeweils einer Seilcharge um Einflüsse aus verschiedenen Chargen, wie sie u. a. durch das verwendete Material oder den Herstellungsprozess entstehen können, auszuschließen.

4.2.1 Kennwerte der Versuchsseile

Bruchkraft

Zur Ermittlung der wirklichen Bruchkraft F_m der Versuchseile, wurde die in Kapitel 4.1 beschriebene Zugprüfmaschine verwendet. Als Endverbindungen dienten Henkelkonusse mit Metallverguss nach [DIN-EN13411-4:2002]. Die Prüfung der Bruchkraft erfolgte nach [DIN-EN12385-1:2002].

³³Bei einer Kreuzschlagverseilung sind die Drähte innerhalb einer Litze in die entgegengesetzte Richtung geschlagen, als die Litze(n) innerhalb des Seils.

³⁴U = blanke Drahtoberfläche ohne Überzug (vgl. [DIN-EN12385-2:2002]).

Der in der Zugprüfung ermittelte wirkliche Bruchkraftwert F_m muss nach der Norm [DIN-EN12385-1:2002] folgende Bedingung erfüllen:

$$F_m \geq F_{min} \quad (4.1)$$

F_{min} steht dabei für die Mindestbruchkraft, die sich nach [DIN-EN12385-2:2002] wie folgt definiert:

$$F_{min} = \frac{d_{nenn}^2 \cdot R_r \cdot K}{1000} \quad (4.2)$$

Mit den Seilfestigkeitswerten R_r und den in der Norm [DIN-EN12385-4:2003] angegebenen Bruchkraftfaktoren K kann die jeweilige Mindestbruchkraft für die Versuchsseile ermittelt werden. In Tabelle 4.4 sind die wirklichen Bruchkräfte der jeweiligen Mindestbruchkraft gegenübergestellt.

Tabelle 4.4: Bruchkraftwerte

	A	B	C	D	E
F_m [kN]	90,66	102,59	116,25	184,74	119,70
F_{min} [kN]	74,68	90,74	90,74	161,31	91,76

Die Bedingung in Gleichung (4.1) ist bei allen Versuchsseilen erfüllt.

Drehmomentkonstanten

Die Bestimmung der Drehmomentkonstante eines Drahtseils im unverdrehten Ausgangszustand kann, wie in Kapitel 2.2 bereits aufgezeigt, mittels geometrischer Kenngrößen des Seilaufbaus oder auch experimentell bestimmt werden (vgl. Messprinzip in Abbildung 2.2).

Die Diagramme³⁵ in den Abbildungen 4.5 bis 4.9 zeigen die jeweiligen Drehmomentkurven für die unterschiedlichen Ausgangsverdrehwinkel.

Die Drehmomentkurven des Versuchsseils E sind typisch für ein Spiralrundlitzenseil mit drei Litzenlagen. Der Anstieg des Drehmoments über der bezogenen Seilzugkraft S/d^2 ist flacher als bei den Messungen mit den einlagigen Rundlitzenseilen. Ursache hierfür ist die gegenläufige Verseilung der Litzenlagen bei Spiralrundlitzenseilen. Ein vollständiger Ausgleich der durch die Zugkraft und Wendelstruktur der Litze entstehenden Drehmomente erfolgt jedoch nicht. Nach dem Standard [DIN-EN12385-2:2002]

³⁵Die Messwerte für die dargestellten Diagramme wurden in der projektbezogenen und vom Autor betreuten Bachelorarbeit [Herrmann2011] ermittelt.

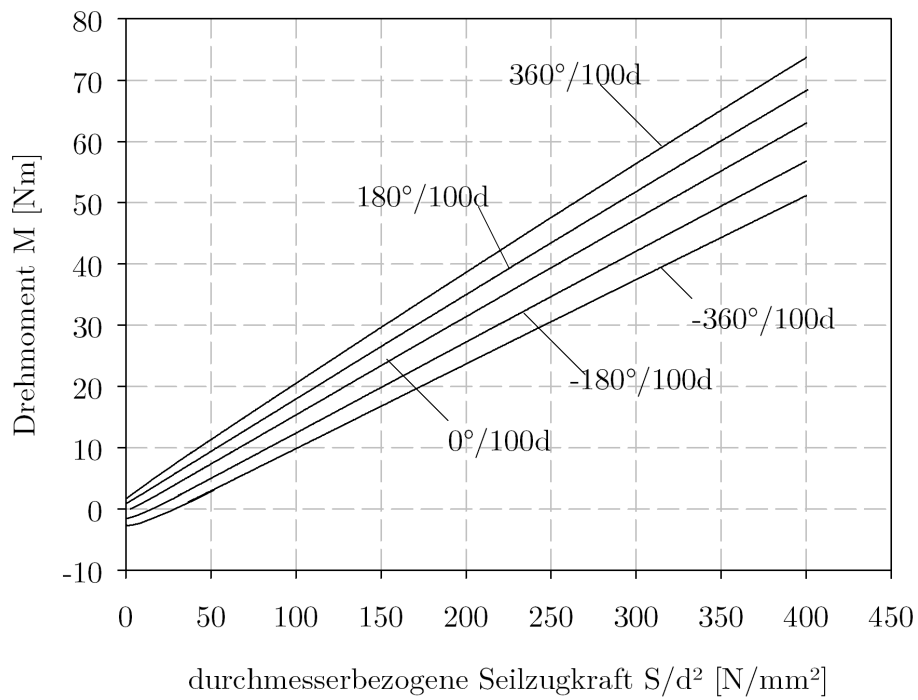


Abbildung 4.5: Drehmomentdiagramm; 12 mm 8x19W-FC sZ

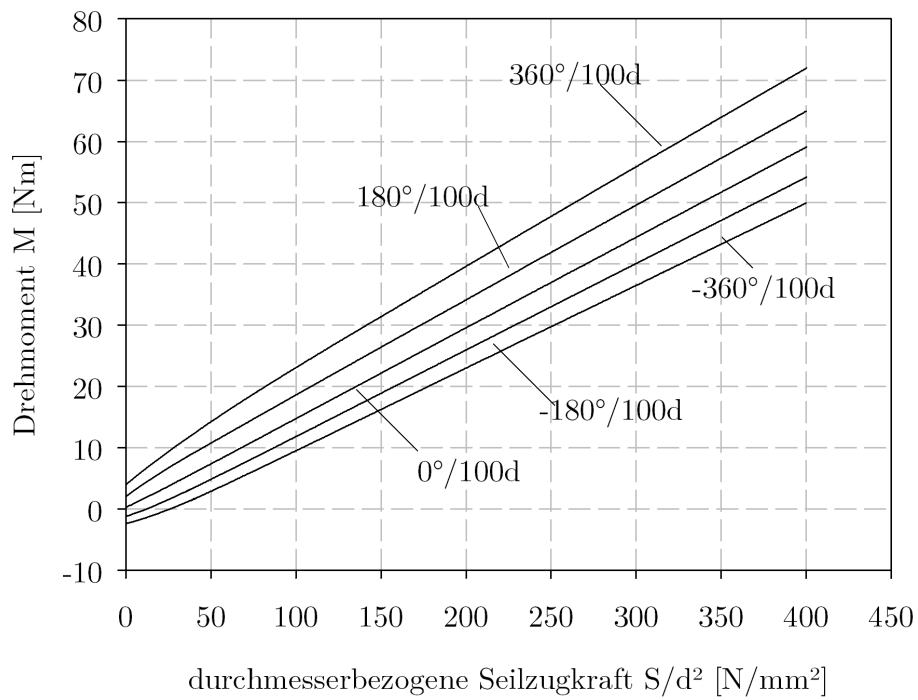


Abbildung 4.6: Drehmomentdiagramm; 12 mm 8x19W-IWRC sZ

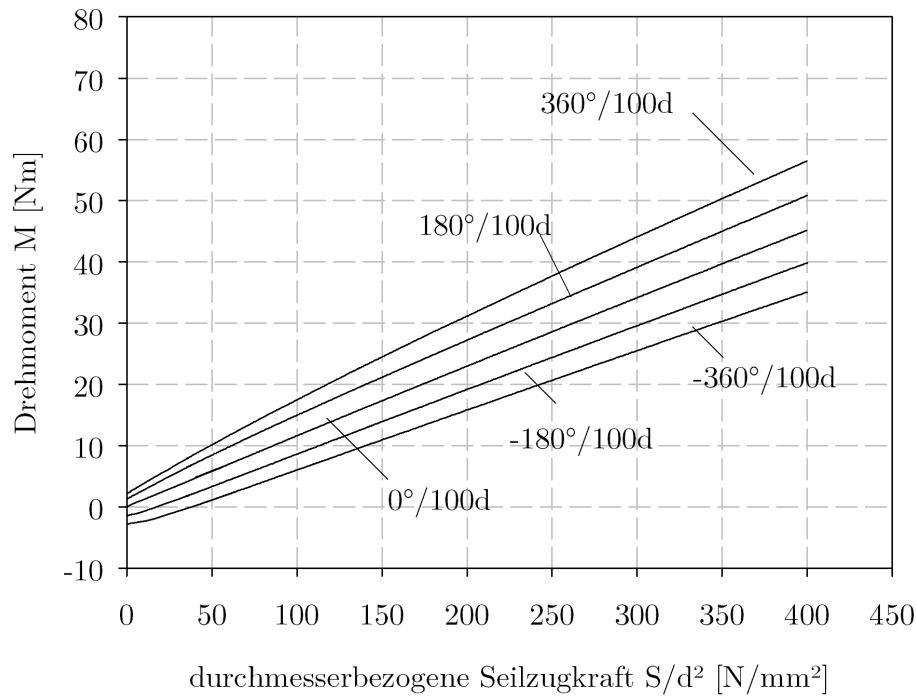


Abbildung 4.7: Drehmomentdiagramm; 12 mm 6x36WS-IWRC sZ

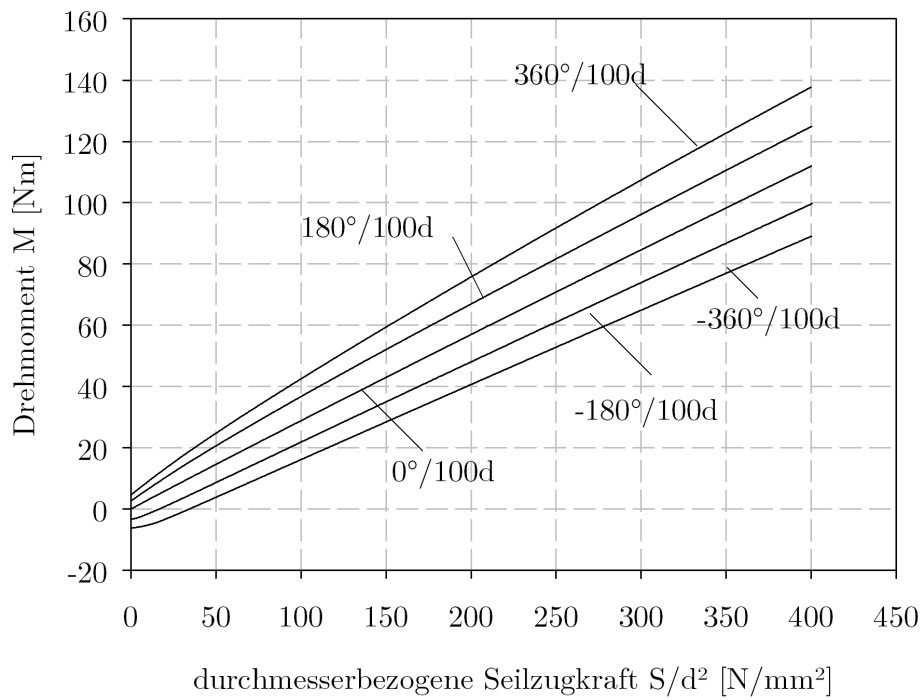


Abbildung 4.8: Drehmomentdiagramm; 16 mm 6x36WS-IWRC sZ

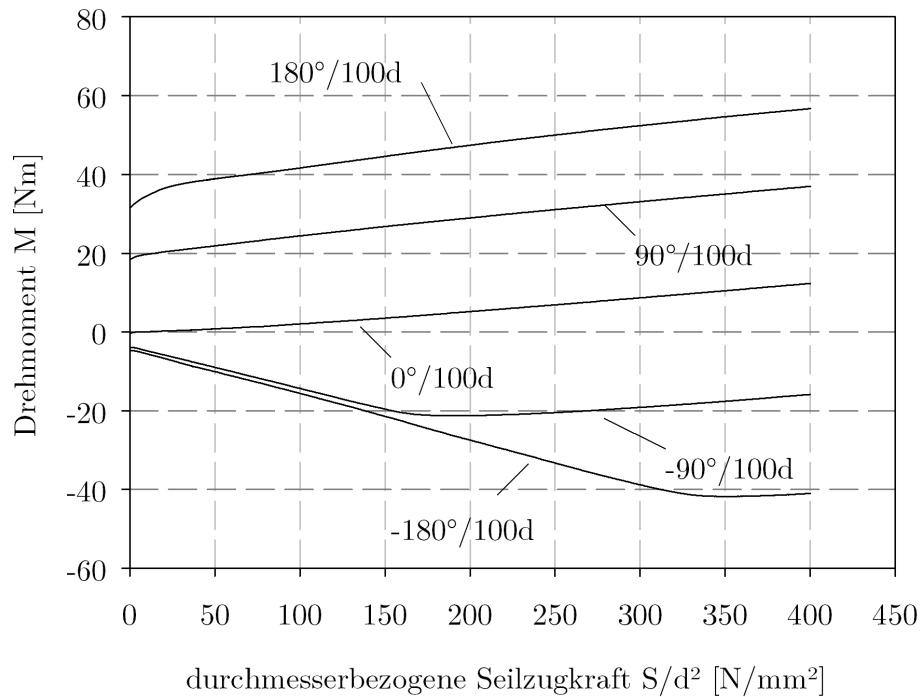


Abbildung 4.9: Drehmomentdiagramm; 12 mm 35(W)x7 sZ

wird das Versuchsseil E auch als drehungsarmes Seil deklariert. Die verhältnismäßig flache Steigung spiegelt sich auch in der c_1 -Konstante in Tabelle 4.5 wider.

Tabelle 4.5: Drehmomentkonstanten [Herrmann2011]

	A	B	C	D	E
$c_{1,theo}$	0,098	0,109	0,079	0,082	0,032
$c_{1,exp}$	0,095	0,090	0,070	0,071	0,021
$c_{2,exp}$	0,189	0,140	0,163	0,210	0,131
$c_{3,exp} \cdot 10^3$	0,401	0,629	0,472	0,459	11,21

Der Gültigkeitsbereich der Konstanten c_1 bis c_3 bezieht sich bei den einlagigen Rundlitzenseilen auf $\pm 360^\circ/100d$ und bei dem Spirallitzenseil auf $\pm 180^\circ/100d$.

Die geringfügigen Abweichungen zwischen den experimentell und theoretisch ermittelten Werten in Tabelle 4.5 können durch Abweichungen in den geometrisch bestimmten Größen entstehen.

Die ermittelten Werte decken sich –mit teilweise geringfügigen Abweichungen– mit den von Feyrer und Schiffner beschriebenen Werte für die Drehmomentkonstanten mit dazugehöriger Standardabweichung ([Feyrer1986] u. [Feyrer2007]). Lediglich bei Versuchsseil B weichen die Konstanten c_2 und c_3 deutlich von den von Feyrer und Schiffner ermittelten Werten ab.

Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Gültigkeitsbereich, da Feyrer und Schiffner den Gültigkeitsbereich ihrer Angaben für Seile mit IWRC auf $\pm 180^\circ/100d$ beschränken. Die Abweichung der c_3 -Konstante bei Seil A liegt ebenfalls über der von Feyrer und Schiffner genannten Standardabweichung. Ein etwas höherer Wert von c_3 bei gleicher Seilkonstruktion wurde auch von Schönherr ermittelt [Schoenherr2005]. Die ermittelte c_1 -Konstante für das nach [DIN-EN12385-2:2002] definierte drehungsarme Seil, trifft den von Feyrer angegebenen Wert von $c_1 = 0,026$ (Standardabweichung $s = 0,012$) mit verhältnismäßig hoher Genauigkeit [Feyrer2007]. Nach Feyrer kann das Versuchsseil E einer drehungsfreien Seilkonstruktion zugeordnet werden, wobei die Norm [DIN-EN12385-2:2002] keine Unterscheidung zwischen drehungsarm und drehungsfrei vornimmt [Feyrer2007].

4.3 Versuchsparameter

Mit der Auswahl der Versuchsseile (Kapitel 4.2) sind bereits konstruktionsbedingte Auswirkungen auf die jeweilige Lebensdauer verknüpft. Diese Auswirkungen sind entsprechend von den Umgebungsparametern wie z. B. Seilzugkraft oder Biegeradius abhängig (vgl. Kapitel 2.3). Als wesentliche Variationsparameter gelten in den hier beschriebenen Dauerbiegeversuchen

- Seilkonstruktion
- Seildurchmesser
- D/d -Verhältnis
- durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2
- Verdrehwinkel ω

Mit der aufgeführten Parameterauswahl kann der Einfluss einer Seilverdrehung in Abhängigkeit der Seilkonstruktion, der vorliegenden Last, des D/d -Verhältnisses und des Seildurchmessers systematisch bestimmt werden. Darüber hinaus wird die Anwendung der Lebensdauerformel nach Feyrer für die spätere Lebensdauerbestimmung mit dem Parameter ω ermöglicht [Feyrer2011].

Das Material sowie die Rillenform der verwendeten Seilscheiben wurden entsprechend dem jeweiligen Seildurchmesser konstant gehalten.

Da die Seilschmierung, wie in Kapitel 2.3 bereits beschrieben, einen wesentlichen Einfluss auf die Seillebensdauer hat und um eine Vergleichbarkeit mit bisherigen Versuchen

zu ermöglichen, wurden alle Versuchsseile für die hier durchgeführten Dauerbiegeversuche aufgefettet.

4.3.1 Versuchsaufstellung

Die Versuchsparameter der Dauerbiegeversuche wurden so ausgewählt, dass sie eine Realitätsnähe besitzen und im Hinblick auf die Anzahl an Versuchen in einem festgelegten Zeitrahmen keine zu langen Versuchszeiten erfordern.

Als Lastparameter wurden zwei Seilzugkräfte (S) bzw. durchmesserbezogene Seilzugkräfte (S/d^2) ausgewählt:

- $S/d^2 = 117N/mm^2$
- $S/d^2 = 195N/mm^2$

Das Verhältnis des Seilscheibendurchmessers D ($D = D_{Rillengrund} + d_{nenn}$) zum Seilennendurchmesser d_{nenn} wird als D/d -Verhältnis bezeichnet und in den durchgeführten Versuchen mit den Werten

- $D/d = 16$
- $D/d = 25$

festgelegt.

Aufgrund des zunächst unbekanntes Einflusses der Verdrehung auf die Lebensdauer von Seilen, war es erforderlich, durch die ersten Dauerbiegeversuche die jeweiligen Verdrehgrade zu bestimmen.

In Voruntersuchungen zu dem hier dargestellten Forschungsprojektes hat sich gezeigt, dass ein untersuchtes zweilagiges Spiralschlitzenseil innerhalb eines relativ kleinen Verdrehwinkelbereichs bereits eine signifikante Reduktion der ertragbaren Biegewechselzahl erfährt (vgl. [Weber2010]). Mit dieser Erkenntnis und ersten Ergebnissen aus hier vorgenommenen Dauerbiegeversuchen mit verdrehten einlagigen Schlitzenseilen, wurden für einlagige Schlitzenseile höhere Verdrehwinkel angesetzt als für das Spiralschlitzenseil (Versuchsseil E) (vgl. [Weber2010]). Die Verdrehwinkel wurden in ihrem Wert jeweils im positiven und im negativen Verdrehwinkel angewendet. Die Verdrehwinkel für einlagige Schlitzenseile sind:

- $\omega = 0^\circ/100d$
- $\omega = \pm 360^\circ/100d$
- $\omega = \pm 720^\circ/100d$
- $\omega = \pm 1080^\circ/100d$

Für das Spiralrundlitzenseil:

- $\omega = 0^\circ/100d$
- $\omega = \pm 45^\circ/100d$
- $\omega = \pm 90^\circ/100d$
- $\omega = \pm 180^\circ/100d$

Versuchsmatrix

Die Versuchsmatrix der Dauerbiegeversuche mit den oben aufgeführten Parametern ist für eine Seilkonstruktion und einen Seildurchmesser in Abbildung 4.10 dargestellt.

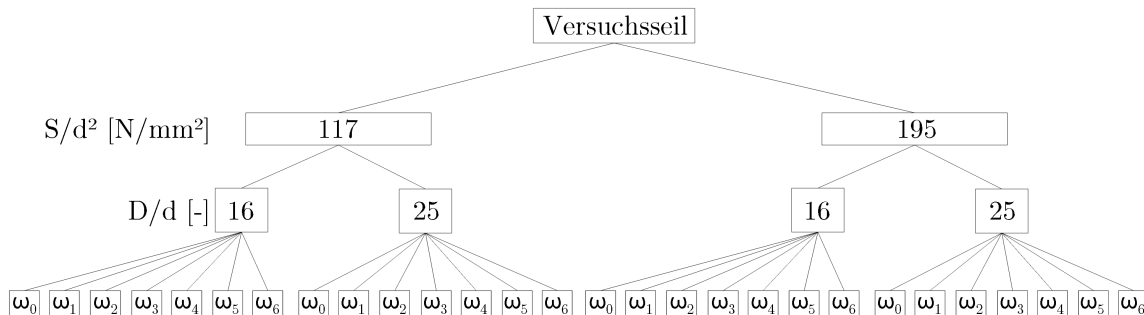


Abbildung 4.10: Versuchsmatrix für eine Seilkonstruktion und einen Durchmesser

Bei vier Seilkonstruktionen und zwei verschiedenen Durchmessern ergibt sich aus der Versuchsmatrix eine Versuchsanzahl von 140 Dauerbiegeversuchen.

Neben den Dauerbiegeversuchen ohne Verdrehung ($\omega = 0^\circ$) ist es nach Ansicht des Autors sinnvoll, diskrete Versuchsparameter systematisch auszuwählen und Wiederholversuche zur Absicherung der Versuchsergebnisse zu fahren.

Für die in Kapitel 4.2 dargestellten Versuche ergeben sich innerhalb des Versuchsprogramms zusätzlich zu den Dauerbiegeversuchen 10 weitere Versuche, die sich wie folgt zusammensetzen:

- 5 Zugversuche zur Ermittlung der Bruchkraft
- 5 Drehmomentversuche zur Ermittlung der Drehmomentkonstanten

Insgesamt ergeben sich somit innerhalb des systematischen Versuchsprogramms 150 Versuche zuzüglich der geplanten Wiederholversuche zur Absicherung der Versuchsergebnisse.

4.3.2 Versuchsscheiben

Als Versuchsscheiben wurden Stahlscheiben mit gehärteter Rundrille verwendet. Die Härtung der Rille hat gegenüber einer ungehärteten Stahlrille u. a. den Vorteil, dass eine gewisse Formbeständigkeit der Rille gegeben ist (vgl. [Feyrer2000]). Die geometrischen Größen leiten sich aus den jeweiligen D/d -Verhältnissen und den Seildurchmessern der Versuchsseile ab, sowie aus den am IFT vorhandenen Nabenabmessungen. Des Weiteren wurden folgende Parameter festgelegt:

- Rillenradius³⁶ $r = 0,53 \cdot d_{nenn}$
- Rillenöffnungswinkel $\gamma = 60^\circ$

4.4 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf ist von der Probenherstellung bis zum Versuchsende während des gesamten Forschungsprojektes gleichbleibend. Damit werden sämtliche Einflüsse, die durch die Einrichtungprozedur entstehen können, über alle Versuchsreihen hinweg konstant gehalten.

Grundlegend gilt für alle durchgeführten Versuche folgender Versuchsablauf:

- Visuelle Kontrolle des ausgewählten Seilstücks
- Abbinden und Abtrennen des Versuchsseils
- Herstellen von Metallvergüssen ([DIN-EN13411-4:2002])
- Auffetten des Versuchsseils
- Visuelle und taktile Kontrolle der Prüfscheibe

³⁶In Anlehnung an die DIN 15020 [DIN15020:1974].

- Einbau in den Prüfstand
- Ablesen während des Versuchs
- Kennzeichnung der Probe nach Versuchsende

4.4.1 Abbruchkriterien

Während des Versuchsablaufs wurden die Prüfkörper und die Versuchseinrichtungen auf etwaige Auffälligkeiten überprüft, um gleichbleibende Versuchsbedingungen zu gewährleisten und damit einhergehend die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu ermöglichen. Bei Erfüllung folgender Kriterien wurde der Versuch als ungültig abgebrochen:

- Auffälligkeit am ausgewählten Seilstück (z. B. Verseilfehler, Oberflächenschäden oder Knick)
- feststellbarer Winkelversatz der Endverbindungen um die Seilachse (vgl. Abb. 4.11)
- Abweichen von der Einrichtprozedur (siehe S. 89)
- feststellbare Einflüsse (wie z. B. geschädigte Seilscheibe)
- nachträgliches Drehen³⁷ der Probe um $\varphi > 2^\circ$

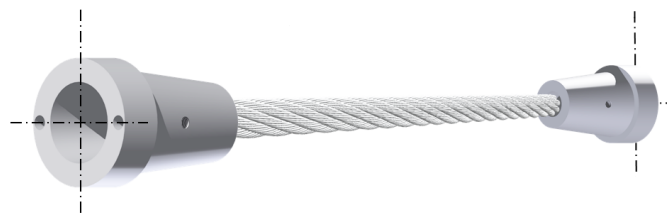


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Vergusskegelposition

Die Abbildung 4.11 stellt schematisch die Anbringung der Vergusskonusse an ein Versuchsseil und deren Ausrichtung zueinander dar (horizontale und vertikale Symmetrielinien der beiden Endverbindungen verlaufen jeweils parallel zueinander).

³⁷Dieser niedrige Wert des maximal zulässigen Drehens der Probe von $\varphi_{max} = 2^\circ$ bis zum Versuchsende stellt eine hohe Versuchsgüte sicher, berücksichtigt aber minimale Drehungen, die u. a. durch den Rückstoß beim Bruch der Probe entstehen können.

4.4.2 Versuchsende

Das reguläre Versuchsende eines Dauerbiegeversuchs ist erreicht, wenn

- min. eine Litze oder
- die Seileinlage gebrochen ist oder
- die Biegemaschine aufgrund des stark beschädigten/verformten Seils nicht mehr lauffähig ist. Dies kann auftreten, wenn z. B. der Seilaufbau signifikant zerstört ist oder sich durch eine korkenzieherartige³⁸ Ausprägung extrem verformt.

Ein Bruch der Seileinlage macht sich u. a. darin bemerkbar, dass sich das Versuchsseil verhältnismäßig stark dehnt und ein Nachspannen aufgrund des benötigten Nachspannweges nicht möglich ist.

4.4.3 Einrichten der Versuchsproben

Das Einrichten der Versuchsseile erfolgte nach festgelegten und konstant gehaltenen Prozeduren, die sich je nach Versuchsanforderungen unterscheiden. Bei den 0° -Versuchen ($\omega = 0^\circ$) wurden die Versuchsseile entsprechend in die jeweilige Biegemaschine eingebaut und mit Last beaufschlagt. Bei dem untersuchten Spiralsrundlitzenseil (Versuchsseil E) wurden zur Abbildung des ungünstigeren Lastfalles die 0° -Versuche ohne Wirbel gefahren.

Ein Wirbel ermöglicht ein Drehen um die Wirbellängsachse bei gleichzeitiger Kraftübertragung. In Praxisanwendungen wird geraten, für drehungsfreie Seilkonstruktionen einen Wirbel zu verwenden, damit sich das Seil um seine Achse bewegen kann und so Zwängungen vermieden werden können ([DIN15020:1974], [Feyrer2000] u. [Verreet2001]). Die Referenzversuche (0° -Versuche) ohne Wirbel beim Versuchsseil E entsprechen einem ungünstigen Lastfall und sind somit zur sicheren Seite hin untersucht.

Die Versuchsseile für die Versuche mit Verdrehung ($\omega \neq 0^\circ$) wurden durchgängig über alle Versuchsreihen hinweg nach einem festgelegten Ablauf eingerichtet. Durch diese konstante Einrichtprozedur unterliegen alle Versuche den gleichen Laborbedingungen. Die einzelnen Schritte, beginnend beim Auflegen auf die Biegemaschine, sind:

- Ausrichten der Verdrehvorrichtung auf die 0° -Stellung
- Aufbringen von Fett auf die Rille der Umlenkscheibe

³⁸Der Begriff „korkenzieherartige Verformung“ wird in der Norm [DIN15020:1974] mit einer Wendelform der Seilachse im unbelasteten Zustand beschrieben.

- Anbringen der Endverbindungen an die Verdrehvorrichtung
- Kontrolle der Seiloberfläche hinsichtlich Auffälligkeiten
- Versuchsseil leicht vorspannen, bis es sich in die Prüfscheibe legt
- Verdrehen des Seils durch die Verdrehvorrichtung mit ggf. Nachspannen oder Lösen der Spannung, sodass das Seil in der Scheibenrille verbleibt
- Arretieren der Verdrehvorrichtung bei gewünschtem Einstellwinkel
- Nachspannen des Seils, sodass ein Herausspringen des Seils aus der Scheibenrille verhindert wird
- Lösen der Umlenkscheibe von der Kurbelstange und drehen in beide Richtungen, bis das Versuchsseil nicht mehr auf der Umlenkscheibe aufliegt und sich die eingebrachte Verdrehung frei verteilen kann
- Verbinden der Umlenkscheibe mit der Kurbelstange
- Kontrolle des Einstellwinkels und der Seilstruktur
- Spannen des Seils, bis die ungefähre Versuchskraft anliegt
- Kontrolle des Einstellwinkels
- Messung des Achsabstandes zwischen Umlenk- und Versuchsscheibe um so die genaue Last einstellen zu können
- Versuchsstart

Die Endverbindungen der Versuchsseile wurden mittels einer speziell angefertigten Vorrichtung vor dem jeweiligen Vergießen zueinander ausgerichtet. Wie in Abbildung 4.12 zu erkennen ist, sind für eine zusätzliche Sicherung gegen Verdrehen an den Vergusshülsen³⁹ zwei Gewindebohrungen (A) angebracht, mit deren Hilfe Schrauben in den Seilbesen eingeschraubt und mitvergossen werden können. Die so angebrachte Sicherung verhindert eine Drehung des Vergusskegels innerhalb der Vergusshülse. Mittels der Bohrungen (B) an der Stirnseite des Vergusskegels und der Bolzen an der Verdrehvorrichtung erfolgt die Übertragung des Drehmoments (vgl. Abbildung 4.2).

³⁹Die Endverbindung wurde in der projektbezogenen und vom Autor betreuten Studienarbeit [Hecht2011] überarbeitet.

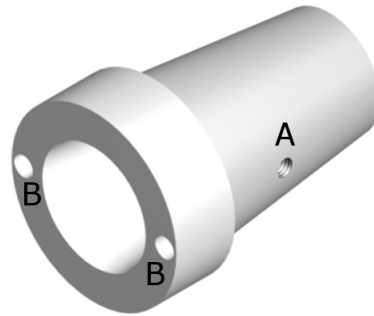


Abbildung 4.12: Endverbindung mit Verdrehungssicherung

Vor jedem Verdrehversuch wurden an der Vergusshülse und am Metallverguss Markierungen zur Überprüfung hinsichtlich eines Drehens des Metallvergusses in der Hülse angebracht.

Das Aufbringen von Fett in die Rille der Umlenkscheibe hat den Vorteil, dass sich die eingebrachte Verdrehung und damit einhergehend die geometrische Änderung des Versuchsseils während des Verdrehvorgangs ungehindert und homogen über die gesamte Seillänge ausbreiten kann. Durch das aufgetragene Fett kann sich das Versuchsseil bei keiner bis geringer Zuglast in der Rille der Umlenkscheibe frei drehen. Zusätzlich zur Homogenisierung der Verdrehung über die gesamte Probe hinweg, wurde die Umlenkscheibe vor dem Aufbringen der Versuchslast in beide Richtungen jeweils soweit gedreht, dass das Versuchsseil nicht mehr auf der Umlenkscheibe auflag.

Für die Berechnung des einzustellenden Drehwinkels $\varphi_{einstellen}$ an der Verdrehvorrichtung wurde die freie Seillänge⁴⁰ L_f der Versuchsseile nach dem Konfektionieren gemessen. Der einzustellende Drehwinkel $\varphi_{einstellen}$ berechnet sich unter Berücksichtigung der gleichmäßigen Drehung beider Seilenden an der Verdrehvorrichtung wie folgt:

$$\varphi_{einstellen} = \frac{\varphi_{soll}}{2 \cdot 100 \cdot d_{nenn}} \cdot L_f \quad (4.3)$$

Durch das Abmessen der freien Seillänge L_f können Schwankungen der Seillänge im Konfektionierungsprozess als Einflussgröße auf den einzustellenden Dreh- bzw. Verdrehwinkel ausgeschlossen werden.

Das Auffetten der Versuchsseile vor jedem Dauerbiegeversuch hat den Vorteil, dass Einflüsse des jeweiligen Schmiermittels der Seilhersteller ausgeschlossen werden können

⁴⁰Die freie Seillänge L_f entspricht hier der Seillänge zwischen den beiden Vergusshülsen.

und so alle Versuchsseile gleiche Schmiermittelbedingungen haben. Wie bereits in Kapitel 2.3 aufgezeigt wurde, hat der Schmierungszustand eines Seiles Einfluss auf die Seillebensdauer im Biegeversuch. Die Versuchsseile wurden über die Dauer von 1,5 Stunden in ein Ölbad gelegt und das Öl erwärmt. Das Erwärmen verringert die temperaturabhängige Viskosität und ermöglicht so ein Eindringen des Öls in das Seil. Nach dem Erwärmen erfolgte eine Abkühlphase im Ölbad von mindestens 12 Stunden. Vor Versuchsbeginn wurde das jeweilige Versuchsseil zum Abtropfen aufgehängt.

Die Versuchsergebnisse der Referenz-Dauerbiegeversuche ($\omega = 0^\circ$) mit aufgefetteten Versuchsseilen ermöglicht eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Lebensdauerformel nach Feyrer, ohne den Biegewechselfaktor hinsichtlich der Seilschmierung verwenden zu müssen [Feyrer2011].

4.4.4 Versuchsaufzeichnung

Zu Beginn eines jeden Dauerbiegeversuchs wurden die Durchmesser je Seilbiegezone gemessen und dokumentiert. In der Mitte einer jeden Biegezone wurden dazu jeweils zwei um 90° zueinander versetzte Messungen mittels sogenannter Seilmessschieber⁴¹ durchgeführt, um eine eventuelle ungleichmäßige Verformung des Seils feststellen zu können.

Begleitend zu den Dauerbiegeversuchen wurden regelmäßige Ableseintervalle festgelegt, bei denen der Seildurchmesser, wie oben beschrieben, gemessen und die Anzahl an Drahtbrüchen gezählt und festgehalten wurden. Die Abstände der Intervalle der von Feyrer empfohlenen Renard-Reihe (R_{10}) mit einem Stufensprung⁴² von $q_{10} = 1,25$ waren, wie bei den Versuchen festgestellt, besonders im Bereich fortgeschrittener Anzahl an Biegewechseln stellenweise zu groß, um die Drahtbruchentwicklung vor dem Bruch der Probe entsprechend erfassen zu können (vgl. [Feyrer2000] u. [DIN323:1974]). Die Ableseintervalle wurden daher und aufgrund der unbekanntenen Drahtbruchentwicklung insbesondere bei Versuchen mit einer Verdrehung des Versuchseils ($\omega \neq 0^\circ$) individuell für jeden Versuch festgelegt.

Das sogenannte Ablesen des Seiles, also die Zählung der äußerlich sichtbaren Drahtbrüche in einer Biegezone in den Bereichen⁴³ $30d$ und $6d$ erfolgte grundlegend visuell

⁴¹Seilmessschieber sind spezielle Messschieber mit breiten Messbacken, die gewährleisten, dass der Hülldurchmesser des Seils, welcher dem Seildurchmesser entspricht, gemessen wird [Feyrer2000].

⁴²Der Stufensprung muss dabei um die entsprechende Zehnerpotenz angepasst werden.

⁴³Diese durchmesserbezogenen Längeneinteilungen zur Ermittlung der äußerlich sichtbaren Drahtbruchzahl sind in der Seiltechnologie Bezugsgrößen für entsprechende Ablegedrahtbruchzahlen, bei deren Erreichen ein sich im Betrieb befindliches Seil zu ersetzen ist (vgl. [DIN15020:1974]).

und stellenweise zusätzlich taktil, indem mit der Fingerkuppe die Seiloberfläche nach Auffälligkeiten abgetastet wurde.

Mit stichprobenhaften Temperaturmessungen während der Dauerbiegeversuche und dem Einstellen der Rotationsgeschwindigkeit wurde sichergestellt, dass die Versuchsseile durch den oszillierenden Lauf auf die Versuchsscheibe und die dabei entstehenden Wärme durch innere Reibung eine Temperatur von $T = 50^{\circ}\text{C}$ an der Seiloberfläche nicht überschritten (vgl. [OIPEEC-Recommendation]).

5 Versuchsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche aus dem hier vorgestellten Forschungsprojekt beschrieben und analysiert. Die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche werden mittels Regressionsanalyse untersucht und der Anwendung zugänglich gemacht. Um eine Vergleichbarkeit mit vorherigen Arbeiten zu erhalten, die sich u. a. mit Einflüssen auf die Lebensdauer von laufenden Seilen beschäftigen, erfolgt die Ergebnisanalyse stellenweise analog zu [Feyrer1980] und [Schoenherr2005].

Die Ergebnisse aus den Bruchkraftversuchen und den Versuchen zur Ermittlung der Drehmomentkonstanten sind in Kapitel 4.2 bereits dargestellt.

5.1 Grundlagen zur Regressionsanwendung

Innerhalb der hier vorgestellten Versuchsreihen wurden systematisch festgelegte Versuchsparameter variiert, um deren möglichen Einfluss zu untersuchen. Die voneinander unabhängigen Parameter können unterschiedlichen Einfluss auf die ertragbare Bruchbiegewechselzahl haben. Der Zusammenhang kann mittels einer Regressionsgleichung beschrieben werden, bei der z. B. der zu errechnende Wert y der Bruchbiegewechselzahl entspricht und die voneinander unabhängigen Variablen x_i die Einflussparameter abbilden.

In Anlehnung an Stange und Hankus stellt sich die Gleichung zur Bestimmung der Zielgröße y wie folgt dar ([Stange1971] u. [Hankus1978]):

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i \quad (5.1)$$

Zur Auswertung von ermittelten Ergebnissen aus Dauerbiegeversuchen hat sich in der Seilforschung gezeigt, dass eine logarithmische Normalverteilung der Bruchbiegewechselzahlen N vorliegt [Feyrer1980].

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, kann die Lebensdauer laufender Drahtseile mit der Berechnungsmethode (Gleichung (2.10)) nach Feyrer mit Einflussfaktoren wie z. B. des D/d -Verhältnisses und der Seilzugkraft bestimmt werden [Feyrer2011]. Weitere Einflüsse wie z. B. die Rillenformen der Seilscheibe oder der Schrägzug des

Seils können mit sogenannten Biegewechselfaktoren bei der Lebensdauerberechnung berücksichtigt werden (vgl. [Feyrer2000]). Eine Berücksichtigung des Einflusses von diskreten Verdrehwinkeln auf die Seillebensdauer existiert bisher jedoch nicht. Mit der hier vorliegenden Arbeit wird es erstmals ermöglicht, den Einfluss von diskreten Verdrehwinkeln ω auf die Seillebensdauer zu bestimmen. Dazu wird die Gleichung (2.10) in Anlehnung an Ernst [Ernst2012], der den Einfluss von Verdrehungen bei stehenden Seilen untersuchte, mit einem Polynom P_ω erweitert:

$$\begin{aligned} \lg N_\omega = a_0 + \left(a_1 + a_3 \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \lg \frac{R_0}{1770} \right) \\ + a_2 \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_l + P_\omega \end{aligned} \quad (5.2)$$

Das noch unbekannte Polynom P_ω soll bei ausreichend hoher Ergebnisgüte einen möglichst einfachen Aufbau besitzen und bei einem Verdrehwinkel von $\omega = 0^\circ$ zu Null werden ($P_\omega = 0$), sodass die Gleichung (5.2) der bereits bekannten Gleichung (2.10) entspricht.

Die mit der Gleichung (2.10) berechenbare Lebensdauer von Drahtseilen soll im Folgenden als N_0 und die mit der Gleichung (5.2) berechenbare Lebensdauer, bei der die Verdrehung ω mitberücksichtigt ist, als N_ω bezeichnet werden.

Nach Betrachtung der Einflussparameter soll ein Biegewechselfaktor $f_{N,\omega}$ ermittelt werden, der den Einfluss einer Verdrehung auf die Lebensdauer von Drahtseilen berücksichtigt.

5.2 Referenzversuche

Zum Erreichen einer möglichst hohen Genauigkeit und zur Bewertung der Streuung wurden die Referenzversuche mit $\omega = 0^\circ$ mit den gleichen Parametern stellenweise mehrmals durchgeführt. Die Ergebnisse der Referenzversuche einer jeweiligen Seilkonstruktion stellen den Vergleichswert zu den Versuchsergebnissen mit $\omega \neq 0^\circ$ dar.

Die Bruchbiegewechselzahl bei den Referenzversuchen mit $\omega = 0^\circ$ wird mit N_0 bezeichnet. Die Bruchbiegewechselzahl bei Versuchen mit $\omega \neq 0^\circ$ wird allgemein mit N_ω bezeichnet, wobei für einen konkreten Verdrehwinkel ω durch die jeweilige längenbezogene Winkelangabe in $^\circ/100d$ ersetzt wird.

Bei den durchgeführten Dauerbiegeversuchen mit und ohne Verdrehung wurden zwei durchmesserbezogene Seilzugkräfte ($S/d^2 = 117N/mm^2$ u. $S/d^2 = 195N/mm^2$) und

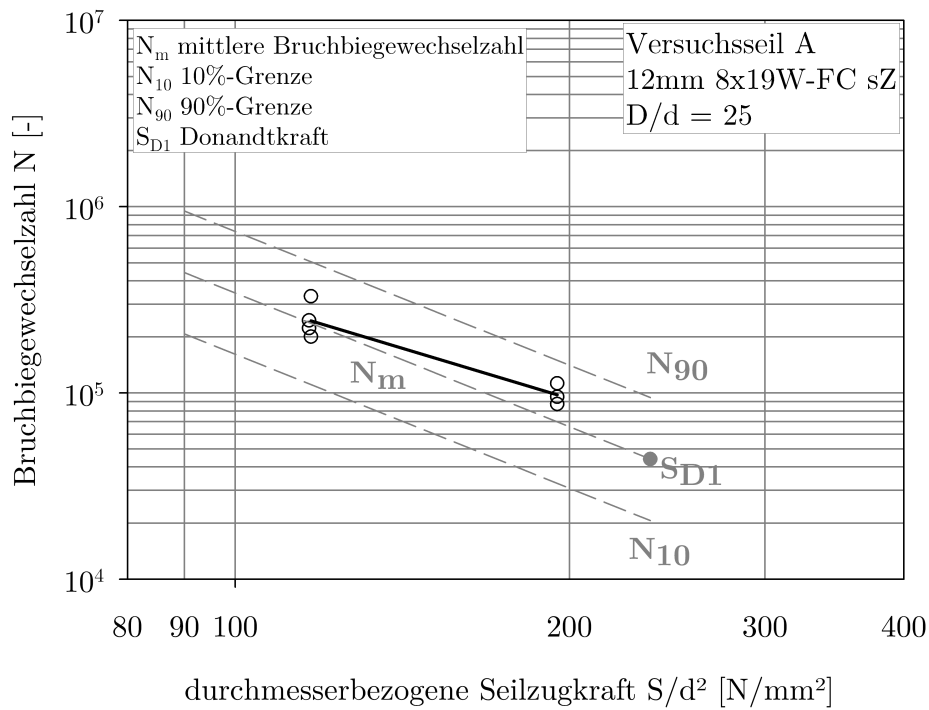
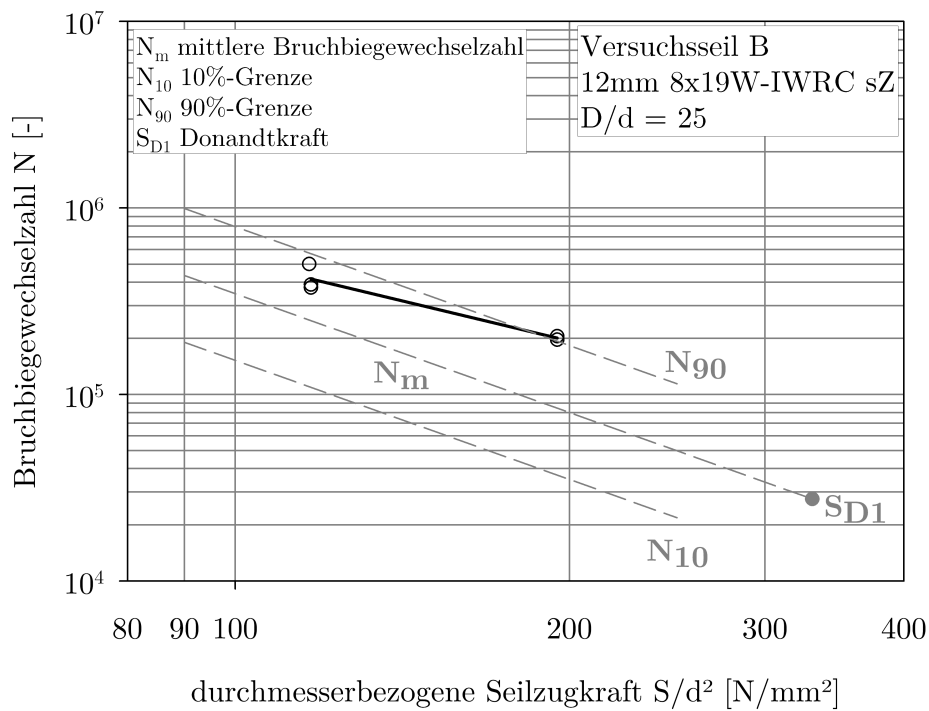
je zwei Durchmesserhältnisse ($D/d = 25$ u. $D/d = 16$) gewählt. Bei der Auswahl der Versuchsparameter wurde darauf geachtet, dass ein möglicher Einfluss durch das Erreichen der Fließgrenze des Drahtmaterials ausgeschlossen werden kann. Hierfür wurde für jede Seilkonstruktion und jedes D/d -Verhältnis diejenige Donandtkraft S_{D1} berechnet, die mit einer Sicherheit von 95% von höchstens 1% der Seile unterschritten wird [Feyrer2007]. Feyrer weist in [Feyrer2007] darauf hin, dass die maximale Kraft die Kraft S_{D1} nicht überschreiten sollte, aber in manchen Fällen keine Gefahr besteht, wenn die maximale Kraft die mittlere Donandtkraft S_D erreicht. Die jeweils berechnete und auf den Seilnennendurchmesser im Quadrat bezogene Donandtkraft S_D und S_{D1} sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

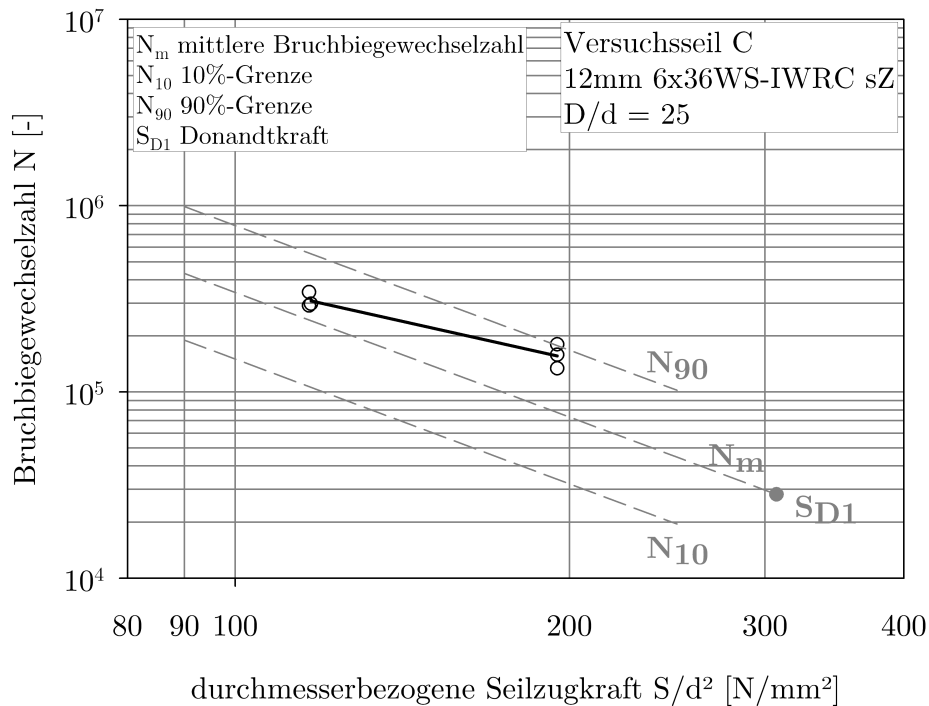
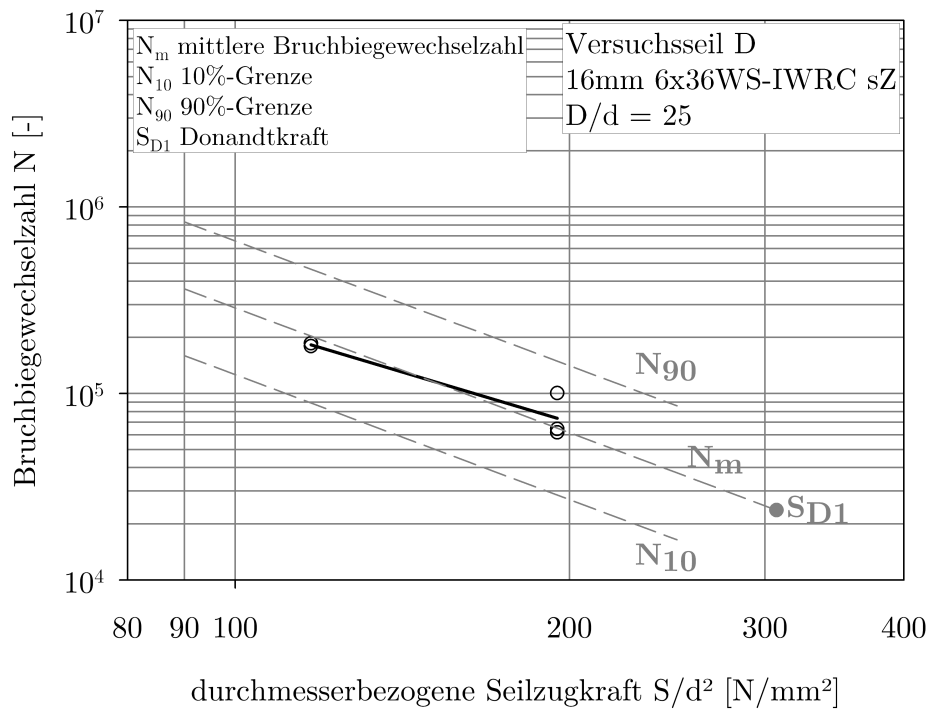
Tabelle 5.1: Seildurchmesserbezogene Donandtkraft S_D bzw. S_{D1}

Seil	A		B		C		D		E	
D/d	16	25	16	25	16	25	16	25	16	25
S_D [N/mm ²]	263	312	379	436	353	408	353	408	323	370
S_{D1} [N/mm ²]	187	236	274	331	253	307	253	307	209	257

5.2.1 Ergebnisse der Referenzversuche

Wie in Tabelle 5.1 ersichtlich, liegt bei Versuchsseil A die Seilzugkraft bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ leicht über der Donandtkraft S_{D1} . Durch die Überprüfung der Versuchsergebnisse aus den Referenzversuchen konnte festgestellt werden, dass bei allen Versuchsseilen die tatsächliche Donandtkraft nicht erreicht wurde. Dies spiegelt sich auch in den Diagrammen der Abbildungen 5.1 bis 5.10 wider, die die Versuchsergebnisse und die Donandtkraft S_{D1} zeigen. Die Versuchsergebnisse, vor allem diejenigen mit hohen Lasten ($S/d^2 = 195\text{N/mm}^2$), veranschaulichen, dass kein starker Lebensdauerabfall im Bereich der berechneten Donandtkraft S_{D1} auftritt und daher ein Einfluss ausgeschlossen werden kann. In Anlehnung an Schönherr [Schoenherr2005] sind in den Diagrammen zusätzlich die mit der Gleichung (2.10) jeweils errechnete mittlere Lebensdauer N_m und die Grenzen N_{10} und N_{90} eingezeichnet, die von höchstens 10% der Seile nicht erreicht bzw. von höchstens 10% der Seile überschritten wird.

Abbildung 5.1: Referenzversuche Seil A mit einem D/d -Verhältnis von 25Abbildung 5.2: Referenzversuche Seil B mit einem D/d -Verhältnis von 25

Abbildung 5.3: Referenzversuche Seil C mit einem D/d -Verhältnis von 25Abbildung 5.4: Referenzversuche Seil D mit einem D/d -Verhältnis von 25

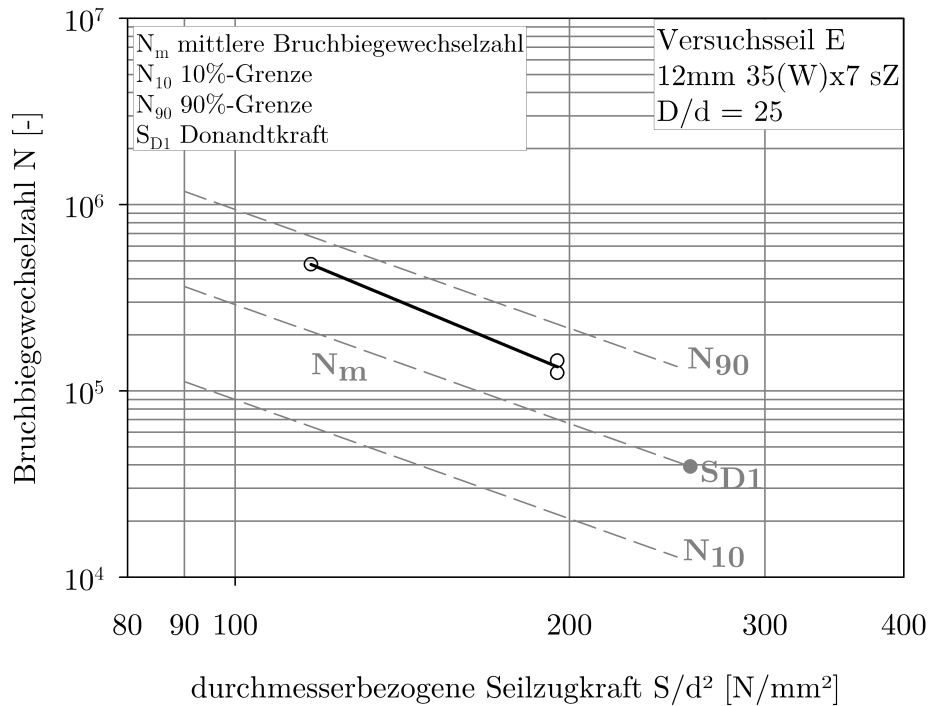


Abbildung 5.5: Referenzversuche Seil E mit einem D/d -Verhältnis von 25

Die Ergebnisse aus den Referenzversuchen mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ liegen für alle untersuchten Versuchsseile innerhalb der Grenzen N_{10} und N_{90} und bestätigen somit die Übereinstimmung mit einer umfangreichen Versuchsdatenbasis.

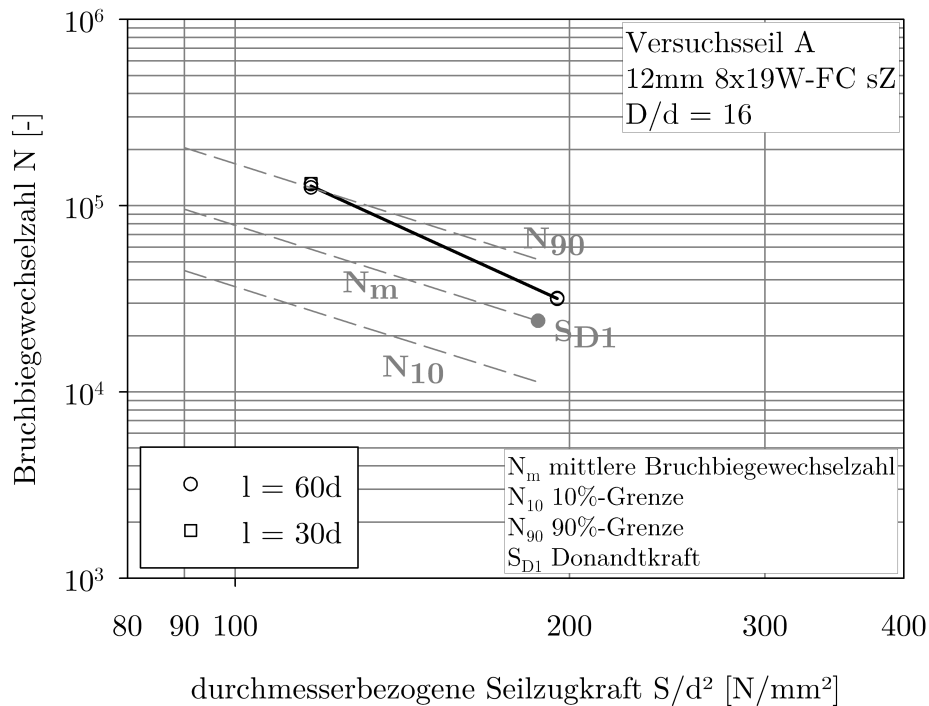
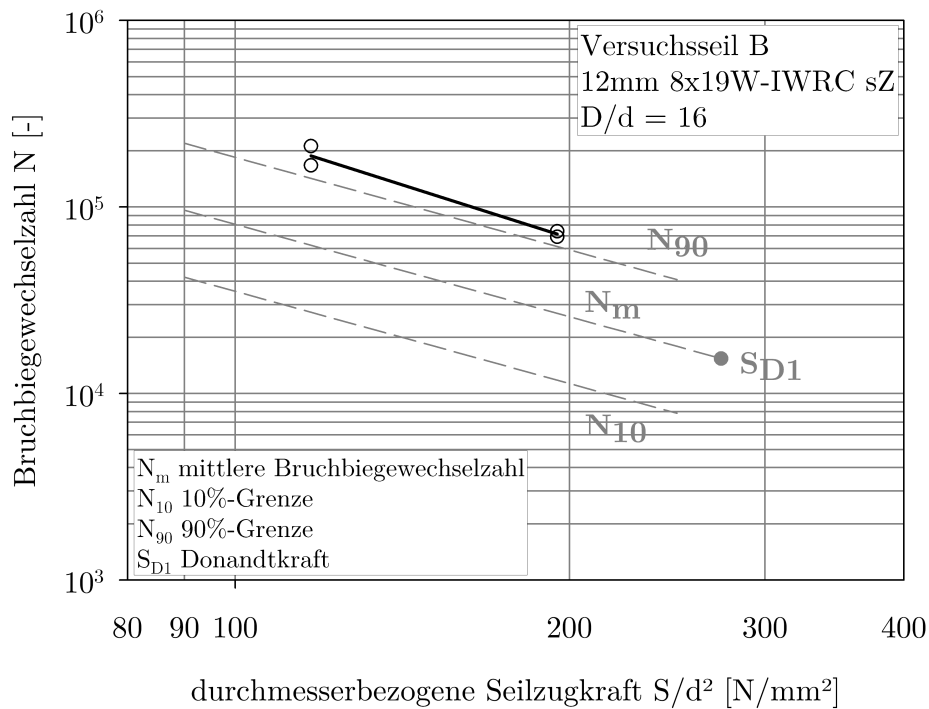
Die dargestellten Versuchsergebnisse mit Versuchsseil E zeigen einen geringen bis nicht erkennbaren Einfluss der Versuchsanordnung ohne Wirbel. Die im Versuch ermittelten Ergebnisse liegen über der mittleren Lebensdauer N_m .

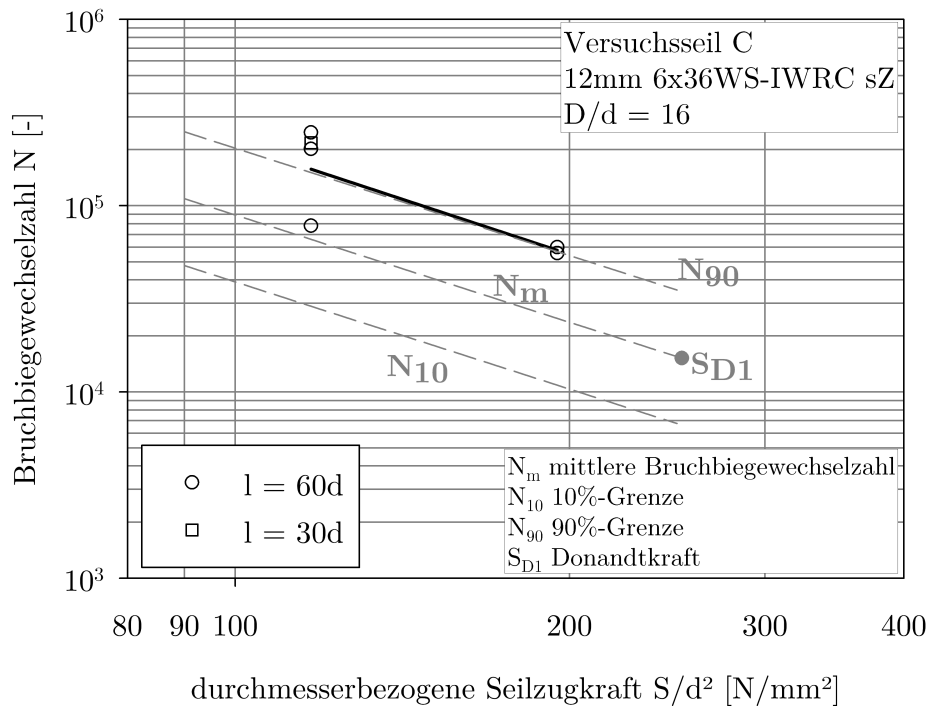
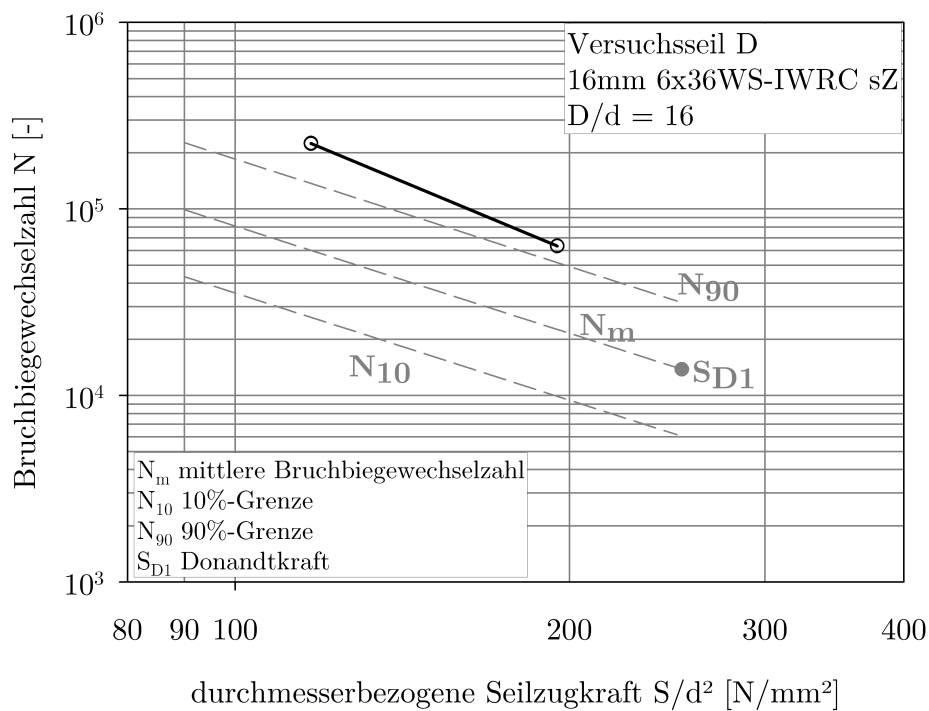
In den Diagrammen der Abbildungen 5.6 bis 5.10 sind die Referenzversuche mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ dargestellt.

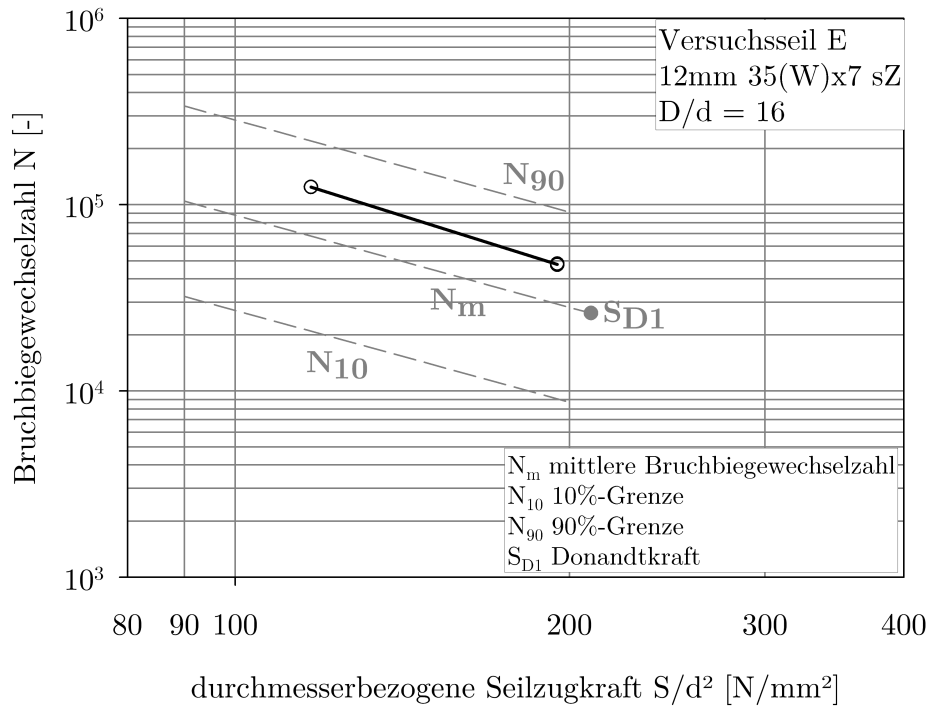
Wie bei dem untersuchten D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ liegen auch bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ die Ergebnisse der Referenzversuche des Versuchsseils E innerhalb der Grenzen N_{10} sowie N_{90} und nahe der mittleren Lebensdauer N_m trotz einer Versuchsanordnung ohne Wirbel.

Die Versuchsergebnisse der Referenzversuche von den Seilen mit Stahleinlage liegen stellenweise über der 90%-Grenze N_{90} und erreichen somit eine höhere Bruchbiegewechselzahl als es sich rechnerisch mit der Lebensdauergleichung (Gleichung (2.10)) ergibt.

Beim gewählten D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ und einer maximalen Last von $S/d^2 = 195 \text{ N/mm}^2$ liegen alle Versuchsergebnisse über der mittleren Lebensdauer und

Abbildung 5.6: Referenzversuche Seil A mit einem D/d -Verhältnis von 16Abbildung 5.7: Referenzversuche Seil B mit einem D/d -Verhältnis von 16

Abbildung 5.8: Referenzversuche Seil C mit einem D/d -Verhältnis von 16Abbildung 5.9: Referenzversuche Seil D mit einem D/d -Verhältnis von 16

Abbildung 5.10: Referenzversuche Seil E mit einem D/d -Verhältnis von 16

der jeweiligen Donandtkraft S_{D1} . Selbst bei Versuchsseil A, bei dem die maximale Last $S/d^2 = 195 N/mm^2$ die Donandtkraft S_{D1} leicht übersteigt (vgl. Tabelle 5.1), liegen die Versuchsergebnisse oberhalb der Lebensdauer, die bei der Donandtkraft S_{D1} errechenbar ist.

Mit den Versuchsseilen A und C wurde der Einfluss der Biegelänge auf die erreichbare Bruchbiegewechselzahl bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Versuche mit einer Biegelänge von $l = 30d$ und $l = 60d$ keine wesentlichen Unterschiede in der erreichbaren Bruchbiegewechselzahl aufweisen. Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Abbildungen mit dargestellt.

5.2.2 Auswertung der Referenzversuche mittels Regression

In Anlehnung an Schönherr kann für die konstanten Parameter wie die Drahtnennfestigkeit R_0 , das D/d -Verhältnis und die Biegelänge l der Regressionsansatz

$$\lg N_0 = a_0 + a_1 \cdot \lg \frac{S \cdot d_0^2}{d^2 \cdot S_0} \quad (5.3)$$

verwendet werden [Schoenherr2005].

Die ermittelten Konstanten a_0 und a_1 sind in den Tabellen 5.2 und 5.3 getrennt für die beiden D/d -Verhältnisse $D/d = 16$ und $D/d = 25$ den mit der Gleichung (2.10) errechneten Konstanten gegenübergestellt.

Tabelle 5.2: Ermittelte Konstanten für $D/d = 25$

	Konstanten	A	B	C	D	E
Durch Versuche ermittelt	a_0	9,097	8,583	8,251	8,931	10,815
	a_1	-1,793	-1,433	-1,335	-1,775	-2,483
Mit den Gln. (2.9) u. (5.3) berechnet	a_0	10,316	9,783	9,986	9,911	9,709
	a_1	-2,390	-2,121	-2,226	-2,226	-2,123

Tabelle 5.3: Ermittelte Konstanten für $D/d = 16$

	Konstanten	A	B	C	D	E
Durch Versuche ermittelt	a_0	10,737	9,184	9,256	10,474	8,964
	a_1	-2,723	-1,891	-1,963	-2,477	-1,871
Mit den Gln. (2.9) u. (5.3) berechnet	a_0	8,657	8,204	8,777	8,735	8,226
	a_1	-1,881	-1,648	-1,913	-1,913	-1,641

Die Biegelänge l ist bei den zur Regression ausgewerteten Referenzversuchen, außer bei Versuchsseil D und einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$, $l = 60d$. Bei den Versuchen mit Versuchsseil D und einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ liegt eine Biegelänge von $l = 30d$ vor.

Die Standardfehler $lg s$ der Versuchsergebnisse, die sich bei der Berechnung der Konstanten a_0 und a_1 mit der Gleichung für die Versuchsseile A, B, D und E ergeben, liegen mit einem minimalen Wert von $lg s = 0,002$ und einem maximalen Wert von

$lg s = 0,096$ nach Schönherr im Bereich der üblichen Standardabweichung für Biegeversuche mit Drahtseilen [Schoenherr2005]. Wie in dem Diagramm für Versuchsseil C in Abbildung 5.8 ersichtlich ist, existiert für diese Messreihe ein deutlicher „Ausreißer“, bei dem die erreichte Bruchbiegewechselzahl stark von den weiteren Ergebnissen dieser Messreihe abweicht. Die Standardabweichung liegt unter Berücksichtigung dieses Ausreißers bei $lg s = 0,219$ und ohne das stark abweichende Ergebnis bei $lg s = 0,047$. Die Konstanten a_i sind entsprechend neu zu berechnen und ergeben sich für Seil C bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ ohne Berücksichtigung des Ausreißers zu $a_0 = 10,827$ und $a_1 = -2,649$.

5.2.3 Zusammenfassung der Referenzversuche

Zur Bewertung der Referenzversuche wurden die Messergebnisse aus den Versuchen mit $\omega = 0^\circ$ in Anlehnung an Schönherr sowohl grafisch als auch mittels Regression ausgewertet und die Standardabweichung bestimmt [Schoenherr2005].

Die Ergebnisse der Referenzversuche zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den rechnerischen Ergebnissen aus der von Feyrer auf Basis einer umfangreichen Versuchsdatenbasis generierten Berechnungsformel (siehe Gleichung (2.10)) (vgl. [Feyrer2011]). Dass Versuchsergebnisse über dem Wert N_{90} (eingezeichnet in den Diagrammen der Abbildungen 5.1 bis 5.10) liegen können, stellte auch Schönherr in ihrer Arbeit fest [Schoenherr2005].

Die Versuchsergebnisse der Referenzversuche mit Seil E zeigen bei der gewählten Versuchsanordnung ohne Wirbel keinen gravierenden Lebensdauerabfall, was sich darin widerspiegelt, dass die ermittelten Versuchsergebnisse für beide D/d -Verhältnisse über dem errechneten Mittelwert N_m liegen. Dieser Belastungsfall bildet einen ungünstigen Fall ab, weshalb die bestehenden Empfehlungen zur Verwendung eines Wirbels bei drehungsfreien Seilen in Praxisanwendungen zu beachten sind (vgl. Kapitel 4.4).

Innerhalb der Referenzversuche wurden bei den beiden Versuchsseilen A und C Versuche mit einer Biegelänge von $l = 30d$ durchgeführt (Abbildungen 5.6 u. 5.8). Die Ergebnisse zeigen, dass bei den hier durchgeführten Versuchen mit einer Biegelänge von $l = 60d$ und $l = 30d$ kein wesentlicher Unterschied auszumachen ist. Diese Feststellung wird durch die Berechnung der Seillebensdauern mit der Gleichung (2.10) unter Annahme beider Biegelängen gestützt. Die Unterschiede der errechneten Lebensdauern liegen dabei im einstelligen Prozentbereich. Aufgrund dieser Erkenntnis werden beide Biegelängen ($l = 60d$ und $l = 30d$) bei der Ergebnisbetrachtung der Dauerbiegeversuche mit und ohne Verdrehung zusammen ausgewertet.

5.3 Versuche mit Verdrehung

Wie in Kapitel 5.1 dargestellt, existiert zur Berechnung der Lebensdauer laufender Drahtseile die renommierte und international anerkannte Methode nach Feyrer, welche jedoch den Einfluss von diskreten Verdrehwinkeln nicht berücksichtigt (vgl. [Feyrer2000] u. [Feyrer2011]). Durch die in diesem Forschungsprojekt ermittelten Versuchsergebnisse bezüglich des Einflusses von Verdrehung auf die Seillebensdauer laufender Drahtseile soll die Lebensdauerformel (Gleichung (2.10)) nach Feyrer mit einem entsprechenden Polynom P_ω erweitert werden, sodass erstmals eine Berechnung der Seillebensdauer unter dem Einfluss von diskreten Verdrehwinkeln möglich ist. Die ermittelten Ergebnisse werden dabei für jede Seilkonstruktion bzw. jeden Seildurchmesser zunächst getrennt betrachtet. Eine Betrachtung der jeweiligen Versuchsergebnisse einer Seilkonstruktion ermöglicht das Erkennen von etwaigen Einflussgrößen, die bei der Regressionsrechnung Berücksichtigung finden. So kann z.B. festgestellt werden, ob sich der Einfluss der Verdrehung bei unterschiedlichen Versuchsparametern wie Last oder D/d -Verhältnis unterschiedlich auswirkt. Aufbauend auf einem ersten Ansatz wird in einem iterativen Verfahren derjenige Ansatz bestimmt, der ein Optimum darstellt und bei dem ein Polynom mit möglichst wenigen Gliedern bei allen Seilkonstruktionen jeweils ein Bestimmtheitsmaß⁴⁴ von $B \geq 0,80$ erreicht.

5.3.1 Ergebnisse der Verdrehversuche

Zur Beschreibung der Lebensdauer von Drahtseilen unter dem Einfluss der Verdrehung mittels Regressionsanalyse, wurden zunächst die einzelnen Seilkonstruktionen getrennt betrachtet. Anschließend wurden die Verläufe bei gleicher Last und gleichem D/d -Verhältnis miteinander verglichen. Des Weiteren erfolgte ein Vergleich bei gleichen Lasten und verschiedenem D/d -Verhältnis sowie bei gleichem D/d -Verhältnis und verschiedenen Lasten. Mit dieser Herangehensweise können Erkenntnisse über den Einfluss der einzelnen Versuchsparameter auf die Seillebensdauer gewonnen werden.

Die Versuchsergebnisse der Dauerbiegeversuche mit Verdrehung und den dazugehörigen Referenzwerten bei $\omega = 0^\circ$, die mit dem Regressionsansatz (Gleichung (5.3)) in Kapitel 5.2 ermittelt wurden, sind in den Diagrammen der Abbildungen 5.11 bis 5.15 dargestellt.

⁴⁴Die Vorgabe der Größe des Bestimmtheitsmaßes von $B \geq 0,80$ wurde in Anlehnung an Ernst gewählt [Ernst2012]. Der Vergleich mit bestehenden Erkenntnissen aus Arbeiten im Bereich der Seilforschung bei denen die Bestimmtheitsmaße im Rahmen von Analysen experimenteller Versuche ermittelt wurden bestätigen, dass es sich hier um ein, nach Ernst, „gutes“ Bestimmtheitsmaß handelt (vgl. z. B. [Wolf1987], [Kloepfer2002], [Ernst2012]).

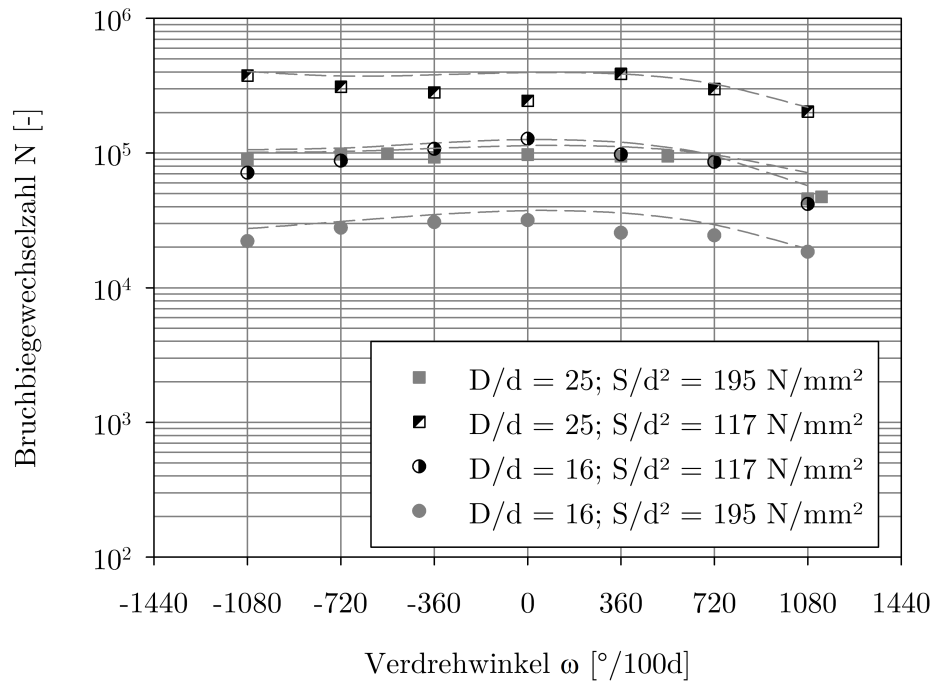


Abbildung 5.11: Versuche mit diskretem Verdrehwinkel ω in 2D-Darstellung; Versuchsseil A; 12 mm 8x19W-FC sZ

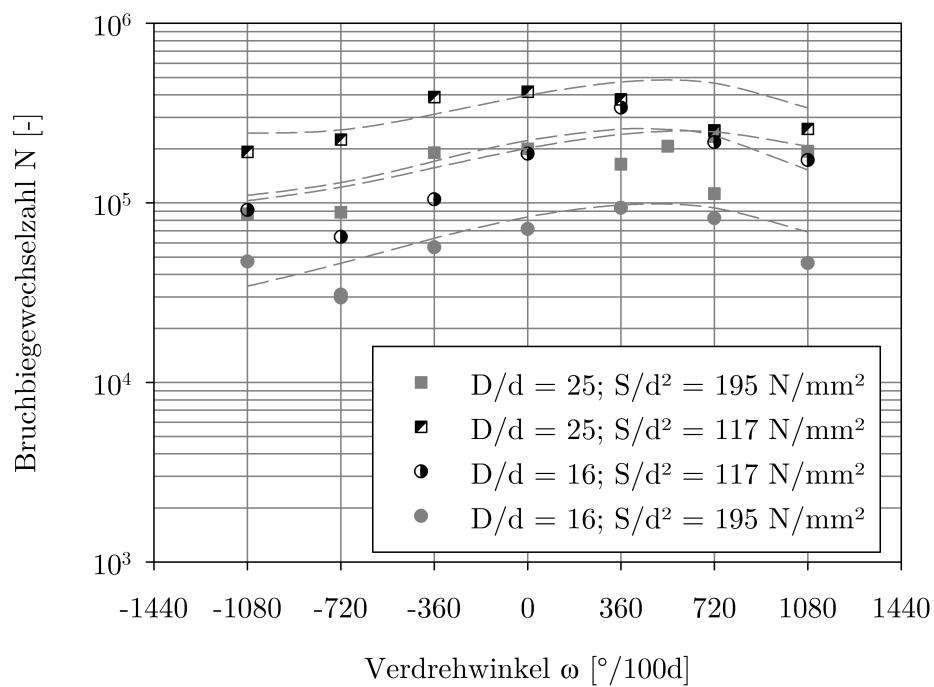


Abbildung 5.12: Versuche mit diskretem Verdrehwinkel ω in 2D-Darstellung; Versuchsseil B; 12 mm 8x19W-IWRC sZ

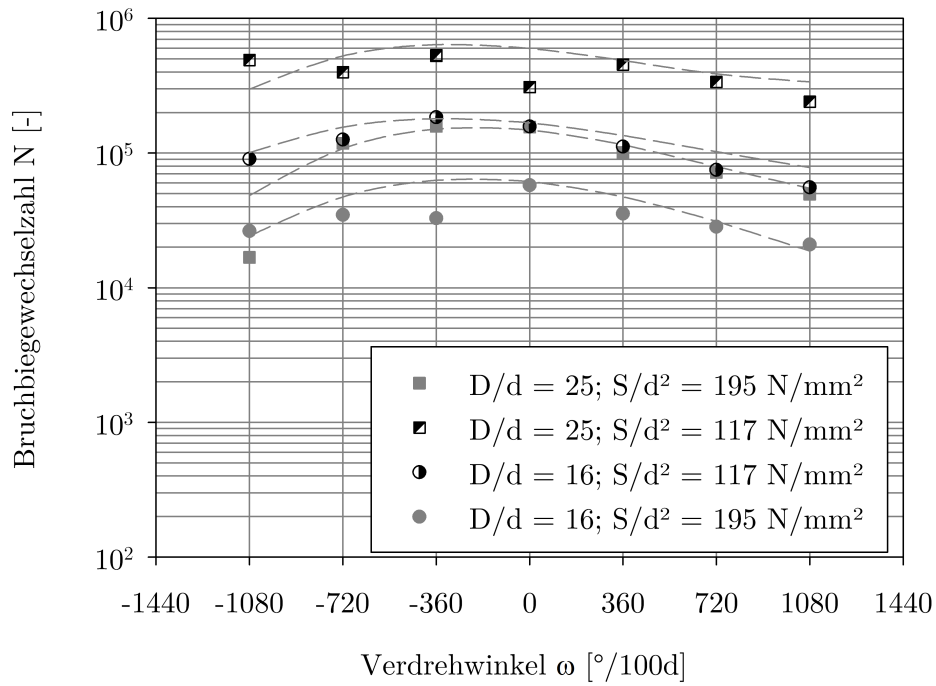


Abbildung 5.13: Versuche mit diskretem Verdrehwinkel ω in 2D-Darstellung; Versuchsseil C; 12 mm 6x36WS-IWRC sZ

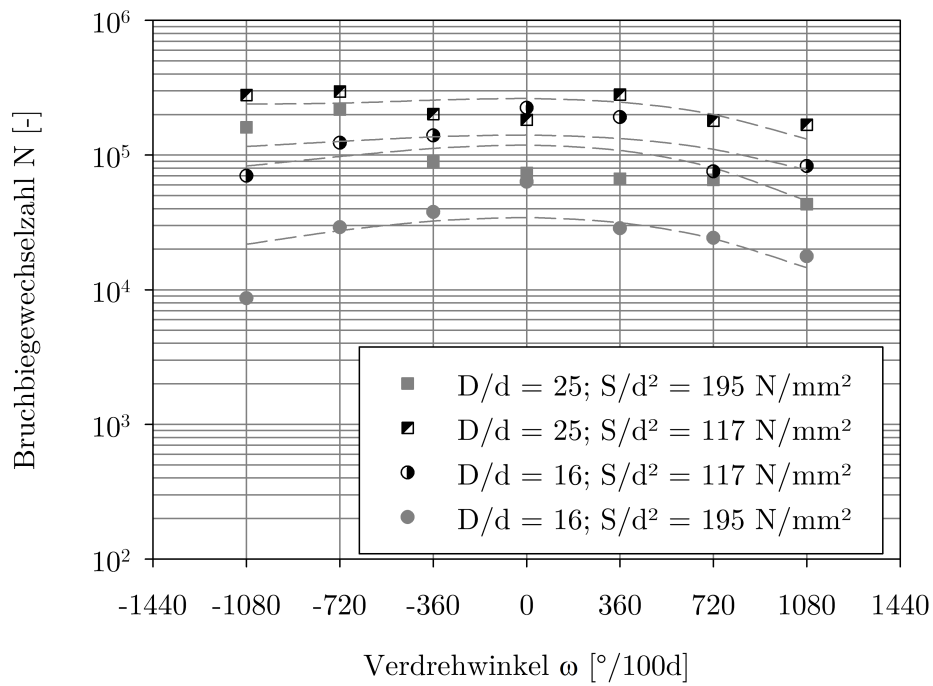


Abbildung 5.14: Versuche mit diskretem Verdrehwinkel ω in 2D-Darstellung; Versuchsseil D; 16 mm 6x36WS-IWRC sZ

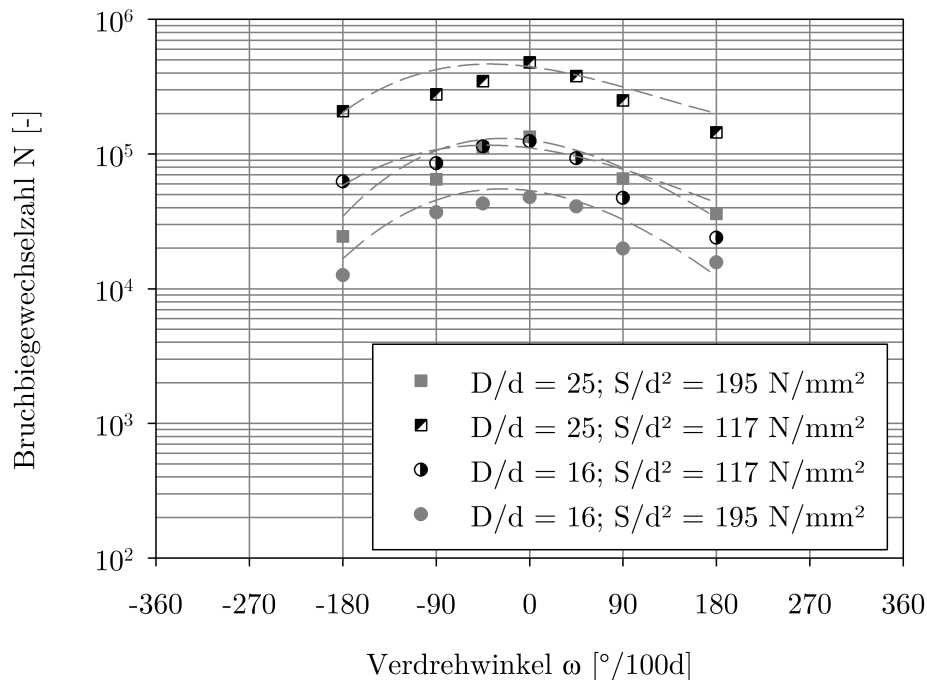


Abbildung 5.15: Versuche mit diskrettem Verdrehwinkel ω in 2D-Darstellung; Versuchsseil E; 12 mm 35(W)x7 sZ

Die in den Abbildungen 5.11 bis 5.15 dargestellten Diagramme veranschaulichen den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Seillebensdauer. Im direkten Vergleich der beiden 8x19 Warrington-Konstruktionen mit Fasereinlage und mit Stahleinlage (Versuchsseil A und Versuchsseil B) wird deutlich, dass eine Verdrehung bei Versuchsseil A im Bereich eines negativen Verdrehwinkels ($\omega < 0$) einen geringeren Einfluss auf die Lebensdauer hat als bei Seil B. Darüber hinaus ist die Charakteristik des Verlaufs der Lebensdauer über des Verdrehwinkels ω ebenfalls unterschiedlich. Während bei Versuchsseil B bei einem Verdrehwinkel von $\omega > 0$ eine Zunahme mit angeschlossener Abnahme der Lebensdauer dominiert, verläuft die Lebensdauer bei Versuchsseil A in negativer Verdrehrichtung flach abfallend bis leicht zunehmend und in positiver Verdrehrichtung ($\omega > 0$) maßgeblich stärker abfallend. Bei Versuchsseil B fällt die Lebensdauer bei einem negativen Verdrehwinkel ($\omega < 0$) maßgeblich ab.

Bei Versuchsseil C dominiert bei einem negativen Verdrehwinkelbereich ($\omega < 0$) zunächst ein Lebensdaueranstieg. Die Lebensdauer fällt mit zunehmend negativem Verdrehwinkel wieder ab. Bei einem positiven Verdrehwinkel ($\omega > 0$) ist maßgeblich eine Abnahme der Lebensdauer zu beobachten. Versuchsseil D weist im Vergleich zu Versuchsseil C, welches die gleiche Seilkonstruktion besitzt, sich aber im Seilnennendurchmesser unterscheidet, im negativen Verdrehwinkelbereich ($\omega < 0$) einen etwas flacheren Verlauf auf. In positiver Verdrehrichtung ($\omega > 0$) dominiert bei Versuchsseil D wie bei Versuchsseil C eine Abnahme der ertragbaren Biegegeschwelezahl.

Auf die ertragbare Biegewechselzahl der untersuchten drehungsfreien Seilkonstruktion (Versuchsseil E) konnte während der Versuche ein enormer Einfluss der Verdrehung beobachtet werden. Dieser spiegelt sich im Diagramm der Abbildung 5.15 wider, wobei hier der relativ kleine Verdrehwinkelbereich zu beachten ist, bei dem die Lebensdauer bereits immens abfällt. Durch die unterschiedliche Verseilrichtung und die Erkenntnisse aus den theoretischen Untersuchungen (vgl. Kapitel 3.1.2 u. Kapitel 3.5) kann diese Sensibilität einer drehungsfreien Seilkonstruktion hinsichtlich einer Verdrehung erklärt werden.

Durch eine Betrachtung der Versuchsergebnisse ist erkennbar, dass neben dem Verdrehwinkel ω und der Seilkonstruktion sowohl die Last als auch das D/d -Verhältnis Einfluss auf den Verlauf der Seillebensdauer haben.

5.3.2 Auswertung der Verdrehversuche mittels Regression

Die Betrachtung der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass der Lebensdauerverlauf über dem Verdrehwinkel ω sowohl von der Last als auch vom D/d -Verhältnis abhängig ist. Aufbauend auf dieser Erkenntnis, wurden in einem iterativen Prozess über 50 verschiedene Regressionsansätze gebildet und hinsichtlich ihres jeweiligen Verhältnisses zwischen Ergebnisgüte und mathematischer Komplexität wie z. B. Grad des Polynoms untereinander verglichen. Mit dem aus diesem Prozess generierten Polynom P_ω , welches im Hinblick auf das oben genannte Verhältnis ein Optimum der aufgestellten Ansätze darstellt, kann der Einfluss eines diskreten Verdrehwinkels auf die Seillebensdauer mit guter Genauigkeit abgebildet werden.

In Kombination mit der international anerkannten Lebensdauerformel nach Feyrer (Gleichung (2.10)), die den Einfluss einer Seilverdrehung bisher unberücksichtigt lässt, und des hier ermittelten Polynoms P_ω kann der Einfluss des Verdrehwinkels ω (in $rad/100d$) erstmals rechnerisch bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 \lg N_\omega = a_0 + \left(a_1 + a_3 \cdot \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} \right) + a_2 \cdot \lg \frac{D}{d} \\
 + \underbrace{\lg f_d + \lg f_l + b_0 \cdot \omega + b_1 \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{S d_0^2}{d^2 S_0} \right) + b_2 \cdot \omega^3 \cdot \frac{D}{d}}_{P_\omega} \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Liegt keine Verdrehung des Seils vor, so wird das Polynom $P_\omega = 0$, sodass sich die Lebensdauer über die bereits bestehende Lebensdauerformel nach Feyrer berechnet, die keine Seilverdrehung berücksichtigt [Feyrer2011].

Die mit der Gleichung (5.4) und eigens ermittelten Konstanten a_i errechneten Lebensdauererläufe sind in den Diagrammen der Abbildungen 5.11 bis 5.15 als gestrichelte Linien dargestellt.

Mit den in Tabelle 5.4 aufgeführten Regressionskoeffizienten b_0 bis b_2 kann eine Berechnung der Lebensdauer unter dem Einfluss der Verdrehung nach Gleichung (5.4) erfolgen.

Tabelle 5.4: Ermittelte Konstanten b_0 bis b_2

Konstanten	A	B	C	D	E
$b_0 \cdot 10^{-3}$	1,442	15,633	-10,719	-0,603	-55,078
$b_1 \cdot 10^{-6}$	-3,026	-3,397	-6,639	-4,115	-296,240
$b_2 \cdot 10^{-6}$	-0,958	-1,340	1,367	-0,707	217,626

Der Regressionsansatz (Gleichung (5.4)) ist entsprechend so aufgebaut, dass die Lebensdauerformel nach Feyrer den Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinatenachse und das Polynom P_ω im Wesentlichen die Form der Kurve beschreiben. Dies ermöglicht die Verwendung der Regressionskoeffizienten a_i aus [Feyrer2011], die auf Basis einer großen Versuchszahl ermittelt wurden.

Der Einfluss der untersuchten Parameter Verdrehung ω , der durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2 und dem D/d -Verhältnis auf die Seillebensdauer lassen sich in dreidimensionalen Diagrammen qualitativ veranschaulichen (Abbildung 5.16 bis Abbildung 5.20).

Innerhalb eines diskreten Verdrehwinkels ω und einem D/d -Verhältnis weisen die Lebensdauererläufe im dargestellten Lastbereich einen flachen Verlauf auf (z. B. Abbildung 5.17 gestrichelte Linie A), während sich je nach Seilkonstruktion innerhalb eines Lastniveaus und einem D/d -Verhältnis die Seillebensdauer stellenweise deutlich ändert (z.B. Abbildung 5.17 gestrichelte Linie B). Dies gilt auch für die Betrachtung eines konstanten Lastniveaus und eines konstanten Verdrehwinkels ($S/d^2 = konst.$ und $\omega = konst.$) über den untersuchten D/d -Verhältnissen von $D/d = 25$ und $D/d = 16$ (z.B. Abbildung 5.17 gestrichelte Linie C).

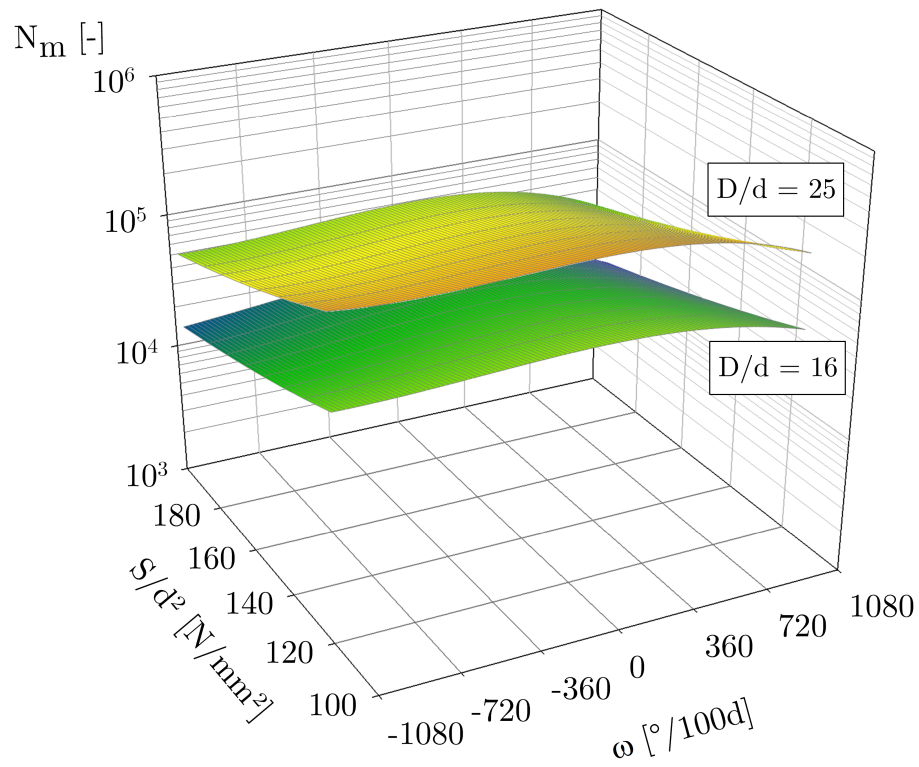


Abbildung 5.16: Lebensdauer unter Verdrehung ω in 3D-Darstellung;
Versuchsseil A; 12 mm 8x19W-FC sZ

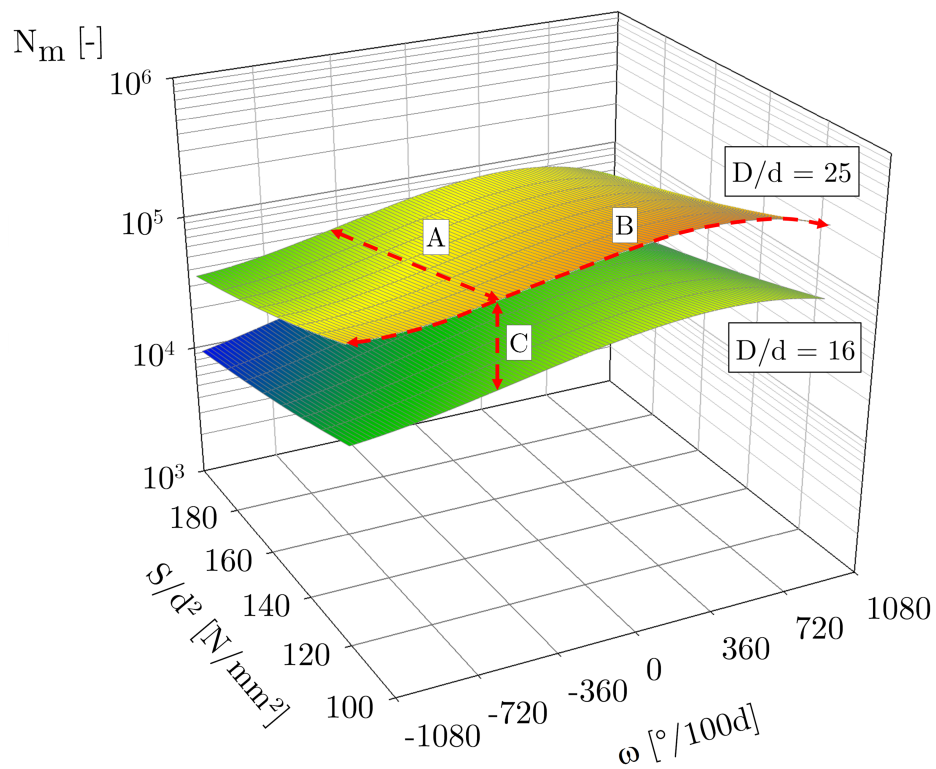


Abbildung 5.17: Lebensdauer unter Verdrehung ω in 3D-Darstellung;
Versuchsseil B; 12 mm 8x19W-IWRC sZ

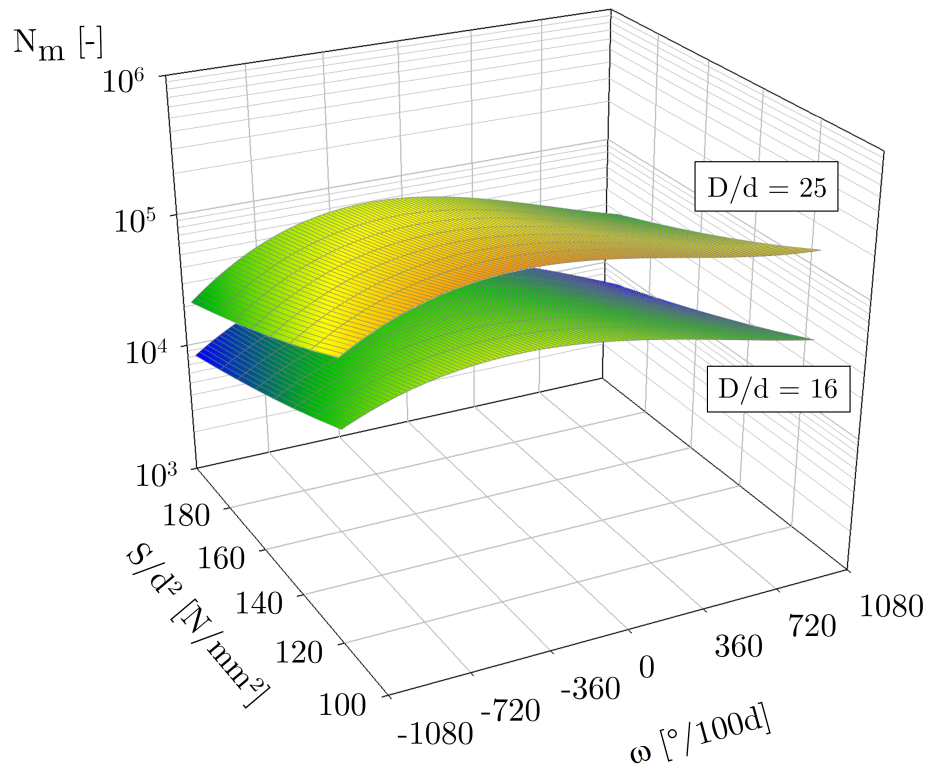


Abbildung 5.18: Lebensdauer unter Verdrehung ω in 3D-Darstellung;
Versuchsseil C; 12 mm 6x36WS-IWRC sZ

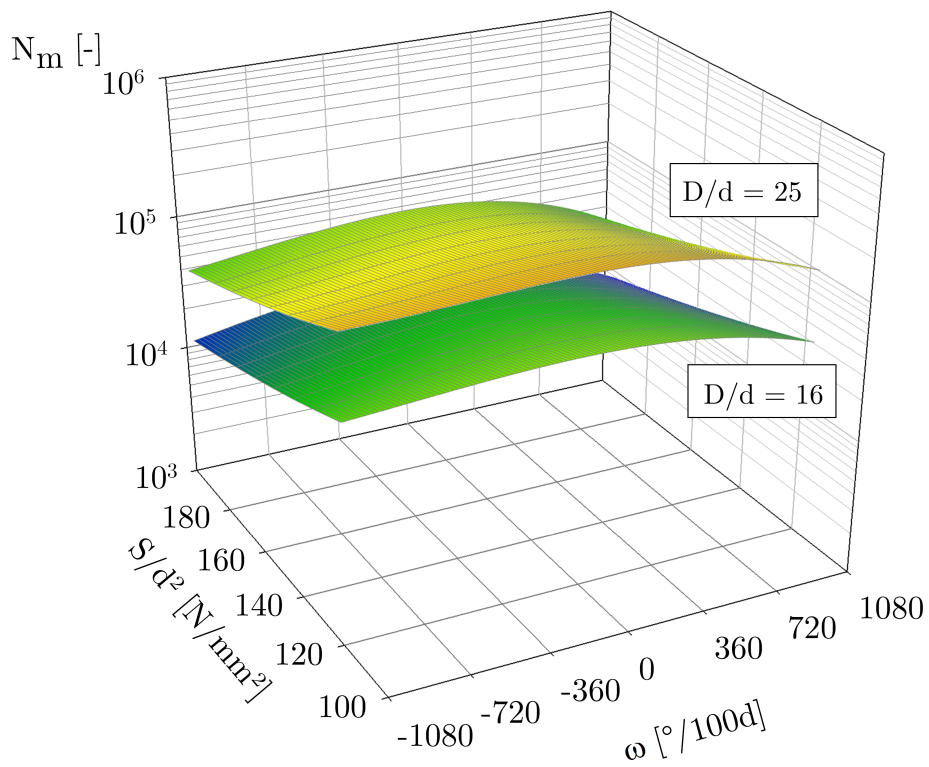


Abbildung 5.19: Lebensdauer unter Verdrehung ω in 3D-Darstellung;
Versuchsseil D; 16 mm 6x36WS-IWRC sZ

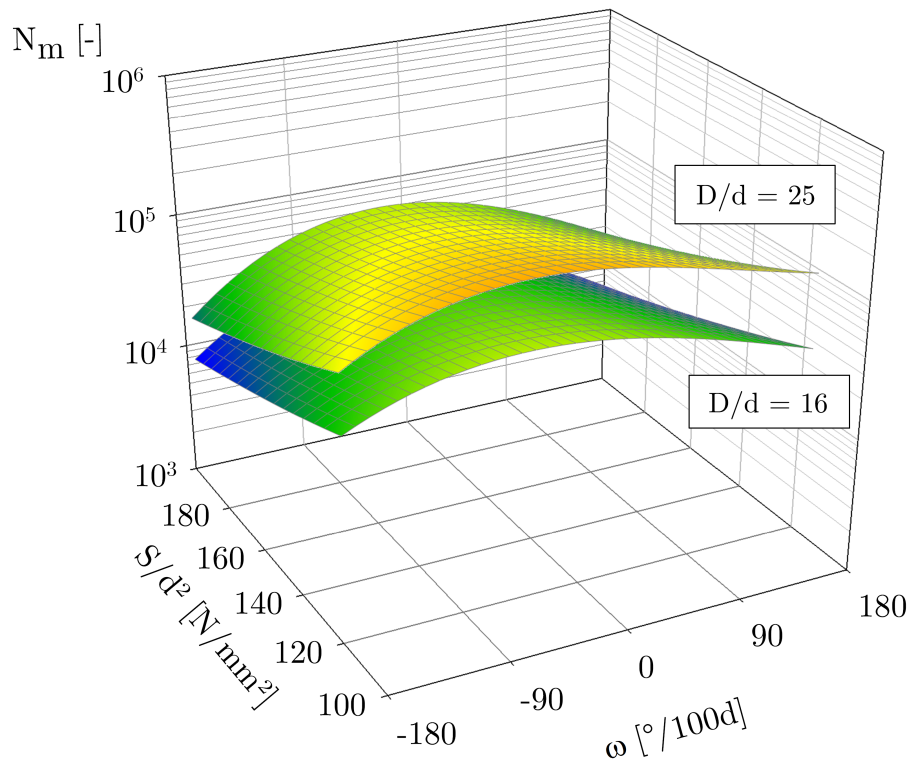


Abbildung 5.20: Lebensdauer unter Verdrehung ω in 3D-Darstellung;
Versuchsseil E; 12 mm 35(W)x7 sZ

Wie die zweidimensionalen Diagramme der Abbildungen 5.11 bis 5.15 aufzeigen, ist der Einfluss des Verdrehwinkels ω auf die Seillebensdauer abhängig von der durchmesserbezogenen Last (S/d^2) und dem D/d -Verhältnis.

Gleichung (5.4) bildet mit den Koeffizienten a_i aus [Feyrer2011] und den hier ermittelten und in Tabelle 5.4 dargestellten Regressionskoeffizienten b_0 bis b_2 die Lebensdauer von Drahtseilen erstmals mit Verdrehung ab.

Eine Anwendung der Gleichung (5.4) zur Berechnung der Lebensdauer unter dem Einfluss der Verdrehung, ist beschränkt auf die hier untersuchten Parameterbereiche, Verdrehwinkel (einlagige Rundlitzenseile: $-1080^\circ/100d \leq \omega \leq 1080^\circ/100d$; drehungsfreie Seile: $-180^\circ/100d \leq \omega \leq 180^\circ/100d$) und Seilkonstruktionen.

5.3.3 Analyse der Regressionsrechnung

Zur Bewertung des aufgestellten Regressionsansatzes können das Bestimmtheitsmaß B und die Standardabweichung s herangezogen werden (vgl. [Schoenherr2005] u. [Ernst2012]). Da aufgrund der Erfahrungen bei Dauerbiegeversuchen mit Stahlseilen eine logarithmische Normalverteilung zu Grunde liegt, wird die Standardabweichung s zu $\lg s$

[Feyrer1980]. Diese berechnet sich wie folgt [Schoenherr2005]:

$$lg s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (lg N_i - lg \bar{N}_{i,\omega})^2}{n - p - 1}} \quad (5.5)$$

Mit dem Bestimmtheitsmaß B lässt sich bewerten, inwiefern sich die Messergebnisse durch die im Regressionsansatz befindlichen Einflussparameter beschreiben lassen. Das Bestimmtheitsmaß B berechnet sich in Anlehnung an [Schoenherr2005] mit:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (lg N_{i,\omega} - lg \bar{N}_{i,\omega})^2}{\sum_{i=1}^n (lg N_i - lg \bar{N}_{i,\omega})^2} \quad (5.6)$$

Mit dem in Gleichung (5.4) dargestellten Regressionsansatz und den für die Versuchswerte ermittelten Koeffizienten (a_i und b_i) werden Bestimmtheitsmaße erreicht, die die oben aufgestellte Bedingung $B \geq 0,80$ erfüllen. Das jeweils erreichte Bestimmtheitsmaß B ist mit der jeweiligen Streuung $lg s$ in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Bestimmtheitsmaß B und Standardabweichung $lg s$

Versuchsseil	A	B	C	D	E
B [-]	0,977	0,868	0,927	0,824	0,953
lg s [-]	0,064	0,129	0,138	0,190	0,108

Die Bestimmtheitsmaße B_i liegen für alle Versuchsseile über 0,8 (80%). Bei den Versuchsseilen A, C und E liegen die Bestimmtheitsmaße sogar über 0,9 ($B_{A,C,E} \geq 0,90$). Die mit dem Regressionsansatz in Gleichung (5.4) ermittelten Bestimmtheitsmaße B_i weisen auf eine gute Abbildung des Einflusses einer Verdrehung auf die Seillebensdauer hin (vgl. [Schoenherr2005], [Ernst2012]).

Die Standardabweichung $lg s$ als Maß für die Streuung liegt im Bereich von $lg s_A = 0,064$ bis $lg s_D = 0,190$. Die ermittelten Standardabweichungen $lg s_i$ liegen in etwa in dem Bereich, den Schönherr in ihrer Arbeit bei der Betrachtung von Schrägzug ermittelte. Lediglich die Standardabweichung $lg s_D = 0,190$ ist etwas erhöht, liegt aber im Bereich der Standardabweichungen $lg s_i$, die bei Lebensdaueruntersuchungen im Bereich von Zugschwellbelastung verdrehter Seile ermittelt wurden [Ernst2012].

Mit Hilfe der ermittelten Standardabweichungen $lg s_i$ in Tabelle 5.5 lassen sich die Seillebensdauern $lg N_{90,\omega}$ und $lg N_{10,\omega}$ wie folgt berechnen ([Feyrer1980], [Schoenherr2005], [Ernst2012]):

$$\lg N_{90,\omega} = \lg N_{\omega} + 1,282 \cdot \lg s \quad (5.7)$$

$$\lg N_{10,\omega} = \lg N_{\omega} - 1,282 \cdot \lg s \quad (5.8)$$

Analog zu den Abbildungen 5.11 bis 5.15 sind im Anhang die jeweiligen mittleren Lebensdauern N_{ω} mit den dazugehörigen Lebensdauern $N_{10,\omega}$ und $N_{90,\omega}$ für die untersuchten Seilkonstruktionen dargestellt.

5.3.4 Zusammenfassung der Versuche mit Verdrehung

Auf Basis der Versuchsergebnisse wurden die einzelnen Einflussfaktoren auf die Seillebensdauer herausgearbeitet und mittels Regressionsansätzen ein Optimum zwischen hoher Ergebnisgüte und mathematischer Komplexität des Polynoms P_{ω} gefunden.

Die Bewertung des Regressionsansatzes mittels der in der Seilforschung gebräuchlichen Verfahren –wie der Ermittlung und Betrachtung des Bestimmtheitsmaßes B und der Standardabweichung $\lg s$ – ergab, dass mit der Gleichung (5.4) die Lebensdauer von laufenden Drahtseilen unter Berücksichtigung der Verdrehung mit guter Genauigkeit beschrieben werden kann.

Wird das in Gleichung (5.4) dargestellte Polynom P_{ω} zur Beschreibung des Einflusses der Verdrehung auf die Seillebensdauer delogarithmiert, entspricht dies in Anlehnung an Feyrer ([Feyrer2007]), der für unterschiedliche Einflüsse auf die Seillebensdauer sogenannte Biegewechselfaktoren $f_{N,i}$ aufführt, einem weiteren Biegewechselfaktor $f_{N,\omega}$ der erstmals den Einfluss der Verdrehung abbildet.

In Abhängigkeit der Seilkonstruktion, der durchmesserbezogenen Last S/d^2 und des D/d -Verhältnisses hat die Verdrehung unterschiedlichen Einfluss auf die Seillebensdauer. Diese wechselseitigen Abhängigkeiten werden in den Diagrammen der Abbildungen 5.21 bis 5.24 deutlich, bei denen die prozentuale Veränderung der mittleren Bruchbiegewechselfaktorzahl N_m mit dem Verdrehwinkel ω und der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 dargestellt ist.

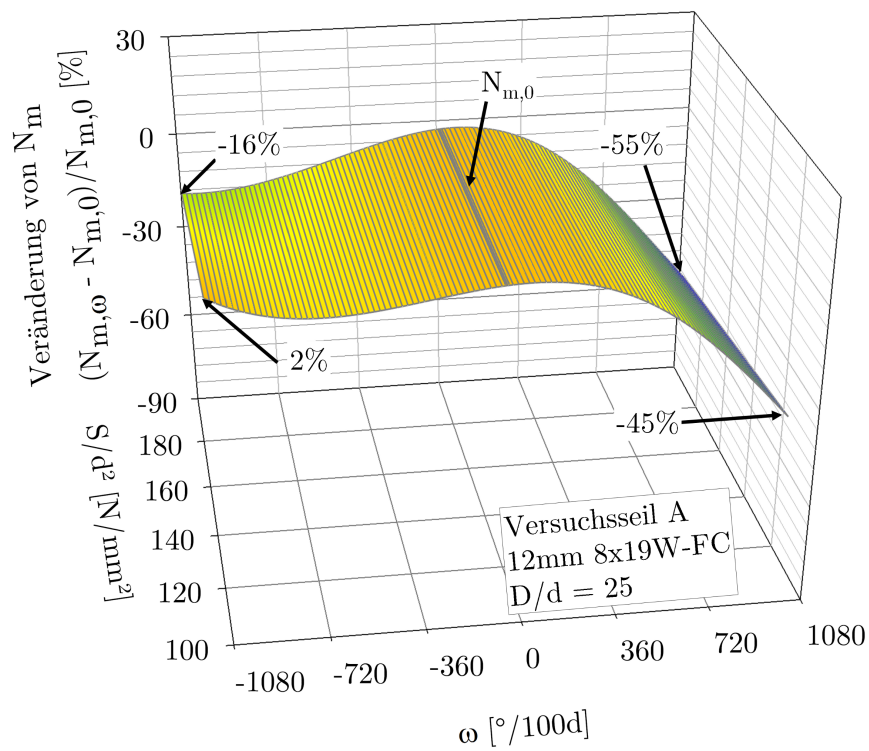
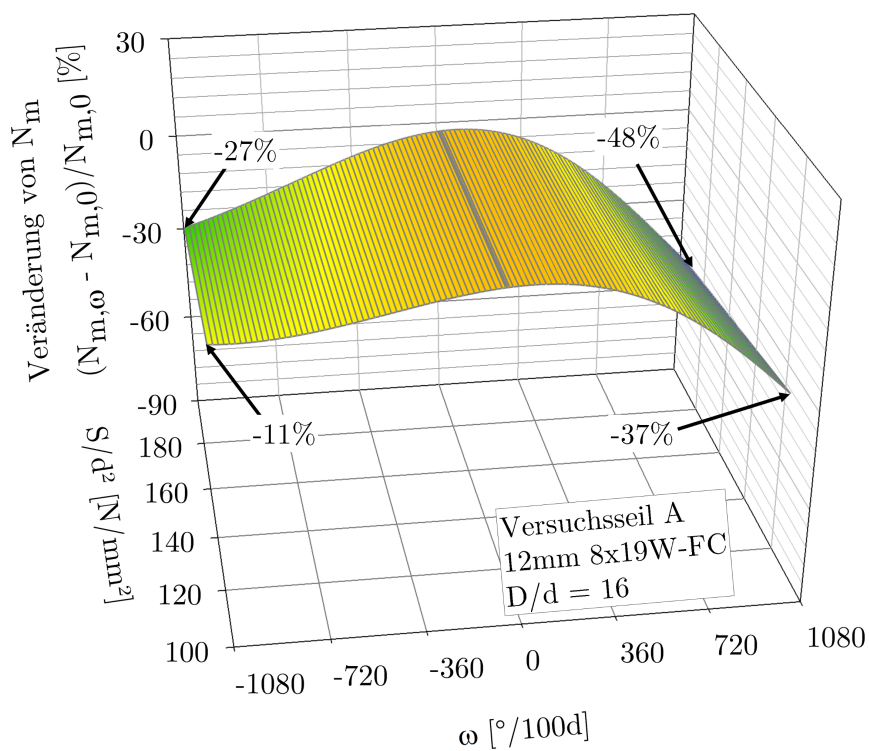
(a) $D/d = 25$ (b) $D/d = 16$

Abbildung 5.21: Prozentuale Veränderung der rechnerischen Biegeweichselzahl bei Versuchsseil A in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω , der seildurchmesserbezogenen Last S/d^2 und des D/d -Verhältnisses

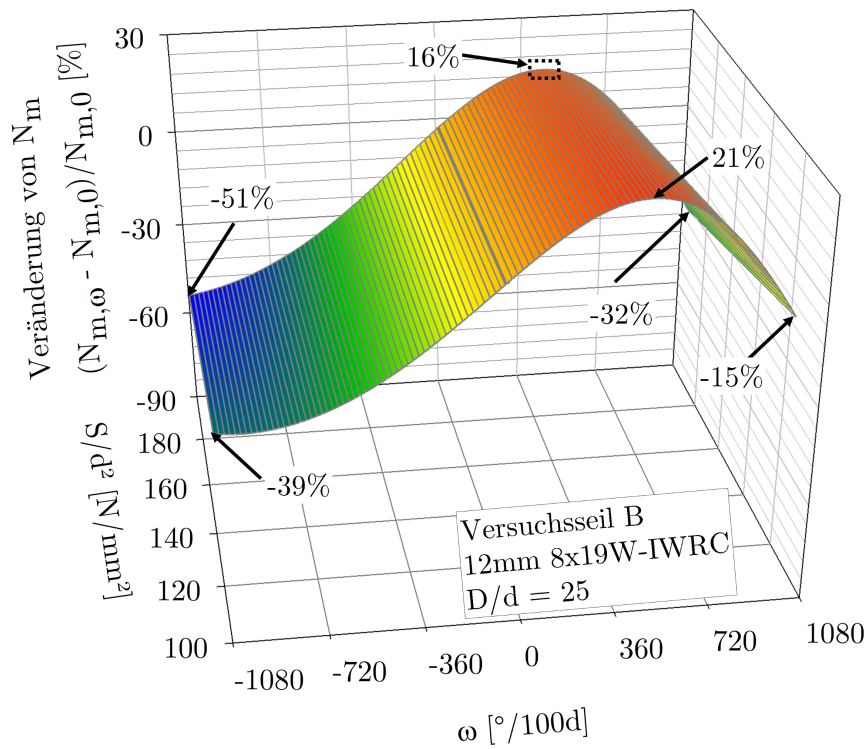
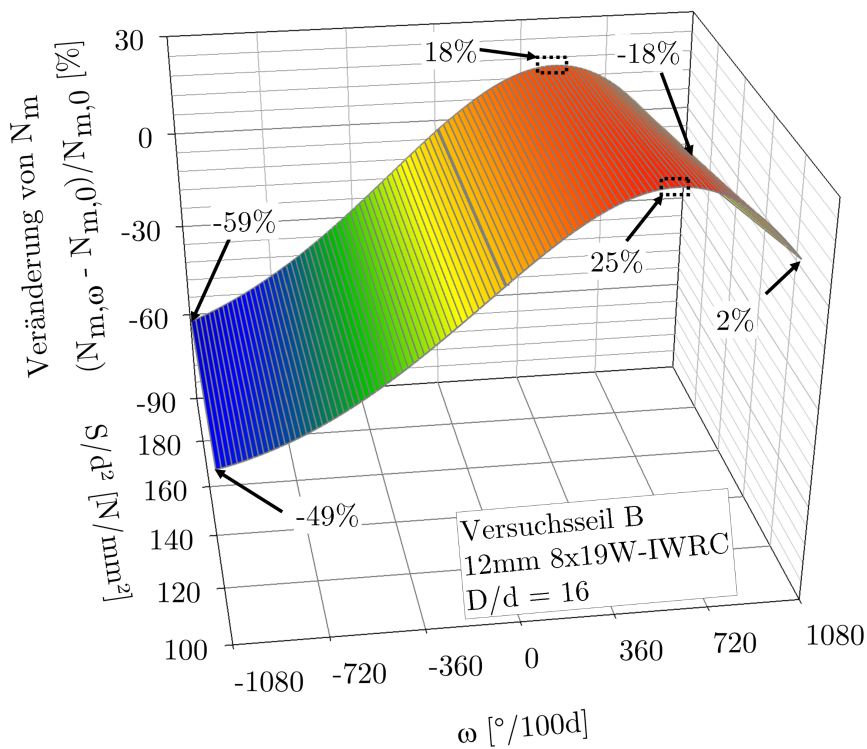
(a) $D/d = 25$ (b) $D/d = 16$

Abbildung 5.22: Prozentuale Veränderung der rechnerischen Biege-wechselzahl bei Versuchsseil B in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω , der seildurchmesserbezogenen Last S/d^2 und des D/d -Verhältnisses

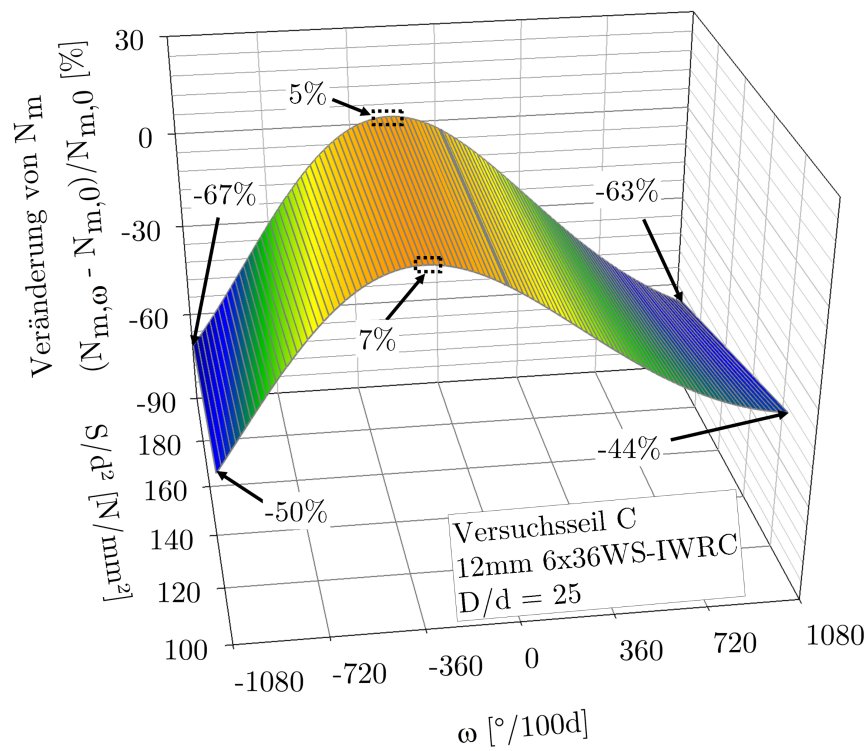
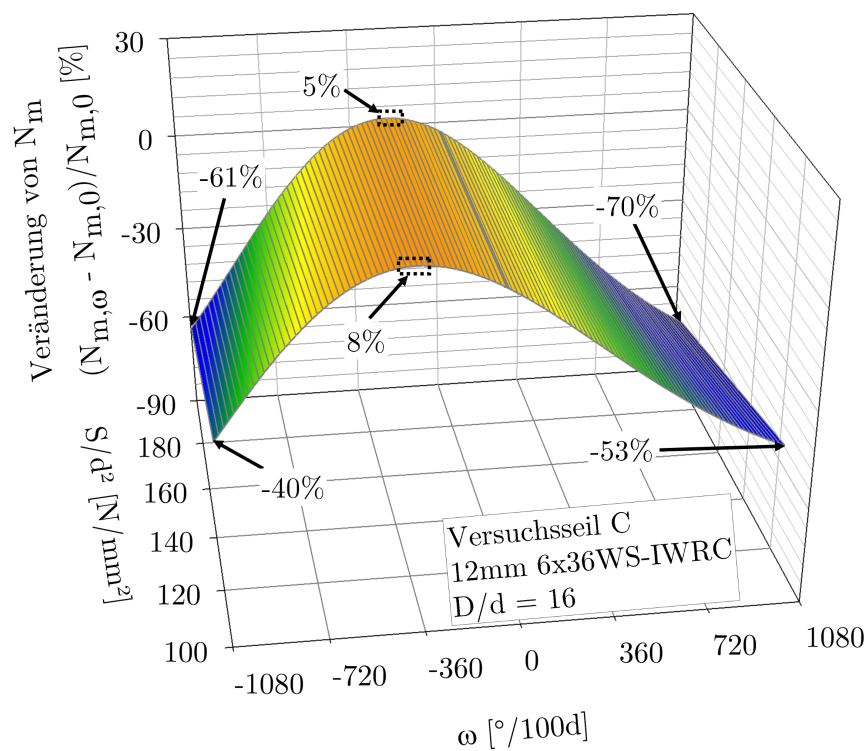
(a) $D/d = 25$ (b) $D/d = 16$

Abbildung 5.23: Prozentuale Veränderung der rechnerischen Biege-wechselzahl bei Versuchsseil C in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω , der seildurchmesserbezogenen Last S/d^2 und des D/d -Verhältnisses

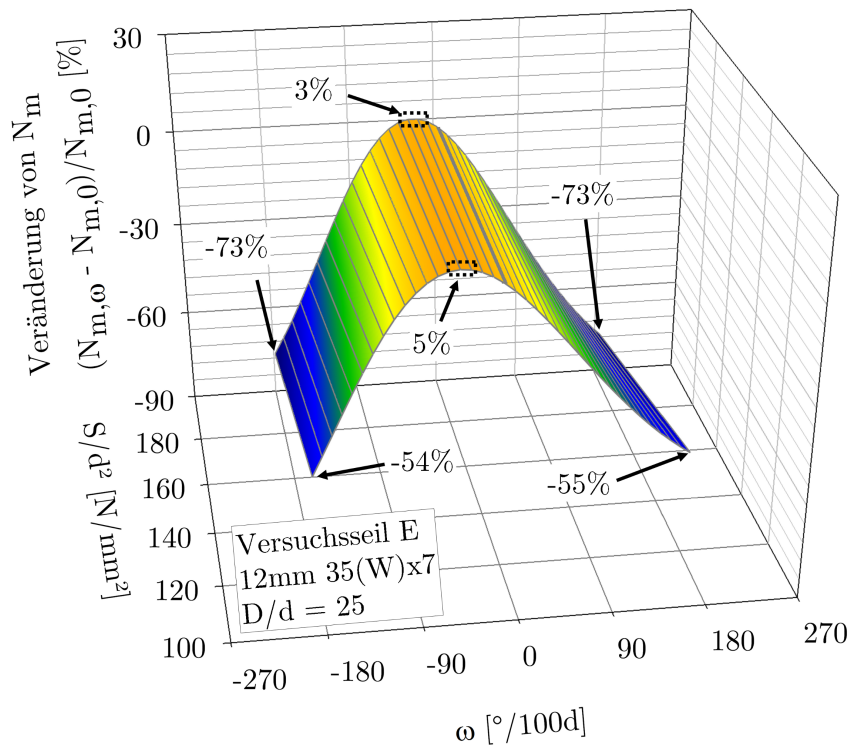
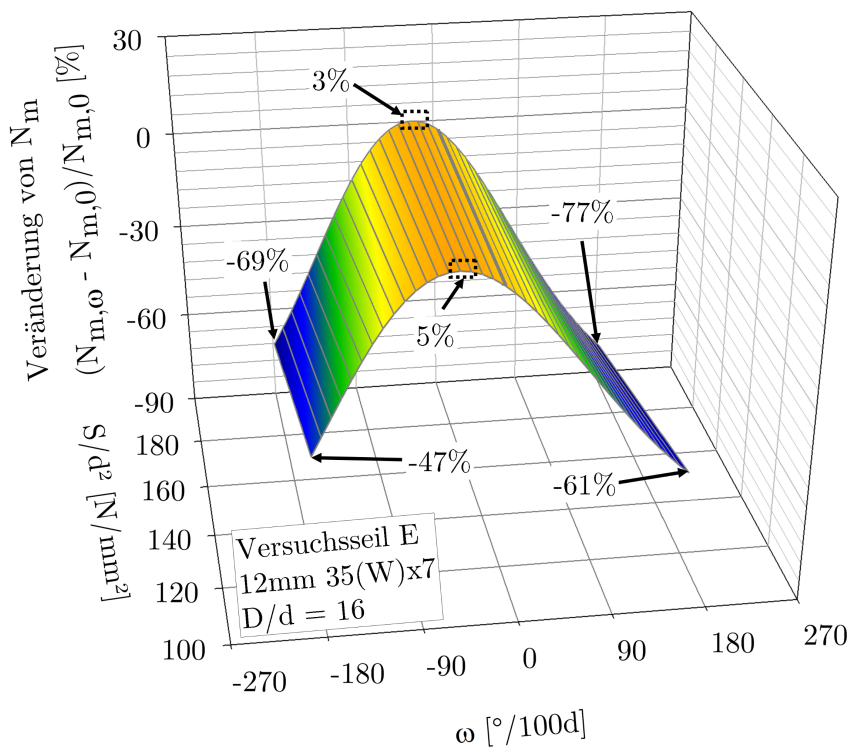
(a) $D/d = 25$ (b) $D/d = 16$

Abbildung 5.24: Prozentuale Veränderung der rechnerischen Biegeweichselzahl bei Versuchsseil E in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω , der seildurchmesserbezogenen Last S/d^2 und des D/d -Verhältnisses

In Abbildung 5.21 ist bei beiden D/d -Verhältnissen erkennbar, dass mit zunehmendem Verdrehwinkel in positiver Richtung ($\omega > 0$) die rechnerische Biegewechselzahl stärker abfällt als in negativer Richtung, bei der die Lebensdauer bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ und einer seildurchmesserbezogenen Zugkraft von $S/d^2 = 117\text{N}/\text{mm}^2$ sogar leicht zunimmt. Der Einfluss des Verdrehwinkels ω auf die rechnerische Biegewechselzahl ist je Verdrehrichtung und D/d -Verhältnis unterschiedlich in seiner Größe. Des Weiteren ist in den Diagrammen der Abbildung 5.21 zu erkennen, dass bei beiden separat dargestellten D/d -Verhältnissen der Einfluss des Verdrehwinkels ω mit zunehmender Last steigt.

Aus den Diagrammen in Abbildung 5.22 ist ersichtlich, dass das Versuchsseil B empfindlicher auf eine negative Verdrehung ($\omega < 0$) reagiert als das Versuchsseil A. Bei einer positiven Verdrehung ($\omega > 0$) hingegen ist eine deutliche Zunahme von bis zu 25%⁴⁵ der mittleren Biegewechselzahl bei Versuchsseil B zu erkennen, an die sich ein Abfallen der Lebensdauer anschließt.

Die Diagramme in Abbildung 5.23 zeigen, dass die rechnerische Biegewechselzahl des Versuchsseils C bei beiden dargestellten D/d -Verhältnissen mit zunehmendem Verdrehwinkel in positiver Richtung ($\omega > 0$) sinkt. Bei einer negativen Verdrehung ($\omega < 0$) steigt zunächst die Lebensdauer leicht an (maximaler Wert: 8%⁴⁶), wobei sich ein relativ starkes Abfallen der Biegewechselzahl an diesen Bereich anschließt.

Die Versuchsseile C und D entsprechen einer 6x36WS-Konstruktion mit Stahleinlage. Während Versuchsseil C einen Seilnenndurchmesser von $d_{nenn,C} = 12\text{mm}$ aufweist, besitzt das Versuchsseil D einen Seilnenndurchmesser von $d_{nenn,D} = 16\text{mm}$. Der Lebensdauerungsverlauf des Versuchsseils D in Abbildung 5.14 weist u. a. im Gegensatz zu dem Lebensdauerungsverlauf des Versuchsseils C (Abbildung 5.13) im Bereich eines negativen Verdrehwinkels $\omega < 0^\circ/100d$ einen etwas flacheren Verlauf auf. Eine Erklärung hierfür ist die in Kapitel 2.3 auf Seite 42 beschriebene Theorie von Shitkow und Pospechow, die eine unwesentliche Vergrößerung der Berührfläche zwischen benachbarten Drähten bei einem Seilnenndurchmesser von $d_{nenn} = 16\text{mm}$ gegenüber eines Seilnenndurchmessers von $d_{nenn} = 12\text{mm}$ beschreibt [Shitkow1957]. Bei einem negativen Verdrehwinkel wird nach angewandter Definition das Seil aufgedreht und es entsteht eine Vergrößerung der Litzensperrung. Die Pressungen an den möglichen Kontaktstellen benachbarter Litzen werden somit verringert und die Drähte an diesen Kontaktstellen hinsichtlich Pressung entlastet. Aufgrund der Vergleichsmöglichkeit mit ausschließlich einer Seilkonstruktion und des untersuchten Durchmesserbereichs von 12 mm und 16 mm kann keine generelle Aussage über den Einfluss des Seildurchmessers auf die Lebensdauer verdrehter Seile

⁴⁵ $S/d^2 = 117\text{N}/\text{mm}^2$; $D/d = 16$; $600^\circ/100d \leq \omega \leq 620^\circ/100d$.

⁴⁶ $S/d^2 = 117\text{N}/\text{mm}^2$; $D/d = 16$; $-340^\circ/100d \leq \omega \leq -300^\circ/100d$.

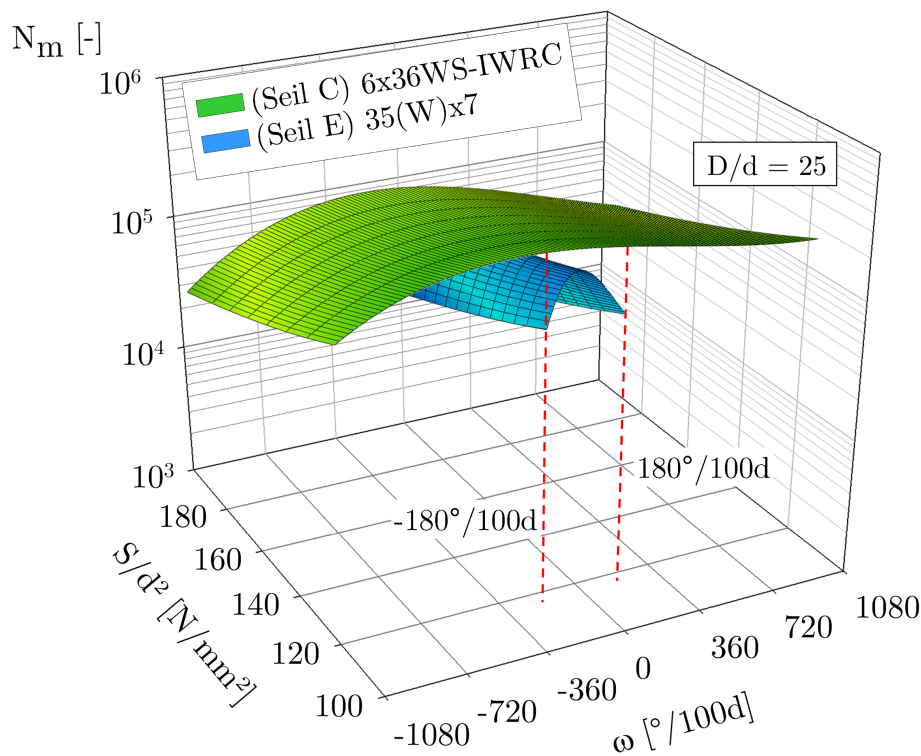


Abbildung 5.25: Vergleich der theoretisch bestimmten Lebensdauererläufe der Versuchsseile C und E bei konstantem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$

getroffen werden.

Als besonders groß ist der Einfluss einer Verdrehung bei mehrlagigen Spirallitzenseilen zu bewerten. Die Abbildung 5.24 zeigt in den dargestellten Diagrammen jeweils die Veränderung der rechnerischen Bruchbiegewechselzahl im Bezug zur Bruchbiegewechselzahl im unverdrehten Zustand in Abhängigkeit der durchmesserbezogenen Seilzugkraft S/d^2 und des Verdrehwinkels ω .

Aus den Diagrammen in Abbildung 5.24 ist zu erkennen, dass bereits bei einem Verdrehwinkel von $\omega = 180^\circ/100d$ eine gravierende Reduzierung der ertragbaren Biegewechselzahl von bis zu -77% ⁴⁷ auftritt. Innerhalb eines niedrigen Verdrehwinkelbereichs in negativer Richtung ($\omega < 0$) steigt die rechnerische Seillebensdauer zunächst geringfügig an, woran sich ein Abfallen der Biegewechselzahl anschließt.

Das in Abbildung 5.25 dargestellte Diagramm zeigt den gravierenden Einfluss der Verdrehung auf ein mehrlagiges Spirallitzenseil (Versuchsseil E) im Vergleich zu einem einlagigen Rundlitzenseil (Versuchsseil C) durch direkte Gegenüberstellung der mit Gleichung (5.4) ermittelten Lebensdauerkurven. Bei einer konstanten durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 195\text{N/mm}^2$ und einem konstanten D/d -Verhältnis

⁴⁷ $S/d^2 = 195\text{N/mm}^2$; $D/d = 16$.

von $D/d = 25$ erreicht die Lebensdauer des Versuchsseils C bei einem Winkel von $\omega = -200^\circ/100d$ ihren Maximalwert, der 5% über dem mit Gleichung (5.4) bei $\omega = 0^\circ/100d$ ermittelten Referenzwert liegt. Die ermittelte Lebensdauer des mehrlagigen Spiralrundlitzenseils (Versuchsseil E) weist bei gleicher Last und gleichem D/d -Verhältnis einen größeren Einfluss der Verdrehung auf. Bereits bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -90^\circ/100d$ besteht eine Lebensdauerreduzierung von ca. -16% und bei einem Verdrehwinkel von $\omega = 90^\circ/100d$ liegt ein Lebensdauerabfall von ca. -38% vor. Bei einem Verdrehwinkel von $\omega = \pm 180^\circ/100d$ liegt die Lebensdauerreduzierung bei bereits -73% im Bezug zur Lebensdauer im unverdrehten Zustand. Durch das starke Abfallen der ertragbaren Biegewechselzahl bei mehrlagigen Spiralrundlitzenseilen unter Verdrehung, kann ein größerer Verdrehwinkel dazu führen, dass in Abhängigkeit der Last, des D/d -Verhältnisses und des Verdrehwinkels das Seil bereits nach wenigen Biegewechseln versagt.

Der enorme Einfluss von Verdrehung auf die Lebensdauer mehrlagiger Spiralrundlitzenseile kann im Wesentlichen auf die in Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.5 beschriebenen theoretischen Betrachtungen zurückgeführt werden. Weiterführende Betrachtungen über die vorgefundenen Schadensmechanismen der untersuchten Seile werden in der folgenden mikroskopischen Untersuchungen (Kapitel 5.4.2) vorgenommen. Unterschiedliche Einflüsse, die sich aus dem geometrischen Aufbau und deren durch Verdrehung verursachte Veränderung ergeben, sind in Kapitel 6.1 auf Seite 146 mit dem Hinweis auf ihre komplexe Wirkungsweise aufgeführt.

5.4 Ablegereife und Schädigungsverhalten unter dem Einfluss der Verdrehung

Die Versuchsseile wurden bei den Dauerbiegeversuchen bis zur Erfüllung eines der Kriterien aus Kapitel 4.4.2 gefahren. Durch die versuchsbegleitende Drahtbruchzählung an sichtbaren Drähten und das Prüfen der Seile bis zum Bruch, kann die vorhandene Restlebensdauer vom Erkennen der Ablegereife bis zum Versagen bewertet werden.

5.4.1 Ablegereife

Zur Bestimmung des Zeitpunktes, ab welchem ein Drahtseil im Betrieb abzulegen ist, gibt es unterschiedliche Kriterien, die normativ erfasst sind (z. B. [DIN15020:1974] u. [ISO4309:2010(E)]). Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, gilt das Erreichen einer definierten Anzahl an sichtbaren Drahtbrüchen als wichtigstes Kriterium zur Erkennung der

Ablegereife (vgl. [Ren1996] u. [Feyrer2000]).

Da die DIN 15020 eine Unterscheidung der beiden untersuchten Laststufen vornimmt und somit zu einer detaillierten Untersuchung beiträgt, wird im Folgenden diese als Bezugsnorm herangezogen (vgl. [DIN15020:1974]). Des Weiteren sind für die untersuchten Seilkonstruktionen die Ablegedrahtbruchzahlen nach ISO 4309 kleiner oder gleich den Ablegedrahtbruchzahlen nach DIN 15020, was hinsichtlich der Ablegereife eine erhöhte oder gleichbleibende Sicherheit darstellt [Schoenherr2005] (vgl. [ISO4309:2010(E)]).

Damit ein rechtzeitiges Erkennen der Ablegereife vor dem Seilversagen gewährleistet ist, definiert Feyrer bei der Ermittlung von Ablegedrahtbruchzahlen auf Basis einer Vielzahl an Versuchen die Anzahl an Drahtbrüchen pro Bezugslänge, die bei 80% der Seillebensdauer erreicht sind ([Feyrer1984] u. [Feyrer2000] bzw. [Feyrer2007]). Die Ablegedrahtbruchzahl B_{A30} auf einer Bezugslänge von $30d$ errechnet sich nach [Feyrer2000] wie folgt:

$$B_{A30} = g_0 - g_1 \left(\frac{S d_0^2}{S_0 d^2} \right)^2 - g_2 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - g_3 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot \left(\frac{S d_0^2}{S_0 d^2} \right)^2 \quad (5.9)$$

In [Feyrer2000] bzw. [Feyrer2007] sind die Konstanten g_i für unterschiedliche Seilkonstruktionen tabellarisch aufgeführt.

Die Ablegedrahtbruchzahl B_{A6} auf einer Bezugslänge von $6d$ berechnet sich nach [Feyrer2000] mit

$$B_{A6} = 0,5 \cdot B_{A30} \quad (5.10)$$

Die versuchsoptimierte Parameterauswahl für die Dauerbiegeversuche wurde so gewählt, dass ein möglichst breites Spektrum an Lastfällen abgedeckt ist. Dies übersteigt nach der [DIN15020:1974] jedoch teilweise die Zulässigkeit in der Anwendung, weshalb zur Betrachtung der Ablegereife ausschließlich die jeweiligen Dauerbiegeversuche mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ betrachtet werden sollen.

Die Anzahl an äußerlich sichtbaren Drahtbrüchen, die auf einer Bezugslänge von $30d$ und $6d$ nach [DIN15020:1974] und [Feyrer2007] die Ablegereife anzeigen, sind in Tabelle 5.6 in Anlehnung an [Schoenherr2005] aufgeführt. Die sich mit den Gleichungen (5.9) und (5.10) ergebenden Werte wurden auf die Ganzzahl entsprechend gerundet.

Während der durchgeführten Dauerbiegeversuche wurden, wie in Kapitel 4.4.4 bereits beschrieben, äußerlich sichtbare Drahtbrüche in Intervallen erfasst. Die Untersuchung erfolgte dabei visuell und taktil innerhalb der gesamten Biegelänge. Die Biegelänge bei den Dauerbiegeversuchen mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ beträgt $60d$. Die Gesamtbiegelänge ist dabei in zwei sogenannte Biegezonen von je $30d$ unterteilt.

Damit die Aussagekraft der Untersuchungen hinsichtlich der Ablegereife im Hinblick auf die Drahtbruchzahl erhöht werden kann, werden in Analogie zu [Schoenherr2005] die beiden Biegezonen separat betrachtet.

Tabelle 5.6: Drahtbruchzahl zum Erreichen der Ablegereife bei $D/d = 25$

	S/d^2	Bezugslänge	A	B	C	D	E ⁴⁸
Nach DIN 15020	195N/mm ²	6d	6	6	9	9	5
		30d	13	13	18	18	10
	117N/mm ²	6d	13	13	18	18	5
		30d	26	26	35	35	10
Nach Gln. (5.9) u. (5.10)	195N/mm ²	6d	4	10	11	11	5
		30d	7	21	22	22	9
	117N/mm ²	6d	6	13	14	14	8
		30d	13	27	28	28	17

Die Diagramme in Abbildung 5.26 zeigen für die untersuchten Seilkonstruktionen das Verhältnis der Anzahl an Biegewechseln, bei denen die entsprechende Anzahl an Drahtbrüchen aus Tabelle 5.6 erreicht wurde (N_A), zur Bruchbiegewechselzahl (N_B) über dem Verdrehwinkel ω .

Die Biegewechselzahl wurde zwischen den jeweiligen Ableseintervallen durch logarithmische Interpolation ermittelt. Wurde die Ablegedrahtbruchzahl nach den jeweiligen Kriterien in Tabelle 5.6 nicht erreicht und beträgt das Verhältnis $N_{\text{letztesAblese}}/N_B \geq 0,8$, so wurde der letzte Ablesewert verwendet und in die in Abbildung 5.26 dargestellten Diagramme übernommen (dargestellt mit weißem Flächeninhalt der zugehörigen Symbole). Die dargestellten Diagramme enthalten zudem eine Markierung (gestrichelte Linie) auf der Höhe des Verhältniswerts von 0,8. Dies entspricht jeweils 80% der Bruchbiegewechselzahl und damit der Seillebensdauer. Nach Feyrer wird ein Erkennen der Ablegereife anhand der Ablegedrahtbruchzahl bei 80% der Seillebensdauer als ausreichend früh angesehen [Feyrer1984].

⁴⁸Zur Berechnung der Ablegedrahtbruchzahlen des Versuchsseils E nach den Gleichungen (5.9) u. (5.10) wurden die Konstanten g_i aus [Feyrer2007] für ein Spiralrundlitzenseil der Konstruktion 34x7 verwendet.

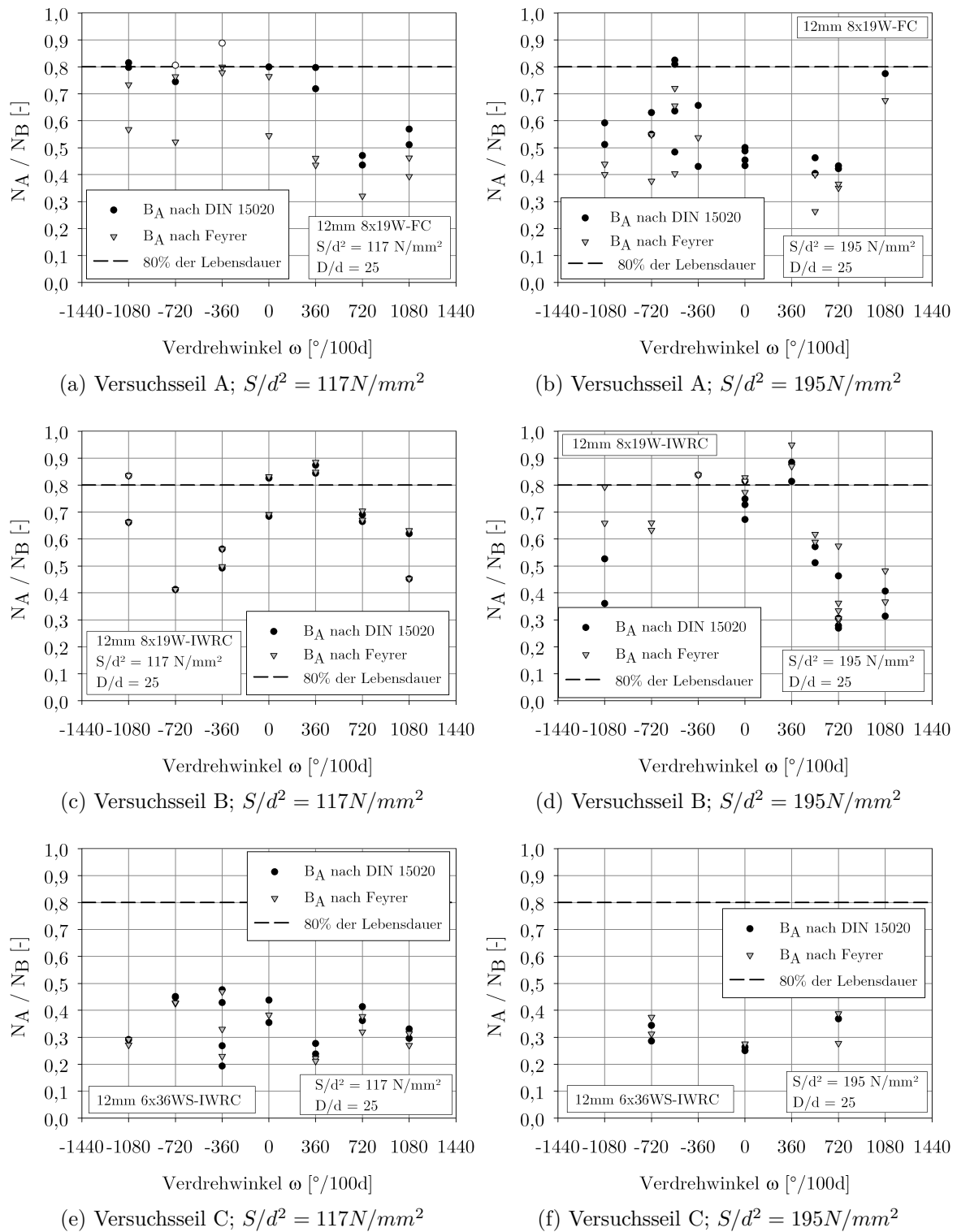


Abbildung 5.26: Biegewechselzahl bis zur Ablegereifeerkennung bzw. zum letzten Ablesen, bei dem die Ablegereife nicht erreicht war, im Verhältnis zur Bruchbiegewechselzahl über dem Verdrehwinkel ω

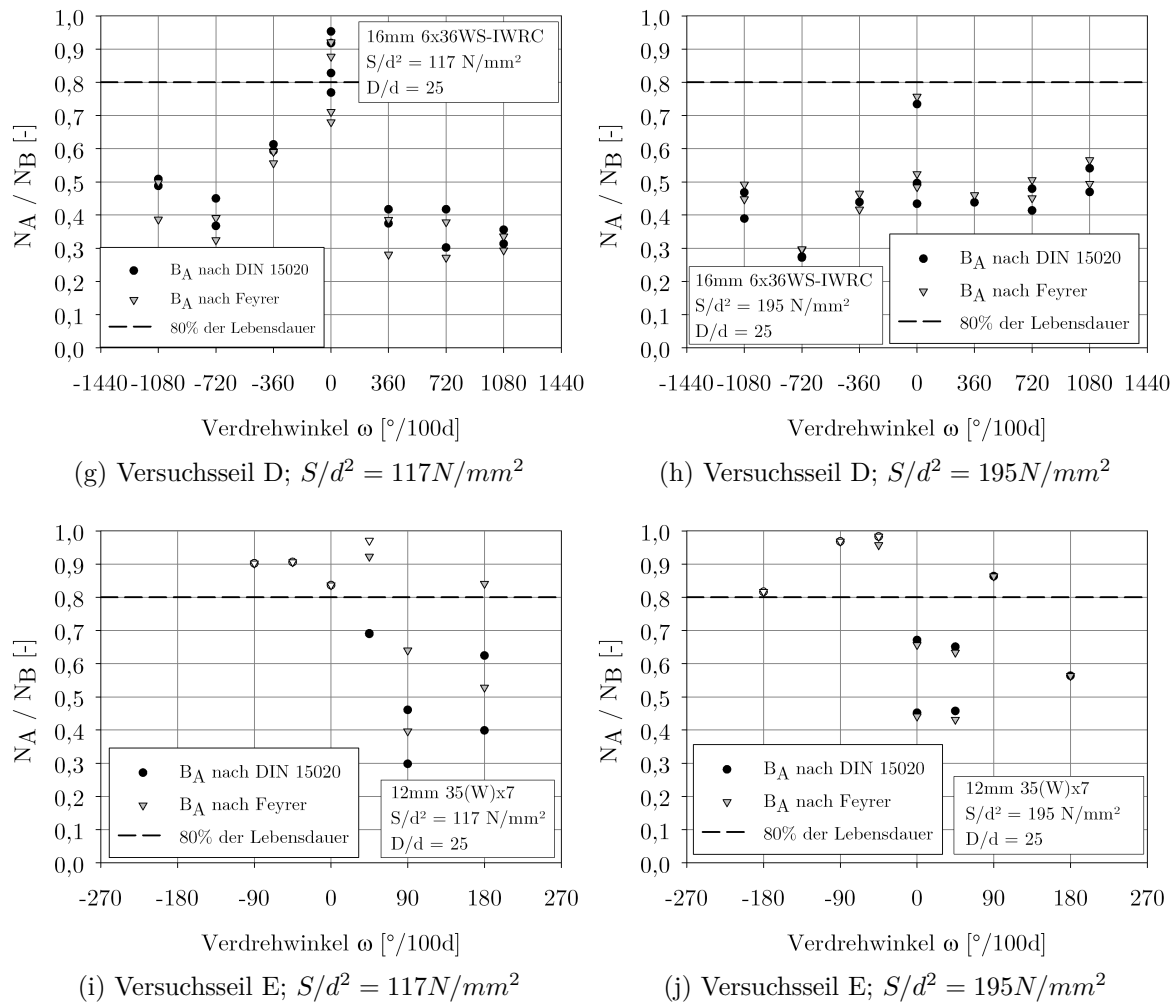


Abbildung 5.26: Biegewechselzahl bis zur Ablegereifeerkennung bzw. zum letzten Ablesen, bei dem die Ablegereife nicht erreicht war, im Verhältnis zur Bruchbiegewechselzahl über dem Verdrehwinkel ω

Bei den Auswertungen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bei Versuchsseil A unter Berücksichtigung beider Lastfälle die Ablegereife nach [DIN15020:1974] bei 81% der Versuche unabhängig vom Verdrehwinkel ω bei einer Seillebensdauer von $\leq 80\%$ erkannt wurde (siehe Abbildung 5.26 (a) und (b)). Die mit den Gleichungen (5.9) und (5.10) ermittelten Ablegedrahtbruchzahlen wurden dagegen bei 100% der hier ausgewerteten Versuche bei einer Seillebensdauer von $\leq 80\%$ erreicht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.7: Anteil der ausgewerteten Versuche, die $N_A/N_B \leq 0,8$ erfüllen

	S/d^2	A	B	C	D	E
Anteil $\leq 0,8$ (DIN 15020)	$117N/mm^2$	67%	64%	100%	77%	50%
	$195N/mm^2$	89%	78%	100%	100%	30%
Anteil $\leq 0,8$ (Gln. (5.9) u. (5.10))	$117N/mm^2$	100%	64%	100%	87%	25%
	$195N/mm^2$	100%	67%	100%	100%	36%

Bei den Versuchsseilen C und D, die der gleichen Seilkonstruktion entsprechen, hat sich gezeigt, dass bei den zur Auswertung verwendeten Versuchen die jeweiligen Ablegedrahtbruchzahlen im verdrehten Zustand zu 100% bei einer Seillebensdauer von $\leq 80\%$ erreicht wurden.

Das untersuchte mehrlagige Spiralsrundlitzenseil (Versuchsseil E) weist im Verhältnis zu den anderen untersuchten Seilkonstruktionen jeweils einen relativ geringen Anteil an Versuchen auf, bei denen die jeweilige Ablegedrahtbruchzahlen bei einer Seillebensdauer von $\leq 80\%$ erreicht waren. Bei einigen der ausgewerteten Versuchen hat sich gezeigt, dass selbst bei einer Lebensdauer von stellenweise über 90% die jeweiligen Ablegedrahtbruchzahlen nicht erreicht waren (siehe Abbildung 5.26 (i) und (j)). Auf die nur stellenweise mögliche Erkennung der Ablegereife durch die äußerlich sichtbare Drahtbruchanzahl bei Spiralsrundlitzenseilen im unverdrehten Zustand hat Feyrer [Feyrer1997a] bereits hingewiesen. Im verdrehten Zustand ist in den Diagrammen in Abbildung 5.26 für das Versuchsseil E die Tendenz zu erkennen, dass die Ablegedrahtbruchzahl in zuge-drehtem Zustand des Seils ($\omega > 0$) früher erreicht wird als bei aufgedrehtem Zustand des Seils ($\omega < 0$). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass durch die in Kapitel 3.5 beschriebene Lastumverteilung die äußere Litzenlage beim Zudrehen einen höheren Spannungszustand erfährt und dadurch vermehrt äußerlich sichtbare Drahtbrüche auftreten, was zu einer frühzeitigen Ablegereifeerkennung führt. Bei den untersuchten positiven Verdrehwinkeln von $\omega < 180^\circ/100d$ und einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ hat sich gezeigt, dass jeweils der Bruch einer Außenlitze das definitionsgemäße Versuchsende anzeigte. Dies stellte Feyrer bei Versuchen mit Spiralsrundlitzenseilen im unverdrehten Zustand ebenfalls fest und bezeichnete diesen Umstand als unabhängiges Kriterium zur sicheren Erkennung der Ablegereife bei Spiralsrundlitzenseilen, da die Versuche fortgesetzt werden konnten [Feyrer1997]. Bei den hier durchgeführten Versuchen mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ und einem Verdrehwinkel von $\omega = 180^\circ$ hat sich jedoch gezeigt, dass der jeweilige Bruch mehrerer Außenlitzen zum Versuchsende führten.

Im aufgedrehten Zustand waren häufig die jeweiligen Ablegedrahtbruchzahlen beim letzten Ableseintervall vor dem Bruch noch nicht erreicht. Je nach Größe des negativen Verdrehwinkels (Aufdrehen) und der anliegenden Last bildete sich bei den Versuchen mit dem Versuchsseil E ein sogenannter Korb⁴⁹ aus, anhand dessen die Ablegereife erkannt werden kann [DIN15020:1974].

Bei den Versuchen mit Versuchsseil E und einem negativen Verdrehwinkel von $\omega = -180^\circ$ konnte häufig mit fortschreitendem Versuchsverlauf die Ausbildung einer korkenzieherartigen Verformung⁵⁰ beobachtet werden.

Die Ablegereife nach den in Tabelle 5.6 aufgeführten Ablegedrahtbruchzahlen wurde bei einlagigen Rundlitzenseilen überwiegend zuerst auf der Bezugslänge von $30d$ erreicht. Eine Ausnahme bildet hier das Versuchsseil C, bei dem die mit den Gleichungen (5.9) und (5.10) ermittelten Ablegedrahtbruchzahlen bei einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 117N/mm^2$ auf den Bezugslängen $6d$ und $30d$ gleich häufig zuerst erkannt wurden. Bei dem untersuchten mehrlagigen Spirallitzenseil zeigt sich im Hinblick auf die Ablegedrahtbruchzahl nach [DIN15020:1974] bei einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 117N/mm^2$, dass diese öfters auf einer Bezugslänge von $6d$ zuerst erreicht wurde. Ansonsten überwiegt auch hier die Häufigkeit, bei der die Ablegedrahtbruchzahl auf einer Bezugslänge von $30d$ zuerst erreicht wurde.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungsergebnisse bezüglich der Ablegereifeerkennung anhand der in [DIN15020:1974] tabellarisch aufgeführten oder mit den Gleichungen (5.9) und (5.10) nach [Feyrer2000] bzw. [Feyrer2007] berechneten Ablegedrahtbruchzahlen, zeigen erstmals den Einfluss von Verdrehung auf. Für eine allgemeingültige Aussage über die Ablegereifeerkennung für Seile im verdrehten Zustand sind weiterführende Versuchsreihen notwendig, welche auf der hier vorgenommenen Grundlagenforschung aufbauen können. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der u. a. von Feyrer und Jahne bereits untersuchten Streuung der Anzahl an Drahtbrüchen in Abhängigkeit der Biegelänge und der Anzahl an Versuchen, die zur Auswertung hinsichtlich der Drahtbruchzahl herangezogen werden konnten ([Feyrer1982] u. [Jahne1992]).

⁴⁹Der Begriff „Korb“ bzw. „Korbbildung“ beschreibt eine Stelle am Seil, an der Drähte bzw. Litzen mit Längenüberschuss ein Gewölbe ausbilden und somit aus dem Seilverband heraustreten (vgl. [DIN15020:1974]).

⁵⁰Der Begriff „korkenzieherartige Verformung“ wird in der Norm [DIN15020:1974] mit einer Wendelform der Seilachse im unbelasteten Zustand beschrieben.

5.4.2 Mikroskopische Untersuchung

Für die mikroskopischen Untersuchungen wurden die in den Dauerbiegeversuchen getesteten Versuchsseile nach dem Erreichen des Versuchsendes entsprechend abgetrennt und gelagert. Die archivierten Seilstücke beinhalten jeweils die gesamte Biegezone.

Die Auswahl der Versuchsproben, welche zur Mikroskopierung verwendet wurden, erfolgte systematisch anhand der in Kapitel 5.3 beschriebenen Versuchsergebnisse. Zur Auswahl eines Prüflings wurden jeweils eine Referenzprobe bei $0^\circ/100d$ und eine Probe mit entgegengesetztem Verdrehwinkel ausgewählt. Die weiteren Versuchsparameter wie Last und D/d -Verhältnis sind bei jeder Untersuchungsreihe konstant.

Mittels der mikroskopischen Untersuchungen werden die nach Versuchsende vorgefundenen Schadensbilder für gezielt ausgewählte Proben wiedergegeben und analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Folgenden dargestellt⁵¹.

Da die beiden Versuchsseile C und D der gleichen Seilkonstruktion entsprechen, wird im Rahmen der mikroskopischen Analyse ausschließlich das Versuchsseil C untersucht.

Zur mikroskopischen Untersuchung des Versuchsseils A wurden Versuchsproben mit den in Tabelle 5.8 aufgeführten Versuchsparametern ausgewählt. Für eine Zuordnung der Probenauswahl zu den Ergebnissen der Dauerbiegeversuche in Kapitel 5.3, ist in der Tabelle zusätzlich die Lebensdauer mit der jeweiligen Last und den dazugehörigen Verdrehwinkeln (als Punkte dargestellt) abgebildet.

Tabelle 5.8: Probenauswahl Versuchsseil A

S/d^2 [N/mm^2]	D/d -Verhältnis	ω [$^\circ/100d$]	Zuordnung
117	25	+1080	
117	25	0	
117	25	-1080	

Aus dem Diagramm in Tabelle 5.8 ist ersichtlich, dass die Lebensdauer bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +1080^\circ/100d$ reduziert wird, während sie unter einem entgegengesetzten Verdrehwinkel von $\omega = -1080^\circ/100d$ gegenüber der ertragbaren Biegewechszahl bei $\omega = 0^\circ/100d$ steigt.

⁵¹Die mikroskopischen Aufnahmen wurden mit einem digitalen Lichtmikroskop erstellt und anschließend mit einer Bildbearbeitungssoftware bearbeitet ohne den Informationsgehalt zu verändern.

Alle Außenlitzen der untersuchten Proben weisen Kerben im Kontaktbereich zu den benachbarten Außenlitzen auf (Abbildung 5.27⁵²). Zusätzlich wurden sowohl Drahtbrüche an den Kerben der Litzenkontaktstellen als auch Drahtbrüche an den Drahtkuppen festgestellt.

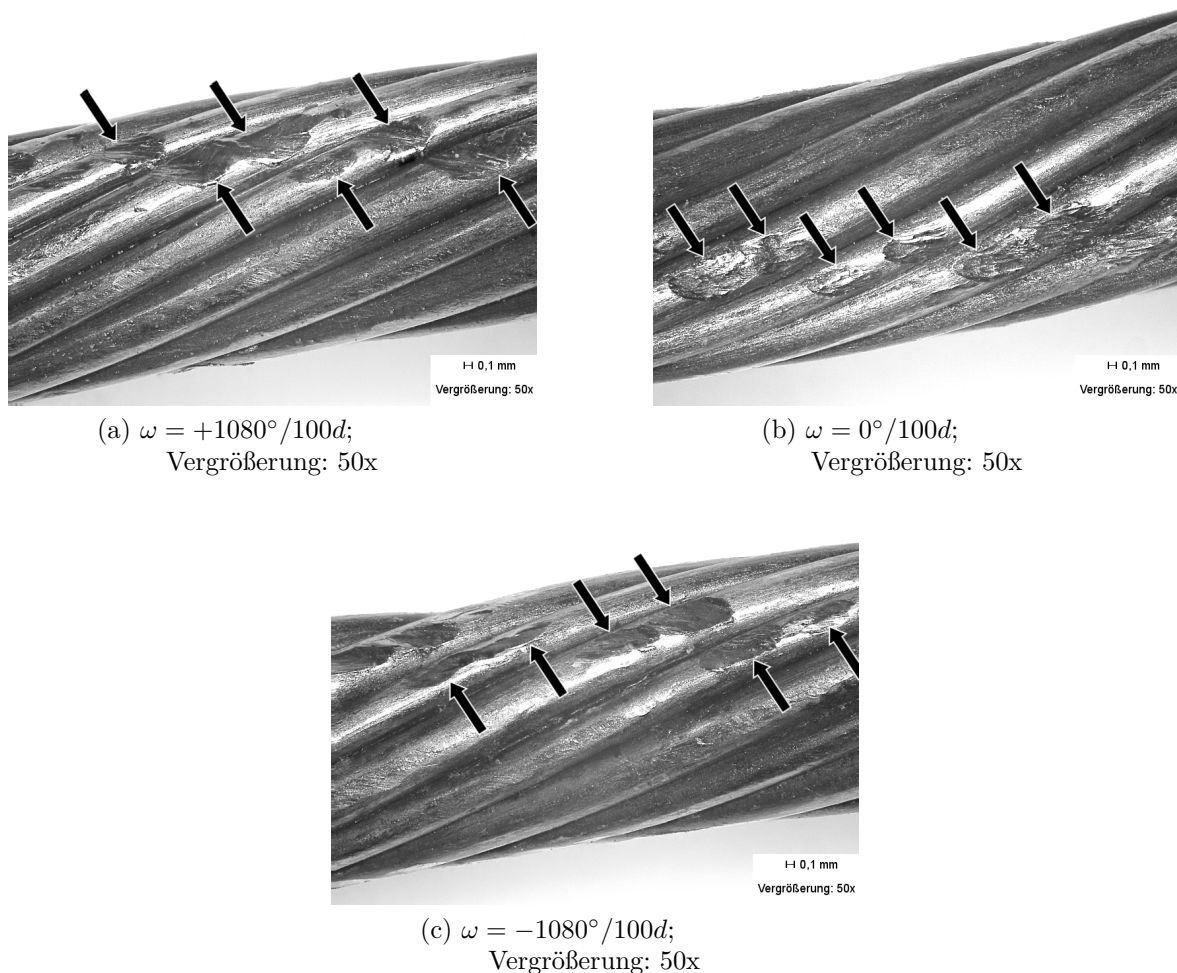


Abbildung 5.27: Vergrößerte Darstellung der Außenlitzen des Versuchsseils A; $S/d^2 = 117\text{N}/\text{mm}^2$; $D/d = 25$

Aufgrund des gleichen Maßstabs der dargestellten Mikroskopaufnahmen, kann ein direkter Vergleich der vorgefundenen Pressungsstellen und deren Ausprägungen vorgenommen werden. Die mikroskopierten Kerben auf den Außenlitzen des Versuchsseils A unterscheiden sich zwischen den Verdrehwinkeln $\omega = 0^\circ/100d$ und $\omega = -1080^\circ/100d$ nicht wesentlich, während die Kerben bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +1080^\circ/100d$ deutlich ausgeprägter erscheinen. Die deutlicheren Ausprägungen der Kerben bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +1080^\circ/100d$ sind auf die verminderte Sperrung (Abstand)

⁵²In den abgebildeten Mikroskopaufnahmen wird mit Pfeilen auf Kerben hingewiesen.

zwischen den Litzen beim Zudrehen des Seils und der damit einhergehenden Erhöhung der Pressung zurückzuführen.

Aus der Mikroskopanalyse und den Versuchsergebnissen aus Kapitel 5.3 kann geschlossen werden, dass bei der untersuchten Seilkonstruktion A die Pressungsverhältnisse einen wesentlichen Einfluss auf die ertragbare Biegewechselzahl haben. Bei erhöhter Pressung, die beim Zudrehen des Seils entsteht, sinkt die ertragbare Biegewechselzahl. Beim Aufdrehen des Seils und einer damit verminderten Pressung wirkt sich dies im Umkehrschluss positiv auf die Seillebensdauer aus. Hinzu kommt, dass die Außenlitzen bei einem Aufdrehen des Seils zuge dreht werden und damit einhergehend die äußeren Drähte mehr belastet werden als im unverdrehten Zustand. Die Zugspannung im unverdrehten Seil ist in den Außendrähten niedriger als in den darunter liegenden Drahtlagen (z. B. [Feyrer2000]). Bei einer Mehrbelastung der Außendrähte und gleichzeitiger Entlastung der darunter liegenden Drahtlagen erfolgt somit eine Homogenisierung der Zugspannung über dem Litzenquerschnitt.

Die mikroskopische Untersuchung an Versuchsseil B erfolgte an Prüflingen, die in Dauerbiegeversuchen mit den in Tabelle 5.9 aufgeführten Parametern getestet wurden.

Tabelle 5.9: Probenauswahl Versuchsseil B

S/d^2 [N/mm^2]	D/d -Verhältnis	ω [$^\circ/100d$]	Zuordnung
195	16	+360	
195	16	0	
195	16	-360	

Wie aus dem Diagramm in Tabelle 5.9 zu erkennen ist, erfährt das Versuchsseil B bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$ eine Steigerung der Lebensdauer, während die ertragbare Biegewechselzahl bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ in Bezug zum unverdrehten Zustand sinkt.

Alle untersuchten Prüflinge weisen überwiegend Drahtbrüche an Berührstellen (Außenlitze/Außenlitze oder Außenlitze/Seileinlage) auf. Drahtbrüche an den außen liegenden Drahtkuppen sind weniger häufig. Bei dem Prüfling, der mit einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ getestet wurde, überwiegen die Drahtbrüche an den Kontaktstellen zwischen den Außenlitzen und der Seileinlage. Bei den weiteren untersuchten Prüflingen mit einem Verdrehwinkel von $\omega = 0^\circ/100d$ und $\omega = +360^\circ/100d$ sind Drahtbrüche

sowohl im Kontaktbereich der Außenlitzen untereinander als auch im Kontaktbereich der Außenlitzen und der Seileinlage vorzufinden. Die Kerben an den Berührstellen der Außenlitzen untereinander sind in Abbildung 5.28 dargestellt.

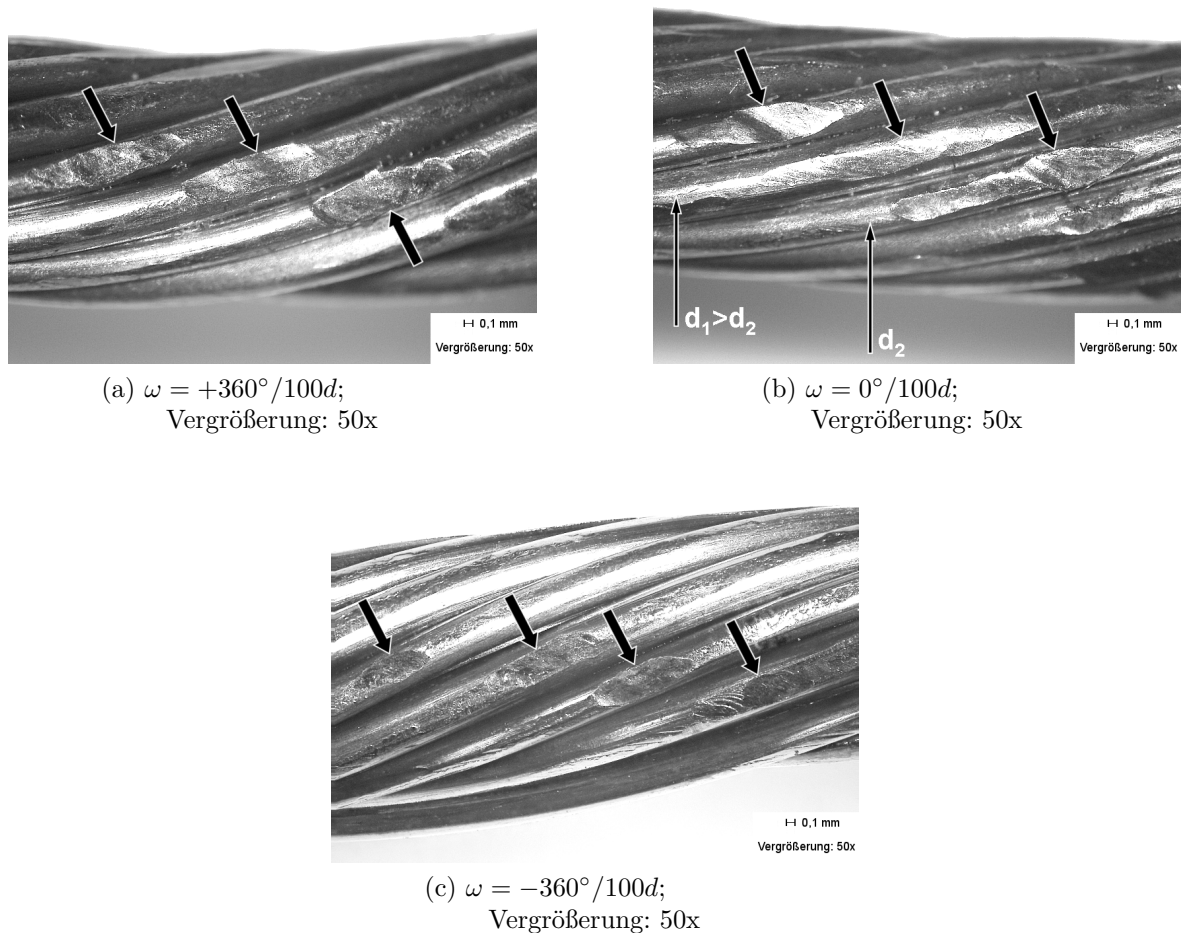


Abbildung 5.28: Vergrößerte Darstellung der Außenlitzen des Versuchsseils B; $S/d^2 = 195\text{N}/\text{mm}^2$; $D/d = 16$

Die Kerben sind im unverdrehten Zustand ($\omega = 0^\circ/100d$) auf den dünneren Drähten (d_2) der Warrington-Lage ausgeprägter als die Kerben auf den dickeren Drähten (d_1) dieser Lage. Im Vergleich dazu sind die Kerben bei einer Verdrehung von $\omega = +360^\circ/100d$ auf beiden Drahtstärken in etwa gleichmäßig ausgeprägt, was auf eine günstigere Verteilung der Pressung auf die im Durchmesser unterschiedlichen Drähte hindeutet. Bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ sind die Kerben auf den Außendrähten im Kontaktbereich der Außenlitzen untereinander weniger ausgeprägt.

Die geringere Ausprägung der Kerben bei dem untersuchten Prüfling ($\omega = -360^\circ/100d$) ist darauf zurückzuführen, dass sich bei einem Aufdrehen des Seils der Abstand (Sperrung) zwischen den Außenlitzen vergrößert und sich damit einhergehend die Belastung

durch Pressung verringert. Obwohl die geringere Pressung günstig erscheint, hat sich bei den Lebensdaueruntersuchungen in Kapitel 5.3 gezeigt, dass sich die Lebensdauer bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ gegenüber dem unverdrehten Zustand reduziert. Daraus kann gefolgert werden, dass die Lastumverteilung einen wesentlichen Einfluss auf die ertragbare Biegewechselzahl hat und sich bei der untersuchten Seilkonstruktion und dem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ negativ auswirkt.

Die gleichmäßigere Ausprägung der Kerben auf beiden Drahtdurchmessern der Warrington-Lage bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$ gegenüber dem unverdrehten Zustand weisen auf eine homogene Pressungsverteilung hin, die sich zusammen mit der Lastumverteilung zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen positiv auf die ertragbare Biegewechselzahl auswirken, was sich in den Versuchsergebnissen in Kapitel 5.3 zeigt.

Die zur mikroskopischen Untersuchungen herangezogenen Prüflinge des Versuchsseils C wurden den in Tabelle 5.10 aufgeführten Versuchsparametern ausgesetzt.

Tabelle 5.10: Probenauswahl Versuchsseil C

S/d^2 [N/mm^2]	D/d -Verhältnis	ω [$^\circ/100d$]	Zuordnung
117	25	+360	
117	25	0	
117	25	-360	

Die verdrehten Versuchsproben weisen gegenüber der unverdrehten Probe eine Steigerung der ertragbaren Biegewechselzahl auf (vgl. Diagramm in Tabelle 5.10), wobei die Steigerung unter einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ etwas größer ausfällt als bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$.

Bei allen Prüflingen des Versuchsseils C konnte festgestellt werden, dass die Außendrähte häufig an den Drahtkuppen gebrochen sind. Bei den Prüflingen mit einem Verdrehwinkel von $\omega = 0^\circ/100d$ und $\omega = +360^\circ/100d$ sind neben den Drahtkuppen auch die Litzenberührstellen häufig Orte für einen Drahtbruch. Alle Prüflinge weisen Kerben an den Berührstellen der Außenlitzen auf. Diese sind, wie in den maßstäblichen Mikroskopaufnahmen der Abbildung 5.29 zu erkennen ist, unterschiedlich stark ausgeprägt.

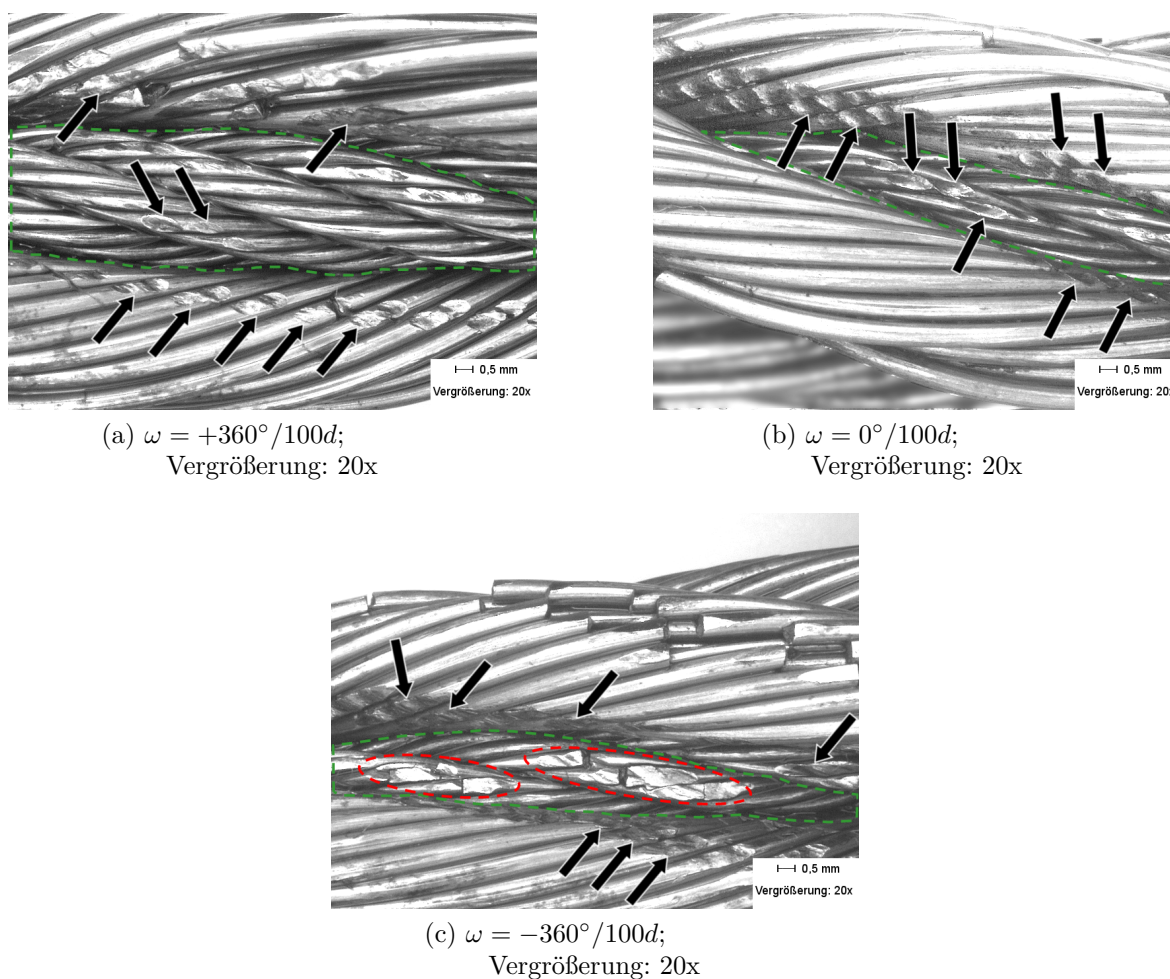


Abbildung 5.29: Vergrößerte Darstellung der Außenlitzen und der Seileinlage des Versuchsseils C; $S/d^2 = 117\text{N}/\text{mm}^2$; $D/d = 25$

Die Kerben der Versuchsproben, die im unverdrehten Zustand ($\omega = 0^\circ/100d$) oder mit einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$ getestet wurden, sind, wie in Abbildung 5.29 zu erkennen ist, ausgeprägter als die Kerben der Versuchsprobe, die mit einer Verdrehung von $\omega = -360^\circ/100d$ getestet wurde. Die vorgefundene Kerbenausprägung wird darin bestätigt, dass sich bei einem Aufdrehen des Seils ($\omega < 0$) der Litzenabstand vergrößert und die daraus resultierende gegenseitige Pressung verringert wird.

Dass die Drähte bei der untersuchten Probe mit einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ überwiegend an der Drahtkuppe gebrochen sind, wo sie zusätzlich zur anliegenden Belastung eine Pressung (Rillengrund/Drahtkuppe) beim Lauf über die Seilscheibe erfahren, weist gegenüber der Probe mit einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$ auf eine verminderte Beanspruchung durch Pressung an den Litzenberührstellen hin. Die erhöhte Beanspruchung an den Litzenberührstellen durch Pressung bei der untersuchten Probe mit einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$ zeigt sich zum einen

in der deutlicheren Kerbenausprägung und zum anderen in den häufig vorgefundenen Drahtbrüchen in diesem Bereich (siehe Abbildung 5.29 (a)).

Die Öffnung der Proben hat ergeben, dass bei einem Verdrehwinkel von $\omega = +360^\circ/100d$ die Seileinlage (Darstellung in Abbildung 5.29 mit einem grün gestrichelten Rahmen) relativ zur unverdrehten Probe einen guten Zustand aufweist. Im unverdrehten Zustand $\omega = 0^\circ/100d$ zeigen sich Kerben auf den Drahtoberflächen der Seileinlage und wenige Drahtbrüche. Die Anzahl an Drahtbrüchen in der Seileinlage ist bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -360^\circ/100d$ größer als bei den anderen untersuchten Proben (Darstellung in Abbildung 5.29 (c) mit einem rot gestrichelten Rahmen), was auf die Lastumverteilung⁵³ zurückzuführen ist, bei der im vorliegenden Fall die Stahleinlage eine Lasterhöhung bzw. eine Spannungserhöhung erfährt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass sowohl die Lastumverteilung als auch die Kontaktbedingungen und die damit verbundenen Pressungsverhältnisse in Beziehung zur ertragbaren Biegewechselzahl stehen, wobei sich beide Einflüsse sowohl negativ als auch positiv auswirken können.

Zur mikroskopischen Untersuchung des Versuchsseils E (mehrlagiges Spiralfundlitzenseil) wurden Versuchsproben ausgewählt, die mit den in Tabelle 5.11 aufgeführten Parametern im Dauerbiegeversuch getestet wurden.

Tabelle 5.11: Probenauswahl Versuchsseil E

S/d^2 [N/mm^2]	D/d -Verhältnis	ω [$^\circ/100d$]	Zuordnung
195	25	+180	
195	25	0	
195	25	-90	
195	25	-180	

Aus dem Diagramm in Tabelle 5.11 ist ersichtlich, dass bei den untersuchten Proben unabhängig von der Verdrehrichtung sowohl bei positiven als auch bei negativen Verdrehwinkeln eine Reduzierung der ertragbaren Biegewechselzahl in Bezug zum unverdrehten Zustand stattfindet.

Die Reduzierung der ertragbaren Biegewechselzahl in Unabhängigkeit von der Verdrehrichtung, kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass aufgrund des geometrischen

⁵³Die Lastumverteilung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels wird in Kapitel 3.5 auf Seite 65 erläutert.

Seilaufbaus und der damit verbundenen gegenläufigen Verseilung eines mehrlagigen Spiralrundlitzenseils die Lastumverteilung verstärkt auftritt (vgl. Kapitel 3.5). Zum anderen üben die einzelnen Litzenlagen je nach Verseil- und Verdrehrichtung eine erhöhte Pressung auf die darunter liegenden Litzenlagen aus, als dies im unverdrehten Zustand der Fall ist (vgl. [Weber2010]).

Alle untersuchten Proben des Versuchsseils E weisen Kerben an den Berührstellen der Litzenlagen 2 und 3 auf. Die Nummerierung der Litzenlagen erfolgt ausgehend vom Seilkern, wobei hier die dritte Litzenlage den Außenlitzen entspricht. Die Bezeichnung der einzelnen Litzenlagen des untersuchten Spiralrundlitzenseils ist in Abbildung 5.30 dargestellt.

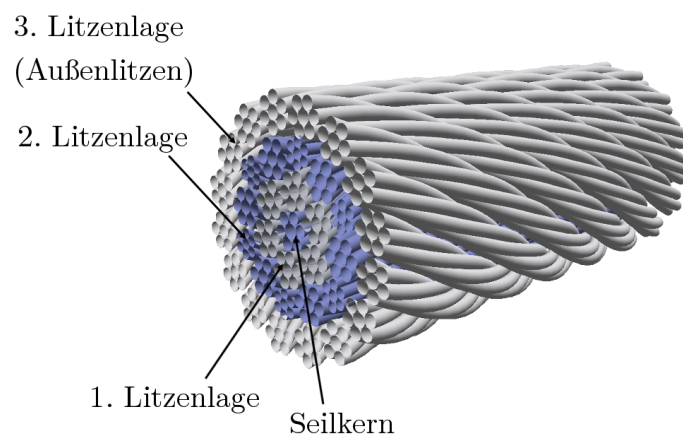
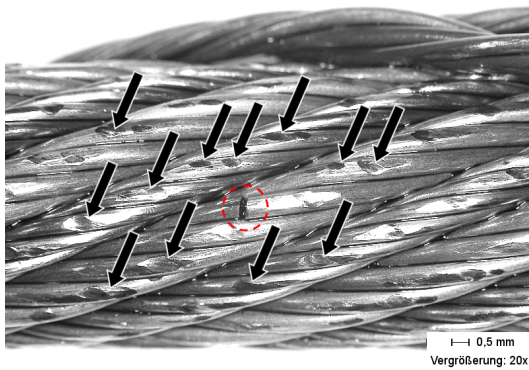


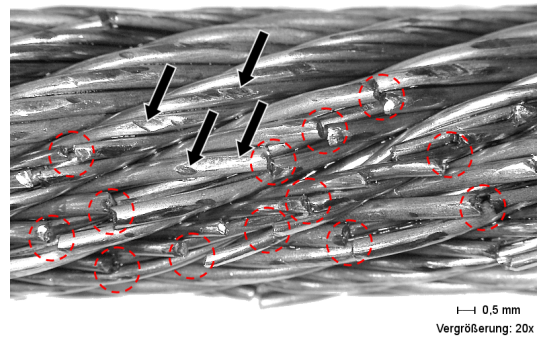
Abbildung 5.30: Darstellung und Bezeichnung der Litzenlagen eines mehrlagigen Spiralrundlitzenseils

In Abbildung 5.31 ist die zweite Lage der untersuchten Proben dargestellt. Die Aufnahmen zeigen die unterschiedliche Drahtbruchanhäufung (gestrichelter Rahmen) und die Kerben an den Drahtoberflächen, welche mit einem Pfeil markiert sind.

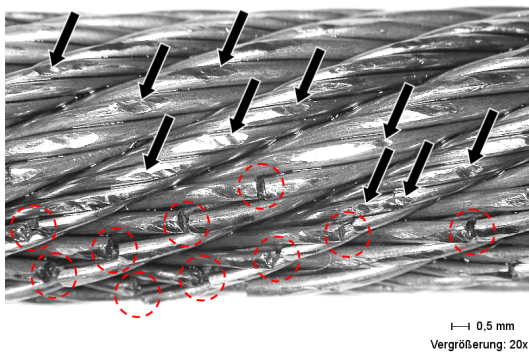
Der Einfluss der Lastumverteilung zeigt sich deutlich bei der untersuchten Probe, die mit einem Verdrehwinkel von $\omega = 180^\circ/100d$ geprüft wurde. Obwohl die zweite Litzenlage ausgeprägte Kerben aufweist, die aus der erhöhten Kontaktpressung zwischen dieser und der äußeren Litzenlage resultieren, finden sich hier nur wenige Drahtbrüche. Dies resultiert daraus, dass durch das Zudrehen des Seils und aufgrund der gegenläufigen Verseilung der einzelnen Litzenlagen, die Außenlitzen relativ zu den darunter liegenden Litzen verkürzt und damit höher belastet werden. Die inneren Litzenlagen werden dementsprechend entlastet. Die Häufigkeit, mit der die Ablegereife bei einem positiven Verdrehwinkel bei einer Biegewechselzahl von $\leq 80\%$ der Bruchbiegewechselzahl erkannt wurde, bestätigt die Überbelastung und die damit einhergehenden Schädigung der Außenlitzen (vgl. Kapitel 5.4.1).



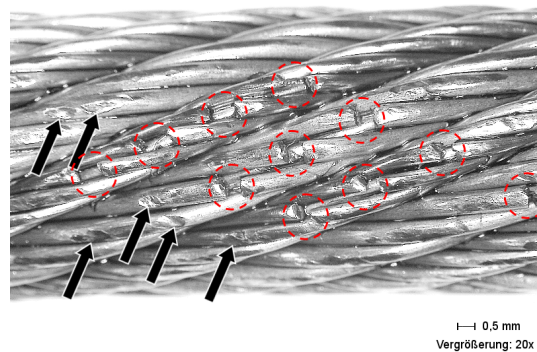
(a) $\omega = +180^\circ/100d$;
Vergrößerung: 20x



(b) $\omega = 0^\circ/100d$;
Vergrößerung: 20x



(c) $\omega = -90^\circ/100d$;
Vergrößerung: 20x



(d) $\omega = -180^\circ/100d$;
Vergrößerung: 20x

Abbildung 5.31: Vergrößerte Darstellung der zweiten Litzenlage des Versuchsseils E;
 $S/d^2 = 195\text{N}/\text{mm}^2$; $D/d = 25$

Mit zunehmendem Aufdrehen des Versuchsseils E nimmt die Belastung der inneren Litzenlagen durch die Lastumverteilung zu. Treten, wie oben beschrieben, zusätzlich Pressungen auf die inneren Lagen auf, erfolgt eine Zerstörung des Seils von innen. Die Außenlitzen (dritte Litzenlage) weisen bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -180^\circ/100d$ einen verhältnismäßig guten Zustand auf, was sich auch in den Ergebnissen der Untersuchungen zur Ablegereife zeigt (vgl. Kapitel 5.4.1).

5.5 Schlaglängenmessung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen ermöglichen es erstmals, die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Einfluss diskreter Verdrehwinkel zu berechnen. Mittels der in den Kapiteln 3.2 und 3.3 beschriebenen Zusammenhänge lassen sich die theoretischen Verdrehwinkel, die unter der sogenannten Höhenspannung und unter Schrägzug auftreten, berechnen, sodass der Einfluss auf die Seillebensdauer bereits in der Seiltriebauslegung bestimmt werden kann. Bei bereits im Betrieb befindlichen Seilen ist eine Verdrehung u. a. über die Veränderung der Schlaglänge messbar. Verschiedene Methoden zur Messung der Schlaglänge finden sich u.a. in [Briem1996], [Oplatka1999], [Ridge2001] u. [Vallan2009].

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, verändert sich der Schlagwinkel und damit einhergehend die Schlaglänge mit der Verdrehung. Bei einem Zudrehen des Seils (positive Verdrehung) verkürzt sich die Schlaglänge, während sie sich bei einem Aufdrehen des Seils (negative Verdrehung) verlängert. Dieser Zusammenhang ermöglicht eine Bestimmung des Verdrehwinkels auf Basis einer gemessenen Schlaglängenänderung, die im Folgenden dargestellt wird. Die hier vorgenommene Betrachtung der Schlaglängenänderung ist zu unterscheiden von der theoretischen Betrachtung in Kapitel 3.5, welche die axiale Längenänderung des Seils bzw. der Litzen untersucht, aber keine Aussage über die durch Verdrehung verursachte Änderungen der Schlaglänge auf einer diskreten Seilstrecke zulässt.

Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurden von Herrmann im Rahmen einer Bachelorarbeit unter Mitwirkung des Autors die hier verwendeten Versuchsseile hinsichtlich der Schlaglängenänderung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω und der durchmesserbezogenen Last S/d^2 experimentell untersucht [Herrmann2011]. Im Unterschied zu [Herrmann2011] werden hier die Schlaglängen $L_{\omega, S/d^2}$, welche in einem verdrehten Zustand des Seiles gemessen wurden, auf die Ausgangsschlaglänge $L_{0, S/d^2}$ der jeweiligen Laststufe S/d^2 ($0N/mm^2$, $117N/mm^2$ und $195N/mm^2$) bezogen. Die Diagramme in den Abbildungen 5.32 bis 5.34 zeigen die Messwerte im Verhältnis zur jeweiligen Ausgangsschlaglänge $L_{0, S/d^2}$ neu aufbereitet.

Die ermittelten Werte werden in ihrer Größenordnung gestützt durch Untersuchungen von Rebel et al., bei denen sich Schlaglängenänderungen an einem Dreikantlitzenseil von ca. 31% bei einem Verdrehwinkel von $\omega = -982^\circ/100d$ und ca. -20% bei einem Verdrehwinkel von $\omega = 943^\circ/100d$ ergaben [Rebel1996].

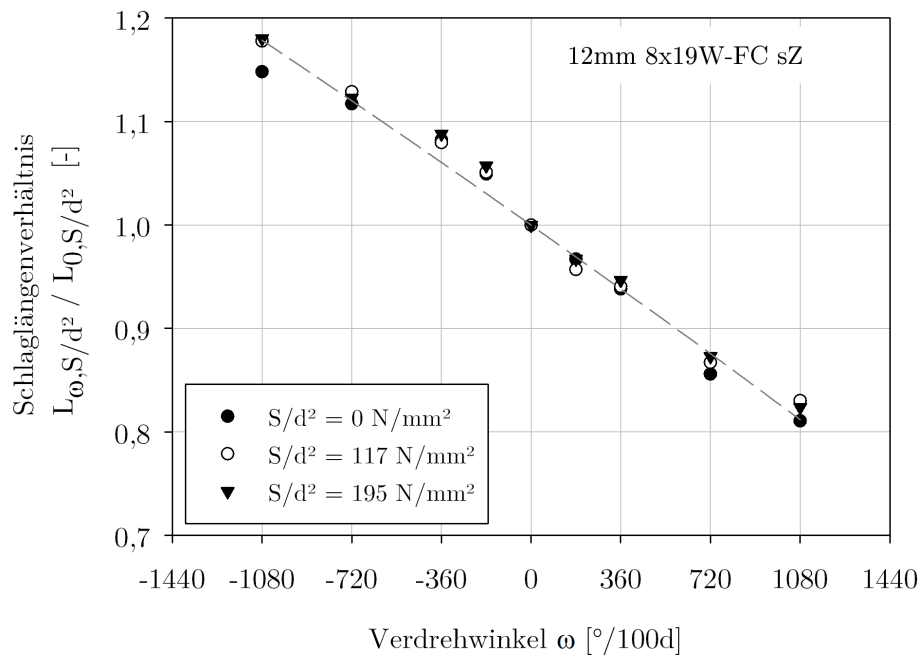


Abbildung 5.32: Schlaglängenverhältnis in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 8x19W - FC

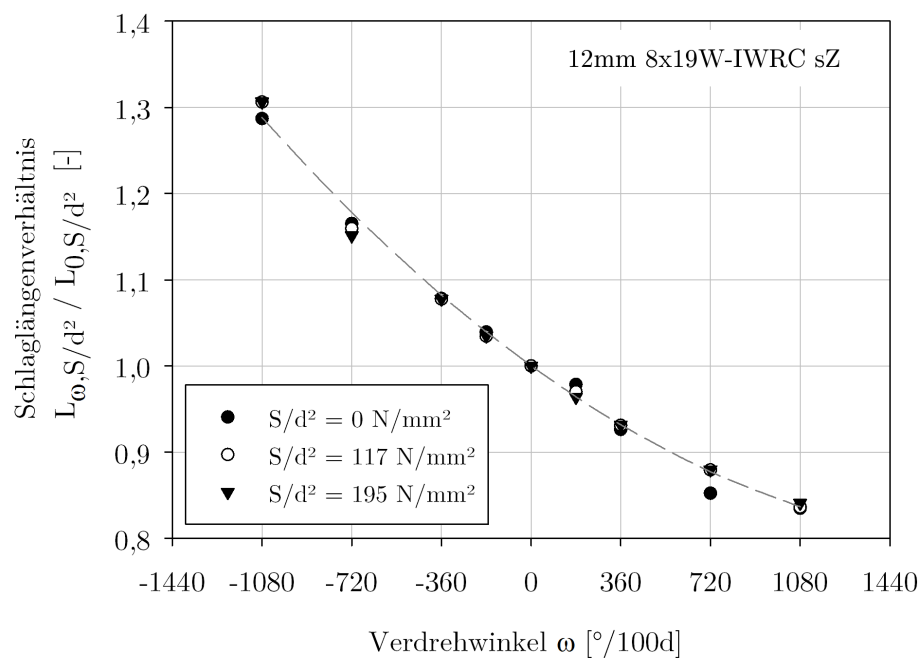


Abbildung 5.33: Schlaglängenverhältnis in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 8x19W - IWRC

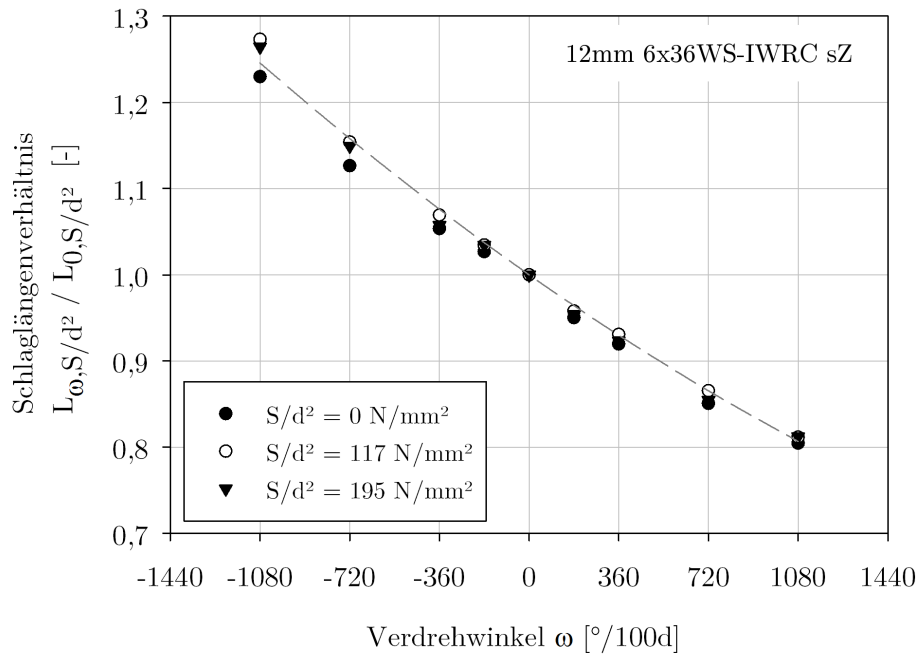


Abbildung 5.34: Schlaglängenverhältnis in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω ; 6x36WS - IWRC

Zusätzlich zu den Messwerten ist in den Diagrammen der Abbildungen 5.32 bis 5.34 der mittels einer Regressionsanalyse ermittelte Verlauf der Schlaglänge in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω für die jeweiligen Seilkonstruktionen abgebildet. Die Regressionsgleichung stellt sich wie folgt dar:

$$\frac{L_{\omega,S/d^2}}{L_{0,S/d^2}} = 1 + e_0 \cdot \omega + e_1 \cdot \omega^2 \quad (5.11)$$

Da sich bei den Messungen gezeigt hat, dass die Schlaglängenänderung der untersuchten Seile nur unwesentlich von der Last beeinflusst wird (vgl. [Herrmann2011]), können die Laststufen gemeinsam ausgewertet werden. Die Bestimmtheitsmaße B_i liegen für die drei untersuchten Seile jeweils über 0,98.

Mit der Gleichung (5.11) zur Beschreibung der Schlaglängenänderung der hier betrachteten Rundlitzenseile werden relativ hohe Bestimmtheitsmaße erreicht, was zeigt, dass die Schlaglängenänderung in Abhängigkeit des Verdrehwinkels ω (in $rad/100d$) mit der dargestellten Gleichung (5.11) und den ermittelten Konstanten in Tabelle 5.12 innerhalb der untersuchten Verdrehwinkelgrenzen ($-1080^\circ/100d \leq \omega \leq 1080^\circ/100d$) gut beschrieben werden kann.

Tabelle 5.12: Ermittelte Konstanten zur Berechnung der Schlaglängenänderung

Konstanten	A	B	C
$e_0 \cdot 10^{-2}$	-0,973	-1,198	-1,165
$e_1 \cdot 10^{-4}$	-0,135	1,757	0,734

Wie einleitend beschrieben, kann mittels der Schlaglänge und deren Änderung bzw. dem Verhältnis von der Schlaglänge im verdrehten Seilzustand und der Schlaglänge im unverdrehten Ausgangszustand der Verdrehwinkel bestimmt werden. Daher soll zur praktischen Anwendung der Regressionsansatz aus Gleichung (5.11) so dargestellt werden, dass sich der dazugehörige Verdrehwinkel ω in $rad/100d$ berechnen lässt.

$$\omega = \frac{-e_0 - \sqrt{e_0^2 - 4 \cdot e_1 \cdot \left(1 - \frac{L_{\omega,S/d^2}}{L_{0,S/d^2}}\right)}}{2 \cdot e_1} \quad (5.12)$$

Näherungsweise kann anstatt der Ausgangsschlaglänge für den jeweiligen Lastfall ($L_{\omega,S/d^2}$) generell die Ausgangsschlaglänge im unbelasteten Zustand ($S/d^2 = 0N/mm^2$) verwendet werden, da sich gezeigt hat, dass die Veränderung der Ausgangsschlaglänge im jeweils unverdrehten Zustand unter den untersuchten Laststufen bei allen betrachteten Seilen um maximal 0,8% von der Ausgangsschlaglänge unter $S/d^2 = 0N/mm^2$ abweicht. Dies kann in der praktischen Anwendung von Vorteil sein, da häufig die Ausgangsschlaglänge protokolliert ist.

Bei der Betrachtung der Schlaglängenänderung ist zu berücksichtigen, dass neben einer Verdrehung weitere Ursachen, wie z. B. Verschleiß im Seilinneren, zu einer Veränderung der Schlaglänge führen können, was sich im genannten Beispiel auch in einer Abnahme des Durchmessers zeigt (vgl. [Briem1996]).

Mit der dargestellten Gleichung (5.12) können die hier untersuchten Seile im Betrieb auf ihren Verdrehgrad hin analysiert und mit der in Kapitel 5.3 dargestellten Berechnungsmethode der Einfluss auf die Seillebensdauer erstmals ermittelt werden, was u. a. im Hinblick auf eine sicherheitstechnische Bewertung eine deutliche Verbesserung darstellt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Drahtseile, die bewegt werden und sich im laufenden Betrieb befinden, werden über Seilscheiben gebogen und/oder auf Trommeln aufgewickelt. Beim Lauf des Seils auf eine Scheibe wird das Seil von einem geraden Zustand in einen gebogenen Zustand überführt, was sich beim Ablaufen von der Seilscheibe bzw. Trommel umkehrt. Durch das Biegen des Seils erfährt es neben der axialen Belastung durch eine anliegende Last eine Biegebelastung. Befindet sich das laufende Seil in einem verdrehten Zustand, wird die Zug- und Biegebelastung durch eine Torsionsbelastung überlagert. Der verdrehte Zustand eines Drahtseils, dessen Ursachen theoretisch beschreibbar sind, ist sowohl in der praktischen Anwendung als auch in der Wissenschaft bekannt (z. B. [Engel1959], [Rebel1997], [Feyrer2000], [Verreet2001], [Oplatka2004] u. [Chaplin2008]).

Dreher, Thieme sowie Mannitz untersuchen in ihrer jeweiligen Arbeit u. a. den Lebensdauereinfluss einer freien Drehung gegenüber einer verhinderten Drehung unter axialer Last und Biegebeanspruchung bei Drahtseilen ([Dreher1933], [Thieme1937] u. [Mannitz1958] bzw. siehe Kapitel 1.1). In der praktischen Anwendung ist jedoch insbesondere bei einlagigen Rundlitzenseilen eine Möglichkeit zur freien Drehung am Seilende zu verhindern, was aus den Empfehlungen zum einsträngigen Betrieb in [DIN15020:1974] hervorgeht. Bei mehrlagigen Spiralrundlitzenseilen, die der Kategorie der drehungsfreien Seile angehören, sollte eine freie Drehung des Seilendes hingegen ermöglicht werden (z. B. [Feyrer2000] u. [Verreet2001]). Die Möglichkeit zur Drehung bei drehungsfreien Seilen verhindert zwar eine Verdrehung des unmittelbar an das frei drehende Ende angrenzenden Seilstrangs, jedoch unter bestimmten Voraussetzungen nicht das Verdrehen der weiteren Seilstränge innerhalb eines komplexen Seiltriebs [Verreet2001].

Unterschiedliche Einflüsse, die zu einer Verdrehung von Drahtseilen führen können, obwohl keine freie Drehung des Seilendes vorliegt, sind in Kapitel 2 und Kapitel 3 mit entsprechenden Verweisen auf die Literatur beschrieben. In der vorliegenden Arbeit ist die Seilverdrehung durch Schrägzug und durch die Überwindung größerer Höhendifferenzen aufbauend auf den bestehenden Erkenntnissen wesentlich behandelt.

Drahtseile, die unter einem Schrägzugwinkel auf eine Seilscheibe laufen, treffen seitlich abgelenkt auf die Scheibe auf (vgl. Abbildung 2.7 auf Seite 52). Läuft das Seil auf der Scheibenflanke auf, bewegt es sich in einer Mischform aus Gleiten und Wälzen in den Rillengrund (z. B. [Schoenherr2005]). Durch die Gleitbewegung entsteht an der Seiloberfläche ein abrasiver Verschleiß, während das Seil durch das Wälzen gedreht und durch die verdrehsteife Fixierung im Rillengrund definitionsgemäß verdreht wird (vgl. Kapitel 2.6, Kapitel 3.3 u. [Schoenherr2005]). In der vorliegenden Arbeit wird erstmals zwischen einer direkten und einer indirekten Verdrehung unterschieden, die ihren Ursprung in der Drehung des Seils während der Bewegung in den Rillengrund haben. Wird eine Seilstrecke durch die Wälzbewegung zwischen dem Auflaufpunkt auf die Scheibenflanke und dem Rillengrund verdreht, handelt es sich um eine direkte Verdrehung. Die direkte Verdrehung des Seilstücks kann jedoch beim Ablaufen unter Schrägzug durch eine Wälzbewegung, die das Seil in die entgegengesetzte Richtung verdreht, aufgehoben werden. Das Seilstück hat sich jedoch durch diesen Vorgang gedreht, was in Bezug auf das gesamte Seil im Seiltrieb als Verdrehung anzusehen ist. Dies wird als indirekte Verdrehung bezeichnet, die bei Seiltrieben insbesondere dann durch Verdrehung sichtbar werden kann, wenn sich die eingebrachten Drehungen an einem Seilstrang mit angrenzender rotationssteifer Fixierung (z.B. an Seilwinden) akkumulieren.

Das Überwinden großer Höhendifferenzen erzeugt unterschiedliche Lastzustände innerhalb des Seilstranges. Während am unteren Seilende die Nutzlast anliegt, liegen am oberen Seilende die Nutzlast und das Seilgewicht als zusätzliche Last an. Sind beide Seilenden um die Seillängsachse rotatorisch fixiert, bildet sich ein homogenes Drehmoment über die gesamte Seilstrecke aus und das Seil wird pro Längeninkrement unterschiedlich verdreht. Während sich das Seil im oberen Bereich aufdreht, dreht es sich im unteren Bereich zu (vgl. [Feyrer2000], [Malinovsky2006] u. [Ernst2012]). Befinden sich am oberen und am unteren Ende des Seilstranges Seilscheiben, wird das Seil im jeweils verdrehten Zustand über die Scheiben gebogen und erfährt den in dieser Arbeit untersuchten Belastungszustand.

Die einleitend beschriebene Kenntnis über die Ursachen von Seilverdrehung und deren Vorkommen in der praktischen Anwendung bei gleichzeitiger Unkenntnis über den Einfluss auf die Lebensdauer laufender Seile, bilden die Motivation zu dieser Arbeit. Ziel war es, die Grundlagen zur Seilverdrehung aufzuarbeiten und anhand von Untersuchungen den Lebensdauereinfluss von Verdrehungen bei laufenden Drahtseilen systematisch zu untersuchen und zu bewerten (siehe Kapitel 2, 3, 4 und 5). Feyrer weist darauf hin, dass die Bruchbiegewechselzahl sowie die Ablegereife bei Drahtseilen lediglich mit Dauerbiegeversuchen ermittelt werden können [Feyrer2000]. Zur Untersu-

chung und Bewertung des Einflusses von Verdrehung auf die Lebensdauer laufender Drahtseile wurden in dieser Arbeit erstmals systematische Versuchsreihen mit diskreten Verdrehwinkeln und gezielt veränderlichen Parametern gefahren.

Die Dauerbiegeversuche wurden am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart an den vorhandenen Prüfeinrichtungen innerhalb eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojektes⁵⁴ durchgeführt. Das angewandte Prüfprinzip zur Abbildung der Einflüsse, die ein laufendes Seil erfährt, wenn es auf eine Scheibe auf und wieder abläuft, hat sich über Jahrzehnte und einer Vielzahl an Biegeversuchen hinweg bewährt (vgl. [Feyrer2000]). Um den verdrehten Zustand innerhalb eines Dauerbiegeversuches abbilden zu können, wurde eine spezielle Verdrehvorrichtung entwickelt, die es u. a. ermöglicht, die Prüfseile mit einer Genauigkeit von 1° zu verdrehen und den eingestellten Drehwinkel während der gesamten Versuchsdauer konstant zu halten (siehe Kapitel 4.1.2 u. [Hecht2011]).

Die Auswahl der Versuchsseile erfolgte analog zu den untersuchten Seilkonstruktionen in [Schoenherr2005]. Dies bietet die Möglichkeit, durch die systematische Zusammenstellung der Seilkonstruktionen eine fundierte Aussage über verschiedene konstruktionsbedingte Einflüsse aus den Versuchsergebnissen treffen zu können.

Die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse der systematisch durchgeführten Dauerbiegeversuche zeigen u. a. in Abhängigkeit der Seilkonstruktion (siehe Abbildung 4.4 auf Seite 79) einen unterschiedlichen Einfluss der Verdrehung auf die Seillebensdauer. Die Unterteilung der vier untersuchten Seilkonstruktionen kann zunächst in einlagige Rundlitzenseile und mehrlagige Spirallitzenseile erfolgen. Wie zu erwarten, ist der Einfluss von Verdrehung auf das untersuchte mehrlagige Spirallitzenseil (Versuchsseil E; 35(W)x7) aufgrund seiner gegenläufigen Verseilung der einzelnen Litzenseile deutlich größer als bei den untersuchten einlagigen Rundlitzenseilen. Dies spiegelt sich auch in den untersuchten Verdrehwinkeln wider. Bei den einlagigen Rundlitzenseilen wurden Verdrehwinkel im Bereich von $-1080^\circ/100d \leq \omega \leq 1080^\circ/100d$ und bei dem mehrlagigen Spirallitzenseil Verdrehwinkel im Bereich von $-180^\circ/100d \leq \omega \leq 180^\circ/100d$ untersucht.

Die Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse aus den durchgeführten Dauerbiegeversuchen mit systematischer Parametervariation wird in Kapitel 5 umfassend wiedergegeben. Im Folgenden sollen daher mit Verweis auf Kapitel 5 lediglich einzelne Versuchsergebnisse in zusammengefasster Form beschrieben werden.

⁵⁴Projekttitle: Einfluss kombinierter Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchung auf die Lebensdauer und Abergereife laufender Drahtseile; Förderzeitraum: 01.06.2010 - 31.05.2012; DFG-Geschäftszeichen: WE 2187/24-1.

Das untersuchte einlagige Rundlitzenseil mit Fasereinlage (Versuchsseil A; 8x19W-FC) weist innerhalb des negativen Verdrehwinkelbereichs ($\omega < 0$) einen eher flachen Lebensdauerverlauf über dem Verdrehwinkel auf. Bei kleinen positiven Verdrehwinkeln ändert sich die rechnerische Seillebensdauer zunächst nur geringfügig, wobei sie mit zunehmendem Verdrehwinkel in positiver Richtung stärker abfällt.

Auffallend bei der Betrachtung der Ergebnisse aus den Dauerbiegeversuchen ist die Lebensdauerzunahme bei den untersuchten einlagigen Rundlitzenseilen 8x19W-IWRC (Versuchsseil B) und 6x36WS-IWRC (Versuchsseil C). Es konnte festgestellt werden, dass die Seillebensdauer dieser Seilkonstruktionen in einem jeweiligen diskreten Verdrehwinkelbereich zunimmt und anschließend bei weiterer Erhöhung des Verdrehwinkels aus dem genannten Verdrehwinkelbereich heraus wieder abnimmt. In die jeweils entgegengesetzte Verdrehrichtung nimmt die Seillebensdauer ausschließlich ab.

Eine Verdrehung von Drahtseilen ändert u.a. den geometrischen Aufbau und damit die durch den Verseilprozess festgelegten Bedingungen im Seilinneren. Grundlegende Änderungen sind u. a.:

- Kontaktbedingungen der Außenlitzen untereinander und der Außenlitzen mit der Seileinlage
- Größe der Pressung an den Kontaktstellen im Seilinneren
- Längenänderungen der einzelnen Draht- bzw. Litzenlagen in Seilachsrichtung und damit einhergehende Lastumverteilung unter einer anliegenden Last
- zusätzliche Biege- und Torsionsspannung an den Drähten durch die Verdrehung

Die in Kapitel 5.4.2 beschriebene mikroskopische Untersuchung systematisch ausgewählter Versuchsseile hat ergeben, dass die vorgefundenen Auffälligkeiten wie Drahtbrüche oder durch Pressung verursachte Oberflächeneinkerbungen mit den durch das Auf- oder Zudrehen des Seils zusammenhängenden Lastumverlagerungen bzw. Veränderung der Pressungsverhältnisse innerhalb des Seilverbandes erklärbar sind. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass allein durch die Betrachtung der mikroskopischen Schadensbilder ein Rückschluss auf die im Dauerbiegeversuch (vgl. Kapitel 5) erreichten Bruchbiegewechselzahlen nicht einmal in grober Annäherung möglich ist. So können z. B. bei einer Verdrehung die Pressungen durch veränderte Kontaktbedingungen auf einzelne Drähte erhöht werden, sich jedoch die Lastumverteilung innerhalb des Seils verstärkt positiv auf die ertragbare Biegewechselzahl auswirken (vgl. theoretische Betrachtungen zur Lastumverteilung in Kapitel 3.5 und mikroskopische Untersuchungen in Kapitel 5.4.2).

Die oben genannten Punkte bilden einen komplexen Gesamteinfluss auf die ertragbare Biegewechselzahl aus, weshalb eine Bestimmung der Seillebensdauer ausschließlich durch die Betrachtung von Wirk- und Schadensmechanismen nicht möglich ist. Diese Art der theoretischen Betrachtung wird darüber hinaus seitens fertigungsbedingter Ungenauigkeiten in der Drahtseilherstellung erschwert, durch die es innerhalb des Seilverbandes zu unterschiedlichen Drahtlängen und somit zu einer inhomogenen Spannungsverteilung über den Seilquerschnitt kommen kann, was auch eine ausschließliche theoretische Berechnung der Seillebensdauer bedeutend erschwert bzw. unmöglich macht (vgl. [Ziegler2007]).

In Kapitel 5.4.1 auf Seite 123 wird die in dieser Arbeit erstmals erfolgte Betrachtung der Ablegereife anhand der Ablegedrahtbruchzahlen nach DIN 15020 und Feyrer (Gleichung (5.9) bzw. Gleichung (5.10)) für Dauerbiegeversuche mit Verdrehung dargestellt und die Ergebnisse aufgezeigt ([DIN15020:1974] u. [Feyrer2007]). Da die DIN 15020 bzgl. der Ablegedrahtbruchzahlen eine Unterscheidung der untersuchten Laststufen vornimmt und für die untersuchten Seilkonstruktionen die Ablegedrahtbruchzahlen nach ISO 4309 kleiner oder gleich den Ablegedrahtbruchzahlen nach DIN 15020 sind, erfolgt in dieser Arbeit eine Betrachtung nach DIN 15020 (vgl. [Schoenherr2005], [DIN15020:1974] u. [ISO4309:2010(E)]). Mit Hinweis auf Kapitel 5.4.1 soll im Folgenden lediglich eine Zusammenfassung einzelner Erkenntnisse aus den hier vorgenommenen Untersuchungen bezüglich der Ablegereife unter dem Einfluss der Verdrehung erfolgen.

Die Betrachtung der Ablegereife anhand der Ablegedrahtbruchzahlen nach DIN 15020 und Feyrer zeigt, dass für die untersuchte Seilkonstruktion 8x19W-FC sZ die Anwendung der Ablegedrahtbruchzahlen nach Feyrer zu empfehlen ist ([DIN15020:1974] u. [Feyrer2007]). Bei den Dauerbiegeversuchen mit dem Versuchsseil A (8x19W-FC sZ) traten bei allen zur Untersuchung der Ablegereife herangezogenen Versuchen die Ablegedrahtbruchzahl nach [Feyrer2007] bei einer Biegewechselzahl von kleiner oder gleich 80% der Bruchbiegewechselzahl auf, was von Feyrer als ausreichend frühes Erkennen der Ablegereife anhand der Drahtbruchzahl angesehen wird [Feyrer1984].

Bei dem untersuchten Versuchsseil B (8x19W-IWRC sZ) wurden bei den zur Ablegereife herangezogenen Versuchen die jeweilige Ablegedrahtbruchzahl nach [DIN15020:1974] und [Feyrer2007] bei maximal 78%⁵⁵ der Versuche bei einer Biegewechselzahl erreicht, die kleiner oder gleich 80% der Bruchbiegewechselzahl ist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei den Versuchen lediglich in einem Fall das Erreichen der Ablegereife erst bei einer Biegewechselzahl von über 90%⁵⁶ der Bruchbiegewechselzahl erfolgte.

⁵⁵Dieser Wert wurde bei der Betrachtung der Ablegedrahtbuchzahl nach [DIN15020:1974] bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ und einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 195\text{N}/\text{mm}^2$ erreicht.

⁵⁶Dieser Wert wurde bei der Betrachtung der Ablegedrahtbuchzahl nach Feyrer (Gleichung (5.9) bzw.

Diejenigen Werte, die 80% der Bruchbiegewechselzahl überschritten, liegen in einem Bereich von $80\% < N_A < 90\%$ der Bruchbiegewechselzahl. Bei den Versuchsseilen C und D, die der gleichen Seilkonstruktion entsprechen (6x36WS-IWRC sZ), sich jedoch im Seilnennendurchmesser unterscheiden, konnte die Ablegereife anhand der oben genannten Kriterien bei allen Versuchen mit Verdrehung sicher erkannt werden (vgl. Diagramme (e) bis (h) in Abbildung 5.26 beginnend auf Seite 126).

Das Erreichen der jeweiligen Ablegedrahtbuchzahlen bei einer Biegewechselzahl, die kleiner oder gleich 80% der Bruchbiegewechselzahl ist, wurden bei dem untersuchten mehrlagigen Spiralrundlitzenseil (Versuchsseil E) lediglich bei maximal 50%⁵⁷ der zur Betrachtung der Ablegereife herangezogenen Versuche erreicht. Insbesondere im negativen Verdrehwinkelbereich, bei dem die inneren, nicht von außen sichtbaren, Litzenlagen höher belastet werden, konnte die Ablegereife im Bezug auf die Ablegedrahtbruchzahlen nicht rechtzeitig ($N \leq 0,8 \cdot N_B$) erkannt werden, da die Seilschädigung vor allem im Seilinneren stattfindet. Diese Erkenntnis führt dazu, dass es in der praktischen Anwendung unbedingt notwendig ist, nicht ausschließlich die Drahtbruchzahl als Ablegekriterium heranzuziehen, sondern den gesamten Zustand des Seilverbandes zu betrachten und zu bewerten. Gerade beim Aufdrehen des Seiles kann es zu einer sogenannten Korbbildung kommen, die nach der DIN 15020 als Ablegekriterium gilt, sodass ein sicheres Erkennen der Ablegereife möglich ist.

Mit den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen mit systematischer Variation der Parameter und der Auswertung der Versuchsergebnisse mittels Regressionsanalyse ist es erstmals möglich, den Einfluss einer Verdrehung in der Lebensdauerberechnung laufender Seile für verschiedene Seilkonstruktionen zu berücksichtigen (siehe Gleichung (5.4) auf Seite 110). Dabei zeigt sich, dass der in der bisherigen Lebensdauerberechnung unberücksichtigte Einfluss von Verdrehung in Abhängigkeit der Seilkonstruktion, des Verdrehgrades, der Seilzugkraft und des D/d -Verhältnisses eine Lebensdauerreduzierung von bis zu -77% ⁵⁸ zur Folge hat (vgl. Kapitel 5.3).

Durch die bereits bekannten und die hier vorgenommenen theoretischen Betrachtungen (vgl. Kapitel 2 und 3) lässt sich bei der Auslegung eines Seiltriebs die zu erwartende Seilverdrehung bestimmen und hinsichtlich der Seilauslegung berücksichtigen. Des Wei-

Gleichung (5.10) bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$, einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 195N/mm^2$ und einem Verdrehwinkel von $\omega = 360^\circ/100d$ erreicht.

⁵⁷Dieser Wert wurde bei der Betrachtung der Ablegedrahtbuchzahl nach [DIN15020:1974] bei einem D/d -Verhältnis von $D/d = 25$ und einer durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2 = 117N/mm^2$ erreicht.

⁵⁸Dieser Wert entspricht der durch Verdrehung hervorgerufenen prozentualen Verminderung der Lebensdauer des untersuchten mehrlagigen Spiralrundlitzenseils (Versuchsseil E; 35(W)x7 sZ) bei einem Verdrehwinkel von $\omega = 180^\circ/100d$, einer Last von $S/d^2 = 195N/mm^2$ und einem D/d -Verhältnis von $D/d = 16$ (vgl. Kapitel 5.3)

teren ist es möglich, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchte Veränderung der Schlaglänge, welche rechnerisch bis zu 29%⁵⁹ betragen kann, auf bereits im Betrieb befindliche Seile zu übertragen, um mittels Schlaglängenmessung auf die Seilverdrehung schließen zu können (vgl. Kapitel 5.5 u. [Herrmann2011]).

Aufgrund der sowohl theoretisch als auch aus der Praxis bestehenden Erkenntnisse über das Auftreten von Seilverdrehungen im Betrieb und den hier im Rahmen der Grundlagenforschung vorgenommenen experimentellen und theoretischen Untersuchungen, existiert ein unmittelbarer Nutzen für die Anwendung.

6.2 Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten

Mit der vorliegenden Arbeit wurden u. a. sowohl die Grundlagen des Einflusses von Verdrehung auf die Lebensdauer laufender Drahtseile betrachtet als auch der Bezug zur Anwendung hergestellt. Zukünftige Arbeiten könnten aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit weitere unterschiedliche Betrachtungen und Untersuchungen vornehmen, die im Folgenden aufgeführt sind:

- Validierung und Erweiterung der aufgestellten Versuchsdatenbasis:
 - Mittels Versuchsreihen, bei denen Seile verschiedener Chargen und Hersteller verwendet werden, können die Erkenntnisse aus dieser Arbeit entsprechend erweitert werden, sodass eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Verdrehung auf die Lebensdauer einer Seilkonstruktion getroffen werden kann.
 - Neue konstruktionsspezifische Konstanten können durch den in dieser Arbeit aufgestellten Regressionsansatz, der den Einfluss einer Verdrehung auf die Lebensdauer laufender Seile beschreibt, ermittelt werden. Mit der Bestimmung neuer Konstanten (b_0 bis b_2) durch Versuchsreihen an bisher noch nicht untersuchten Seilkonstruktionen, kann die Anwendung der Berechnungsmethode entsprechend erweitert werden. Denkbar ist die Untersuchung von Hybridseilen, bei denen Stahllitzen um einen hochfesten Faserkern geschlagen sind.
 - Gleichschlagseile, die insbesondere bei Seilbahnanlagen Verwendung finden und häufig durch die Überwindung großer Höhen einer Verdrehung ausgesetzt sind, könnten untersucht werden. Bei Gleichschlagseilen sind sowohl die

⁵⁹Das Verhältnis zwischen der Schlaglänge im verdrehten Zustand und der Ausgangsschlaglänge ergibt sich mit der in Kapitel 5.5 aufgestellten Gleichung (5.11) unter Verwendung eines Verdrehwinkels von $\omega = -1080^\circ/100d$ und der Seilkonstruktion 8x19W-IWRC sZ

Drähte als auch die Litzen in die gleiche Richtung verseilt. Dies führt bei einer Verdrehung zu geometrischen Veränderungen die sich von den Veränderungen bei Kreuzschlagseilen unterscheiden.

- Entsprechend der Erweiterung der Versuchsdatenbasis mittels neuer Seilkonstruktionen können die neben der Seilkonstruktion untersuchten Versuchsparameter (durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2 und D/d -Verhältnis) verändert werden, um den in dieser Arbeit bestimmten Einfluss zu validieren.
- Die Untersuchung größerer Seildurchmesser hinsichtlich des Einflusses der Verdrehung auf die Lebensdauer laufender Seile ermöglicht eine detaillierte Aussage über den Durchmesser Einfluss. Die Umsetzung erfordert eventuell eine Neukonzeption der Verdrehvorrichtung, da ab bestimmten Seildurchmessern eine Verdrehung von Hand nur noch schwer umsetzbar ist.
- Bei Förderanlagen mit Treibscheiben kommt es, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, beim Vorliegen unterschiedlicher Verdrehgrade der beiden Seilstränge zu einem auf der Treibscheibe stattfindenden rotatorischen Schlupf des Seils um seine Seilachse. Eine dynamisch wechselnde Verdrehung der Seile auf der Scheibe hat zum einen eine Ermüdungsbeanspruchung zur Folge und zum anderen einen abrasiven Verschleiß der Seiloberfläche durch eine relative Drehbewegung zwischen Seil und Scheibenrinne. Eine versuchsbasierte Abbildung dieser Erscheinungsform könnte über die Überwachung und Veränderung der an beiden Seilsträngen anliegenden Drehmomente während des Versuchs erfolgen, sodass immer eine definierte Differenz der Drehmomente und damit der Verdrehgrade zwischen beiden Seilsträngen besteht.
- Weiterführende theoretische Untersuchungen wie z.B. der Betrachtung einer Seilverdrehung mittels der Finite-Elemente-Methode können Aufschlüsse über die veränderten Kontaktbedingungen und den damit zusammenhängenden Pressungsverhältnissen sowie der Spannungsverteilung innerhalb des Seilquerschnitts geben.

Die vorliegende Arbeit bildet eine Grundlage zur Untersuchung des Einflusses von Verdrehung auf die Lebensdauer laufender Drahtseile mit dem Schwerpunkt der experimentellen Abbildung. Basierend darauf können weitere Arbeiten folgen, die sich u. a. der Untersuchung oben genannter Fragestellungen annehmen und somit zu einer Erweiterung der Erkenntnisse beitragen.

Literaturverzeichnis

- [Berner2011] Berner, O. R.: Lebensdauer von Stahlseilen beim kombinierten Lauf über Treib- und Ablenkscheiben unterschiedlicher Rillenform, Dissertation, Universität Stuttgart, 2011
- [Briem1995] Briem, U.: Bruchkraftverlust bei Verschleiß durch Litzenberührung, DRAHT, 10/46, S. 517–521, 1995
- [Briem1996] Briem, U.: Verbesserung der Ablegereifeerkennung laufender Drahtseile durch Kombination von Ablegekriterien, Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [Chaplin1998] Chaplin, C. R.: Torsional failure of a wire rope mooring line during installation in deep water, Engineering Failure Analysis, 6, S. 67–82, 1998
- [Chaplin2005] Chaplin, C. R.: The Fatigue and Degradation Mechanisms of Hoisting Ropes, Hoist and Haul Conference, S. 359–366, Perth, WA, 2005
- [Chaplin2008] Chaplin, C. R.: Interactive Fatigue in Wire Rope Applications, Symposium Mechanics of Slender Structures, S. 1–12, 2008
- [Chaplin2000] Chaplin, C. R., Rebel, G., Ridge, I. M. L.: Tension/Torsion interactions in multicomponent mooring lines, Offshore Technologie Conference, 2000
- [Ciuffi1979] Ciuffi, R.: Report on B.L.P., OIPEEC-Bulletin, Band 36, S. 38–52, 1979
- [Ciuffi1995] Ciuffi, R., Roccati, G.: Wire rope fatigue and size effect, OIPEEC Technical Meeting, Stuttgart, S. 10–1 – 10–10, 1995

- [Costello1990] Costello, A. G.: Theory of Wire Rope, Springer-Verlag, 1990
- [Costello1977] Costello, G. A., Sinha, S. K.: Torsional stiffness of twisted wire cables, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 103(EM4), S. 766–770, 1977
- [DIN15020:1974] DIN15020: Grundsätze für Seiltriebe, Blatt 1: Berechnung und Ausführung, Feb. 1974; Blatt 2: Überwachung im Gebrauch, Apr. 1974, Beuth Verlag GmbH, 1974
- [DIN323:1974] DIN323: Normzahlen und Normzahlreihen, Blatt 1: Hauptwerte - Genauwerte - Rundwerte, Aug. 1974; Blatt 2: Einführung, Nov. 1974, Beuth Verlag GmbH, 1974
- [DIN-EN12385-1:2002] DINEN12385-1: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 12385-1:2002, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mär. 2003
- [DIN-EN12385-2:2002] DINEN12385-2: Stahldrahtseile - Sicherheit - Teil2: Begriffe, Bezeichnung und Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 12385-2:2002, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Apr. 2003
- [DIN-EN12385-3:2004] DINEN12385-3: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil3: Informationen für Gebrauch und Instandhaltung; Deutsche Fassung EN 12385-3:2004, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dez. 2004
- [DIN-EN12385-4:2003] DINEN12385-4: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke, Deutsche Fassung EN 12385-4:2002, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mär. 2003
- [DIN-EN13411-4:2002] DINEN13411-4: Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 4: Vergießen mit Metall und Kunstharz, Deutsche Fassung EN 13411-4:2002, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2002
- [Dreher1933] Dreher, F.: Ein Beitrag zur Theorie der Drehung und Spannungsverteilung bei zugbelasteten Litzen und Seilen, Dissertation, TH Karlsruhe, 1933, Sonderabdruck aus "Die Wasserwirtschaft", Jahrgang 1934, Heft 7-8

- [Engel1958] Engel, E.: Das Drehbestreben der Seile und ihre Drehsteifigkeit, Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 1(1), S. 33–39, 1958
- [Engel1959] Engel, E.: Verdrehungserscheinungen an Seilen bei Seilbahnen, Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 6(1), S. 215–220, 1959
- [Engel1966] Engel, E.: Der Seildrall, Internationale Berg- und Seilbahn-Rundschau Revue des Téléphériques, 9. Jahrgang, Heft 2, S. 33–35, 1966
- [Ernst2012] Ernst, B.: Zum Einfluss von Verdrehungen auf die Eigenschaften zugschwellbelasteter Drahtseile, Dissertation, Universität Stuttgart, 2012
- [Ernst2011] Ernst, B., Wehking, K.-H.: The influence of twist on tension-tension fatigue of wire ropes, Safe use of ropes, OIPEEC Conference, College Station, (Ed. Ridge, I.M.L.), S. 121–137, 2011
- [Eshkenazy2003] Eshkenazy, R., Weiss, M. P., Elta, D.: Torsion and bending stresses in wires of non-rotating tower crane ropes, OIPEEC Technical Meeting - Lenzburg, S. 77–99, 2003
- [Feyrer1980] Feyrer, K.: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Drahtseil-Biegeversuchen Teil 1 u. 2, DRAHT, Teil 1 6/31 Teil 2 7/31, Teil 1 S. 404–407 Teil 2 S. 489–493, 1980
- [Feyrer1981a] Feyrer, K.: Biegewechselzahl von Drahtseilen bei verschiedenen Biegelängen, Drahtwelt, 4, S. 86–90, 1981
- [Feyrer1981] Feyrer, K.: Die Biegewechselzahl von Standardseilen beim Einfachbiegeversuch, DRAHT, 32, Teil 1 (10) S. 556–558 / Teil 2 (11) S. 603–606, 1981
- [Feyrer1982] Feyrer, K.: Die äußerlich sichtbaren Drahtbrüche als Ablegekriterium von Drahtseilen, DRAHT, 5/33, S. 275–278, 1982
- [Feyrer1983] Feyrer, K.: Die Drahtbruchentwicklung von laufenden Seilen, DRAHT, 5/34, S. 245–249, 1983

- [Feyrer1983a] Feyrer, K.: Die Verteilung der Drahtbrüche auf einem Seil, DRAHT, 4/34, S. 154–159, 1983
- [Feyrer1984] Feyrer, K.: Ablegedrahtbruchzahl von Parallelschlagseilen, DRAHT, 12/35, S. 611–615, 1984
- [Feyrer1992] Feyrer, K.: Einfluss der Drahtfestigkeit auf die Biegewechselzahl von Drahtseilen, DRAHT, 43, 7/8, S. 663–666, 1992
- [Feyrer1997a] Feyrer, K.: Biegewechselzahl und Ablegereife von Spiral-Rundlitzenseilen, F+H Fördern und Heben, 47/ Nr. 5, S. 356–360, 1997
- [Feyrer1997] Feyrer, K.: Drehverhalten von Spiralrundlitzenseilen, DRAHT, 2/97, S. 34–36, 1997
- [Feyrer1998] Feyrer, K.: Nachschmierung von laufenden Drahtseilen, DRAHT, 1, S. 40–45, 1998
- [Feyrer2000] Feyrer, K.: Drahtseile - Bemessung, Betrieb, Sicherheit, Springer-Verlag, 2. Auflage, 2000
- [Feyrer2007] Feyrer, K.: Wire Ropes Tension, Endurance, Reliability, Springer-Verlag, 2007
- [Feyrer2008a] Feyrer, K.: Ablegekriterium Drahtbruchzahl für laufende Drahtseile, LIFT-REPORT, Heft 4, 34. Jahrgang, S. 60–65, 2008
- [Feyrer2011] Feyrer, K.: Die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Größeneinfluss, LIFT-REPORT, Heft 1, 37. Jahrgang, S. 12–18, 2011
- [Feyrer1983b] Feyrer, K., Hemminger, R.: New rope-bending-fatigue-machines constructed in the traditional way, OIPEEC-Bulletin 45, Torino, July 1983
- [Feyrer1986] Feyrer, K., Schiffner, G.: Drehmoment und Drehsteifigkeit von Drahtseilen, DRAHT, 37, Teil 1 (1) S. 20–22 / Teil 2 (2) S. 62–66, 1986

- [Haller1989] Haller, A.: Experience with Untwisted Ropes, Wire Rope Discard Criteria, S. 4.1–4.7, OIPEEC, Round Table Conference, Zurich, 1989
- [Hankus1978] Hankus, J.: Regressionsmodelle der Längsverformung und des Elastizitätsmoduls von Förderseilen, Glückauf-Forschungshefte, 39/ H.6, S. 252–256, 1978
- [Hecht2011] Hecht, S.: Entwurf und Konstruktion einer Verdrehvorrichtung für die Anwendung in Seilbiegemaschinen, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2011
- [Heepen1995] Heepen, R.: Entwicklung und Einsatz eines Verfahrens zur Durchführung praxisgerechter Lebensdaueruntersuchung an Drahtseilen unter mehrachsiger dynamischer Beanspruchung, Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1995
- [Heinrich1942] Heinrich, G.: Über die Verdrehung der zugbelasteten Litzen, Der Stahlbau, 15, S. 41–45, 1942
- [Herrmann2011] Herrmann, D.: Experimentelle und theoretische Untersuchung an Stahldrahtseilen hinsichtlich Drehmomentverhalten, Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2011
- [Hobbs2013] Hobbs, R. E., Ridge, I. M. L.: Torsional interactions in multi-component moorings, Simulating rope applications, OIPEEC Conference, Oxford, (Ed. Ridge, I.M.L.), S. 177–206, 2013
- [Hymans1927] Hymans, F., Hellborn, A. V.: Der neuzeitliche Aufzug mit Treibscheibenantrieb - Charakterisierung, Theorie, Normung, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1927
- [ISO21669:2005] ISO21669:2005(E): Steel wire ropes - Determination of rotational properties, Berlin, 2005-2-15
- [ISO4309:2010(E)] ISO4309:2010(E): Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard, Aug. 2010
- [ISO4344:2004(E)] ISO4344:2004(E): Steel wire ropes for lifts - Minimum requirements, (Second edition) Februar 2004

- [Jahne1992] Jahne, K.: Zuverlässigkeit des Ablegekriteriums Drahtbruchzahl bei laufenden Seilen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1992
- [Jehmlich1980] Jehmlich, G., Steinbach, G.: Einsatz und Überwachung von Drahtseilen in der Fördertechnik und beanspruchungsgerechte Dimensionierung von Drahtseilen und Seiltrieben - Teil 5, Hebezeuge und Fördermittel, 12/20, S. 360–362, 1980
- [Jenner1992] Jenner, T.: Ein Beitrag zur Geometrie der Drahtseile, Dissertation, Universität Stuttgart, 1992
- [Kloepfer2002] Klöpfer, A.: Untersuchung zur Lebensdauer von zug-schwellbeanspruchten Drahtseilen, Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [Malinovsky2006] Malinovsky, V. A., Tarnavskaya, N. A.: Adapted hoist ropes, OIPEEC BULLETIN, Band 91, S. 29–44, Ridge, I.M.L., 2006
- [Mannitz1958] Mannitz, W.: Drahtseile für Stückgutkrane, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 95. Jahrg., 19/20 u. 49/50, S. 927–930 u. S. 2394–2400, 1958
- [Matthias1966] Matthias, K.: Zur Seilablenkung an Seilrollen, Hebezeuge und Fördermittel, 6/2, S. 46–49, 1966
- [Miner1945] Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Transaction ASME, S. 159–164, 1945
- [Mueller1957] Müller, H.: Konstruktion und Prüfung der Seile von Personenseilbahnen, Teil 2: Seilprüfungsverfahren, Verkehr und Technik, Heft 9(Bd. 10), S. 255–259, 1957
- [Mueller1961a] Müller, H.: Das Verhalten der Drahtseile bei Wechselbeanspruchungen, Draht-Welt, 47/3, S. 193–201, 1961
- [Mueller1965] Müller, H.: Drahtseile im Kranbau - Auswahl und Betriebsverhalten, VDI-Berichte, Nr.98, S. 35–46, 1965

- [Neumann1987] Neumann, P.: Untersuchungen zum Einfluss tribologischer Beanspruchungen auf die Seilschädigungen, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1987
- [Nussbaum1999] Nussbaum, J.-M.: Zur Erkennbarkeit von Drahtbrüchen in Drahtseilen durch Analyse des magnetischen Störstellenfeldes, Dissertation, Universität Stuttgart, 1999
- [OIPEEC-Recommendation] OIPEEC-Recommendations: OIPEEC-Recommendation Nr. 1-6, OIPEEC-Bulletin 56, Torino, November 1988
- [Oplatka2004] Oplatka, G.: Drall in Zug- und Förderseilen, INTERNATIONALE SEILBAHNRUNDSCHAU, 5, S. 8–10, 2004
- [Oplatka1999] Oplatka, G., Schwitter, R.: Messung der Schlaglänge von Litzenseilen, DRAHT, 4/47, S. 47–48, 1999
- [Palmgren1924] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band 68 Nr. 14, S. 339–341, 1924
- [Pantucek1977] Pantucek, P.: Pressung von Seildraht unter statischer und dynamischer Beanspruchung, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1977
- [Papailiou1995] Papailiou, O. K.: Die Seilbiegung mit einer durch die innere Reibung, die Zugkraft und die Seilkrümmung veränderlichen Biegesteifigkeit, Dissertation, Eidgenössischen technischen Hochschule Zürich, 1995
- [Petkow1968] Petkow, K. D.: Seilablenkung auf Rollen, Hebezeuge und Fördermittel, 8/9, S. 279–280, 1968
- [Rebel1997] Rebel, G.: The Torsional Behaviour of Triangular Strand Steel Wire Ropes for Drum Winders, Dissertation, University of Witwatersrand, 1997
- [Rebel1996] Rebel, G., Borello, M., Chandler, H. D.: On the torsional behaviour of triangular-strand hoisting rope, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, S. 279–287, November 1996

- [Ren1996] Ren, G.: Drahtbruchprozeß bei laufenden Drahtseilen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [Ridge2001] Ridge, I. M. L., Tytko, A. A.: Use of magnetic NDT to determine the lay length of a stranded wire rope, Journal of the British Institute of NDT, Insight, Vol. 43, 12, S. 806–813, 2001
- [Rossetti1975] Rossetti, U.: New method to interpretate the results of fatigue tests on ropes, OIPEEC- Bulletin, Torino, Band 26, S. 6–12, 1975
- [Schiffner1986] Schiffner, G.: Spannungen in laufenden Drahtseilen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1986
- [Schoenherr2005] Schönherr, S.: Einfluss der seitlichen Seilablenkung auf die Lebensdauer von Drahtseilen beim Lauf über Seilscheiben, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005
- [Shitkow1957] Shitkow, D. G., Pospechow, I. T.: Drahtseile, VEB Verlag Technik Berlin, 1957, Übersetzung aus der russischen Auflage
- [Sindern2010] Sindern, W., Gronau, O.: Stahldrahtseile - bewährte Leistungsträger von Schachtförderanlagen, bergbau, 61(4), S. 155–164, 2010
- [Stange1971] Stange, K.: Angewandte Statistik - Zweiter Teil: Mehrdimensionale Probleme, Springer-Verlag, 1971
- [Thieme1937] Thieme, H.: Versuche über das Verhalten zugbelasteter und auf Biegung beanspruchter Drahtseile im Dauerbetrieb bei freier und verhinderter Seildrehung, Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe, 1937
- [Tonghini1980] Tonghini, M.: On some formulae of the study of the endurance of wire ropes, OIPEEC BULLETIN, Band 37, S. 54–65, 1980
- [Unold1923] Unold, G.: Die Seilablenkung auf Rollen und Trommeln, Maschinenbau - Der Betrieb: Zeitschrift für Gestaltung, Betrieb u. Wirtschaft; Organ der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Betriebsingenieure, Heft 21(4), S. 775–777, 1923

- [Vallan2009] Vallan, A., Molinari, F.: A Vision-Based Technique for Lay Length Measurement of Metallic Wire Ropes, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 5, S. 1756–1762, May 2009
- [VDI2358:2010] VDI2358: VDI-Richtlinien: Drahtseile für Fördermittel, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, März 2010, Entwurf
- [VDI2358:1984] VDI2358: VDI-Richtlinien: Drahtseile für Fördermittel, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Oktober 1984
- [Verreet1999] Verreet, R.: Stahldrahtseile für Hebezeuge: Probleme und Lösungen, EUROSEIL, 118. Jahrgang, Teil 1 (2) S. 455–457 / Teil 2 (4) S. 487–491, 1999
- [Verreet2000] Verreet, R.: Let´s twist again, Carnes & Access, 2, S. 28–29, 2000
- [Verreet2002] Verreet, R.: Stahldrahtseile mit variablen Schlaglängen, 1. Internationaler Stuttgarter Seiltag, 2002
- [Verreet2001] Verreet, R., Ridge, I. M. L.: The use of swivels with steel wire ropes, OIPEEC Round Table Conference - Bethlehem, S. 149–161, 2001
- [Vogel2003] Vogel, W.: Tragmittel für Treibscheibenaufzüge, LIFT-REPORT, Heft 5, 29. Jahrgang, S. 6–16, 2003
- [Vogel2009] Vogel, W.: Seildehnung in Treibscheibenaufzügen, LIFT-REPORT, Heft 5, 35. Jahrgang, S. 94–96, 2009
- [Wang1990] Wang, N.: Spannungen in Spiralseilen mit erzwungener und freier Krümmung, Dissertation, Universität Stuttgart, 1990
- [Weber2010] Weber, T., Wehking, K.-H.: Laufende Drahtseile unter Torsionsbelastung, Hebezeuge Fördermittel, 50/3, S. 132–133, 2010
- [Weber2013] Weber, T., Wehking, K.-H.: Laufende Seile unter Verdrehung, Hebezeuge Fördermittel, 53/3, S. 140–142, 2013

- [Wehking2003] Wehking, K.-H.: Lifetime and discard for multi-layer spooling in cranes, OIPEEC Technical Meeting - Lenzburg, S. 47–59, 2003
- [Wehking2005] Wehking, K.-H., u.a.: Laufende Seile - Bemessung und Überwachung, 3. Auflage, TAE, (Hrsgg.) Bartz, W. J. u. Wippler, E., expert verlag, 2005
- [Weis2013] Weis, J. C., Wehking, K.-H.: Parametric studies of cross sectional stresses for wire ropes under tensile load using the finite element method, Simulating rope applications, OIPEEC Conference, Oxford, (Ed. Ridge, I.M.L.), S. 237–254, 2013
- [Witt2007] Witt, R.: Modellierung und Simulation der Beanspruchung von Zugsträngen aus Stahlritze für Zahnriemen, Dissertation, Universität Dresden, 2007
- [Woernle1929] Woernle, R.: Ein Beitrag zur Klärung der Drahtseilfrage, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band 73 Nr. 13, S. 417–426, 1929
- [Wohlrab1980] Wohlrab, M., Jehmlich, G.: Ermüdungsuntersuchungen im Mehrstufenversuch zur Prüfung der Anwendbarkeit von Schädigungstheorien, Hebezeuge und Fördermittel, 20, S. 326–331, 1980
- [Wolf1987] Wolf, E.: Seilbedingte Einflüsse auf die Lebensdauer laufender Drahtseile, Dissertation, Universität Stuttgart, 1987
- [Ziegler2007] Ziegler, S.: Einfluss der Drahtschwingfestigkeit auf die Lebensdauer von Seilen, Dissertation, Universität Stuttgart, 2007
- [Zimmerman1983] Zimmerman, Z., Reemsnyder, H. S.: Bend-over-sheaves fatigue testing of 2-inch-diameter marine ropes, OIPEEC-Bulletin 45, S. 121–151, Torino, July 1983

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipdarstellung eines Dauerbiegeversuchs	28
1.2	Darstellung des Schrägzugwinkels	30
1.3	Höhenspannung in einer praktischen Anwendung	32
2.1	Prinzip der gegenläufigen Verseilung	36
2.2	Drehmomentmesseinrichtung	38
2.3	Beispielhafte Darstellung des Lebensdauerlaufes von Drahtseilen	41
2.4	Förderkonzepte in Schachtförderanlagen	48
2.5	Verdrehung eines Dreikantlitzenseils	49
2.6	Aus der Höhenspannung resultierende Strangzustände an Scheiben	50
2.7	Schematische Darstellung der Seilbewegung unter Schrägzug	52
2.8	Verdrehwinkel ω bei unterschiedlichen Schrägzugwinkeln	54
3.1	Schematische Zusammenhänge bei Höhendifferenz	58
3.2	Drehwinkel φ in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen	61
3.3	Verdrehwinkel ω in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen	61
3.4	Schematische Darstellung unterschiedlicher Rillenöffnungswinkel	62
3.5	Geometriedarstellung zur Sperrungsberechnung	65
3.6	Zusammenhänge der axialen Längenänderung	66
3.7	Längenänderung der Litzenlagen in Richtung der Seilachse	67
3.8	Längenänderung der Litzenlagen; Seil A	68
3.9	Längenänderung der Litzenlagen; Seil B	68
3.10	Längenänderung der Litzenlagen; Seil C	69
3.11	Längenänderung der Litzenlagen; Seil D	69
3.12	Längenänderung der Litzenlagen; Seil E	70
4.1	Grafische Darstellung der Doppel- und Einfachbiegung	75
4.2	Verdrehvorrichtungen	76
4.3	Aufbau eines Dauerbiegeversuchs mit der Verdrehvorrichtung	77
4.4	Seilkonstruktionen der Versuchsseile	79
4.5	Drehmomentdiagramm; 12 mm 8x19W-FC sZ	81

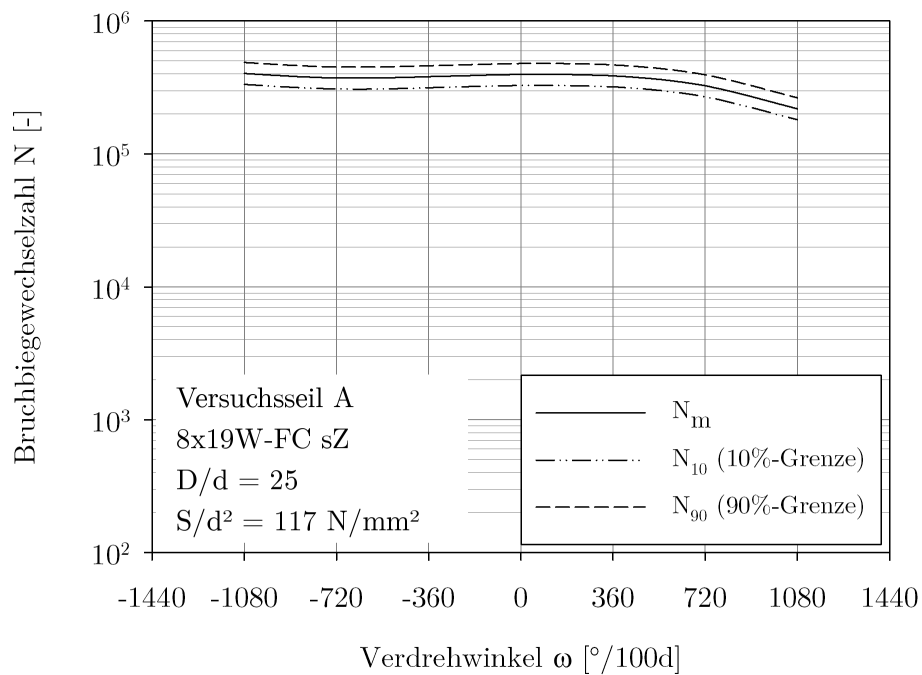
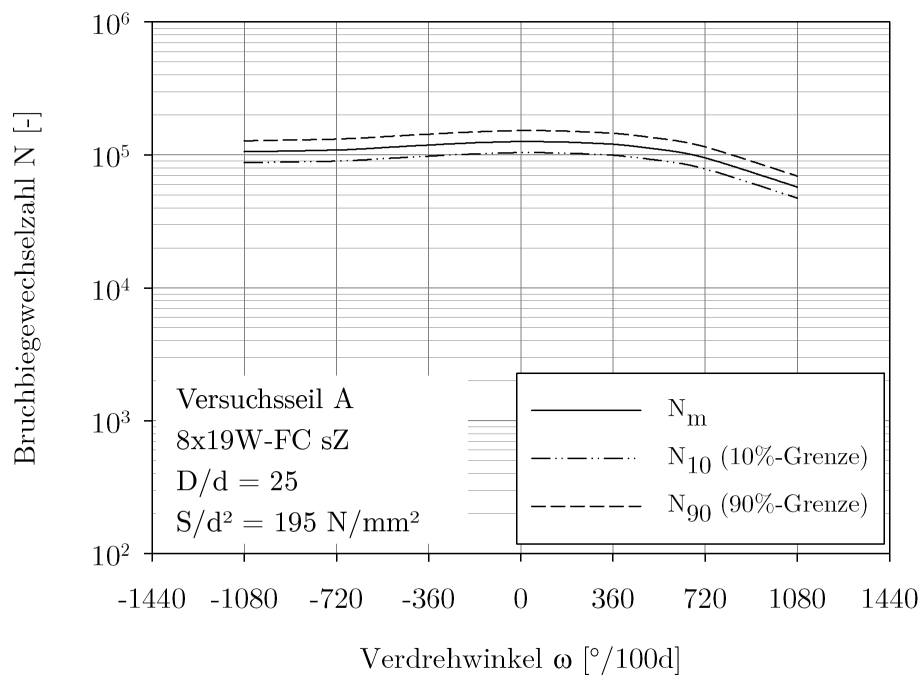
4.6	Drehmomentdiagramm; 12 mm 8x19W-IWRC sZ	81
4.7	Drehmomentdiagramm; 12 mm 6x36WS-IWRC sZ	82
4.8	Drehmomentdiagramm; 16 mm 6x36WS-IWRC sZ	82
4.9	Drehmomentdiagramm; 12 mm 35(W)x7 sZ	83
4.10	Versuchsmatrix für eine Seilkonstruktion und einen Durchmesser	86
4.11	Schematische Darstellung der Vergusskegelposition	88
4.12	Endverbindung mit Verdrehsicherung	91
5.1	Referenzversuche Seil A, $D/d = 25$	98
5.2	Referenzversuche Seil B, $D/d = 25$	98
5.3	Referenzversuche Seil C, $D/d = 25$	99
5.4	Referenzversuche Seil D, $D/d = 25$	99
5.5	Referenzversuche Seil E, $D/d = 25$	100
5.6	Referenzversuche Seil A, $D/d = 16$	101
5.7	Referenzversuche Seil B, $D/d = 16$	101
5.8	Referenzversuche Seil C, $D/d = 16$	102
5.9	Referenzversuche Seil D, $D/d = 16$	102
5.10	Referenzversuche Seil E, $D/d = 16$	103
5.11	Versuche mit Verdrehung Seil A, 2D-Darstellung	107
5.12	Versuche mit Verdrehung Seil B, 2D-Darstellung	107
5.13	Versuche mit Verdrehung Seil C, 2D-Darstellung	108
5.14	Versuche mit Verdrehung Seil D, 2D-Darstellung	108
5.15	Versuche mit Verdrehung Seil E, 2D-Darstellung	109
5.16	Lebensdauer unter Verdrehung Seil A, 3D-Darstellung	112
5.17	Lebensdauer unter Verdrehung Seil B, 3D-Darstellung	112
5.18	Lebensdauer unter Verdrehung Seil C, 3D-Darstellung	113
5.19	Lebensdauer unter Verdrehung Seil D, 3D-Darstellung	113
5.20	Lebensdauer unter Verdrehung Seil E, 3D-Darstellung	114
5.21	Prozentuale Veränderung der Biegewechselzahl, Seil A	117
5.22	Prozentuale Veränderung der Biegewechselzahl, Seil B	118
5.23	Prozentuale Veränderung der Biegewechselzahl, Seil C	119
5.24	Prozentuale Veränderung der Biegewechselzahl, Seil E	120
5.25	Vergleich der theoretisch bestimmten Lebensdauererläufe	122
5.26	Biegewechselzahl bis zur Ablegereifeerkennung	126
5.30	Litzenlagen eines mehrlagigen Spiralrundlitzenseils	137
5.32	Schlaglängenverhältnis, Seil A	140
5.33	Schlaglängenverhältnis, Seil B	140
5.34	Schlaglängenverhältnis, Seil C	141

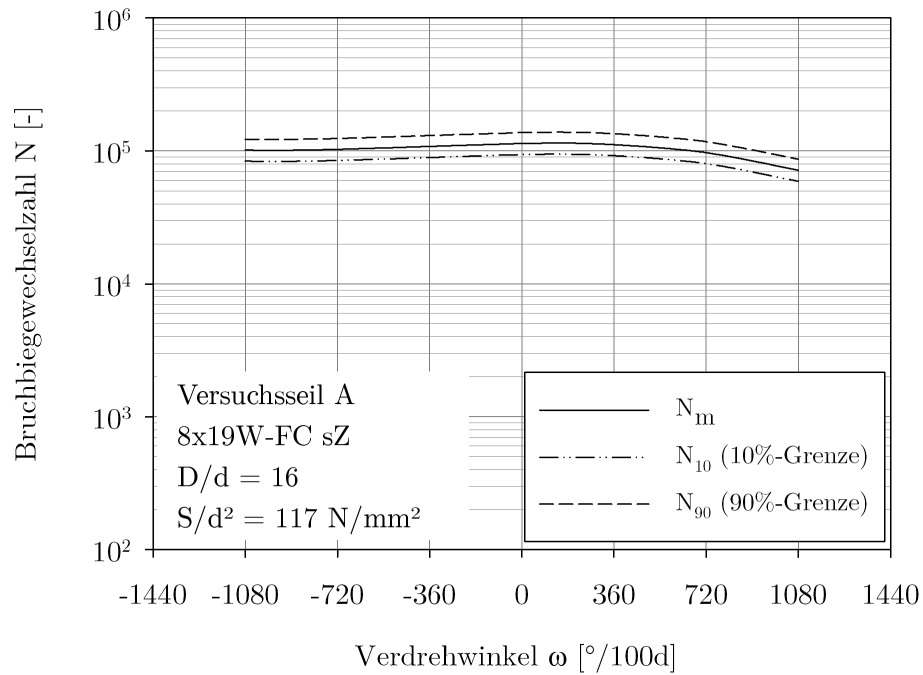
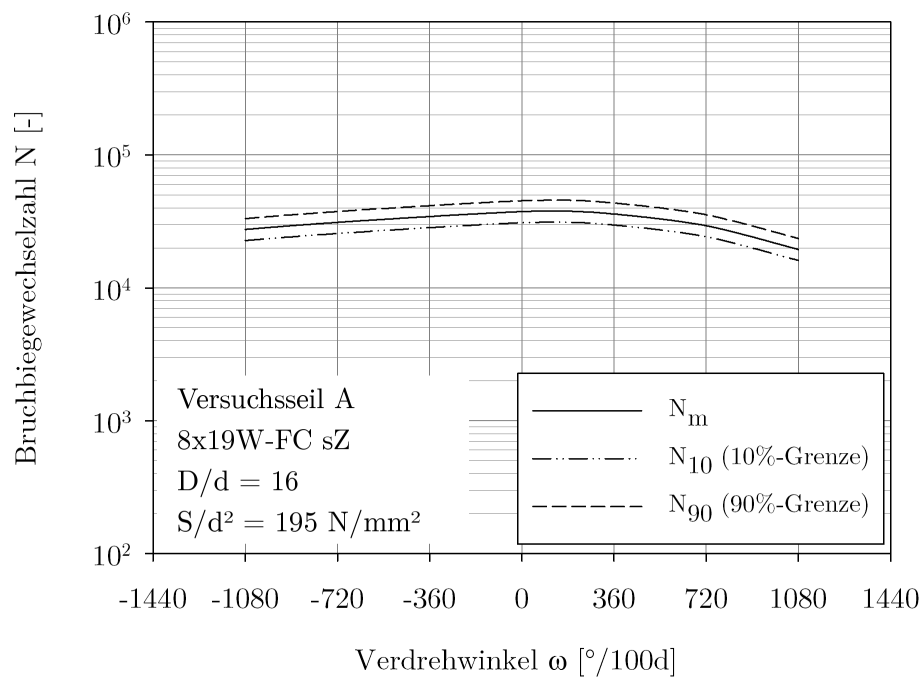
A.1	Seil A, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$	168
A.2	Seil A, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$	169
A.3	Seil B, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$	170
A.4	Seil B, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$	171
A.5	Seil C, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$	172
A.6	Seil C, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$	173
A.7	Seil D, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$	174
A.8	Seil D, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$	175
A.9	Seil E, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$	176
A.10	Seil E, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$	177

Tabellenverzeichnis

3.1	Geometrische Veränderungen in Abhängigkeit der Verdrehzustände . . .	56
4.1	Kennzahlen Dauerbiegemaschinen	74
4.2	Kennzahlen Verdrehvorrichtungen	76
4.3	Bezeichnung der Versuchsseile	79
4.4	Bruchkraftwerte	80
4.5	Drehmomentkonstanten	83
5.1	Seildurchmesserbezogene Donandtkraft S_D bzw. S_{D1}	97
5.2	Ermittelte Konstanten für $D/d = 25$	104
5.3	Ermittelte Konstanten für $D/d = 16$	104
5.4	Ermittelte Konstanten b_0 bis b_2	111
5.5	Bestimmtheitsmaß B und Standardabweichung $\lg s$	115
5.6	Drahtbruchzahl zum Erreichen der Ablegereife	125
5.7	Anteil der ausgewerteten Versuche, die $N_A/N_B \leq 0,8$ erfüllen	128
5.8	Probenauswahl Versuchsseil A	130
5.9	Probenauswahl Versuchsseil B	132
5.10	Probenauswahl Versuchsseil C	134
5.11	Probenauswahl Versuchsseil E	136
5.12	Ermittelte Konstanten zur Berechnung der Schlaglängenänderung . . .	142

Anhang

(a) $S/d^2 = 117 \text{ N/mm}^2$ (b) $S/d^2 = 195 \text{ N/mm}^2$ Abbildung A.1: Seil A, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$

(a) $S/d^2 = 117 \text{ N/mm}^2$ (b) $S/d^2 = 195 \text{ N/mm}^2$ Abbildung A.2: Seil A, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$

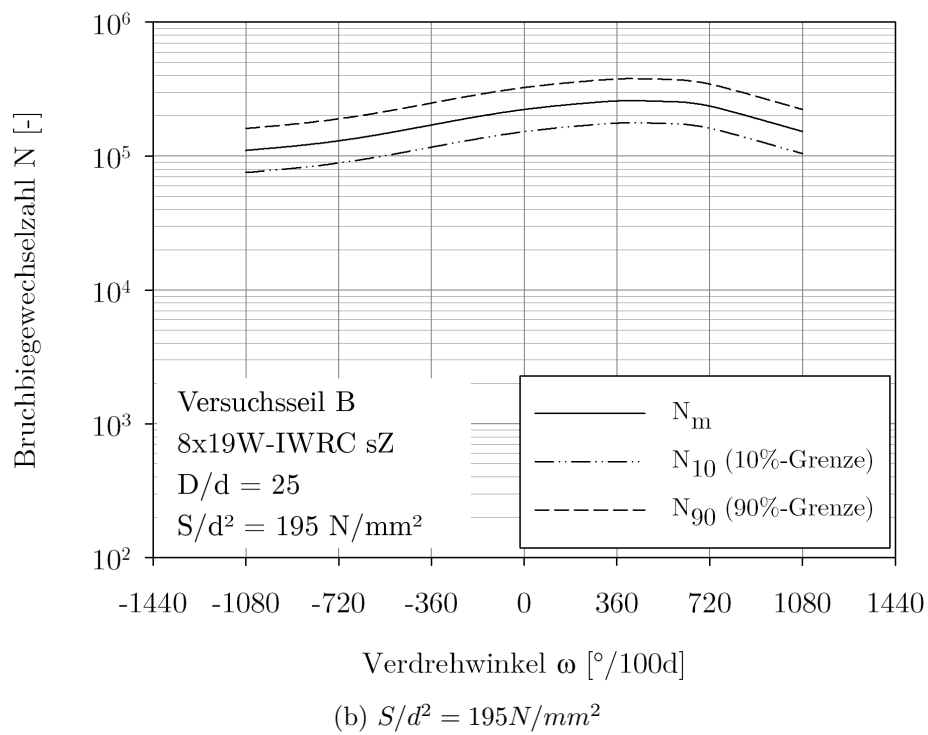
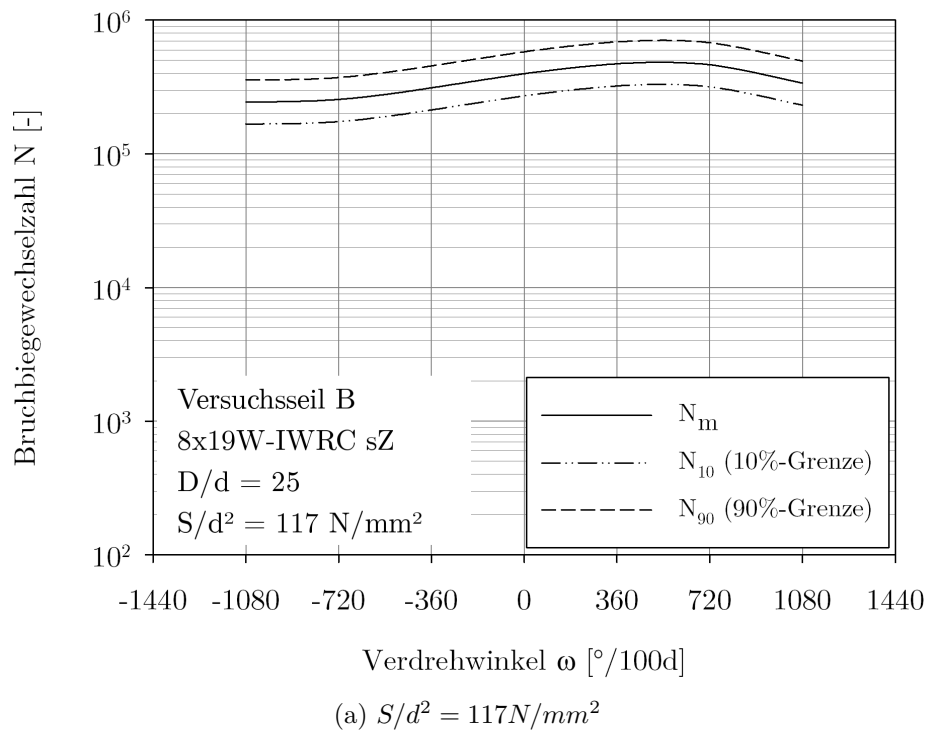
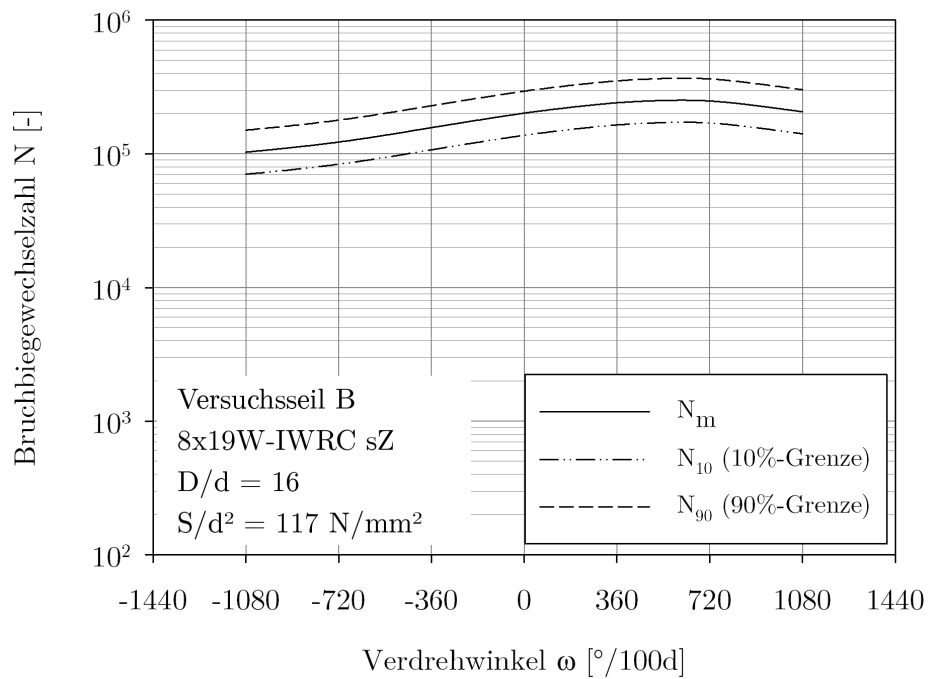
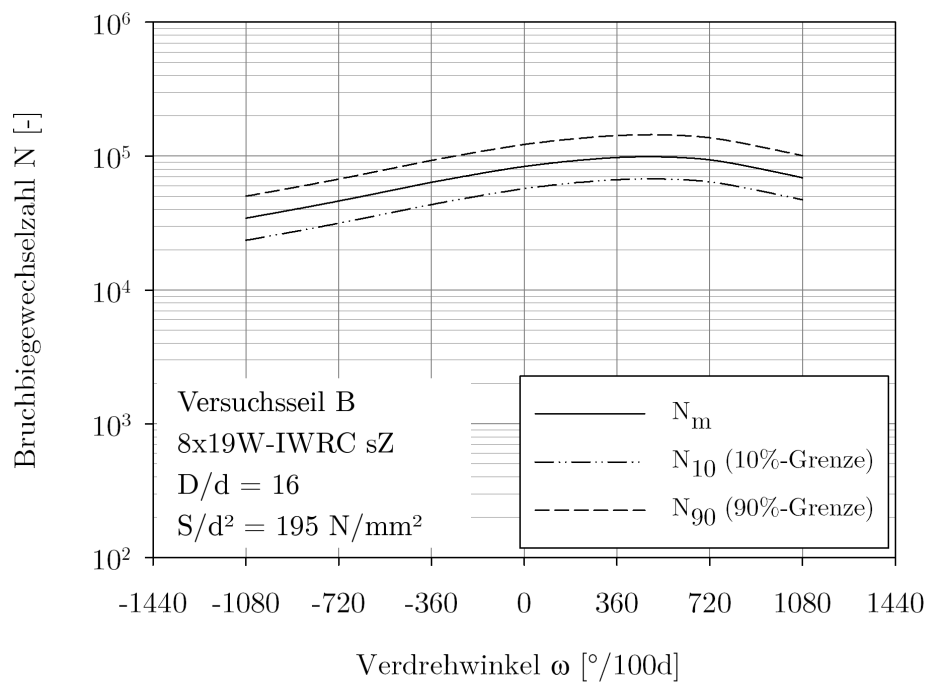


Abbildung A.3: Seil B, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$

(a) $S/d^2 = 117 \text{ N/mm}^2$ (b) $S/d^2 = 195 \text{ N/mm}^2$ Abbildung A.4: Seil B, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$

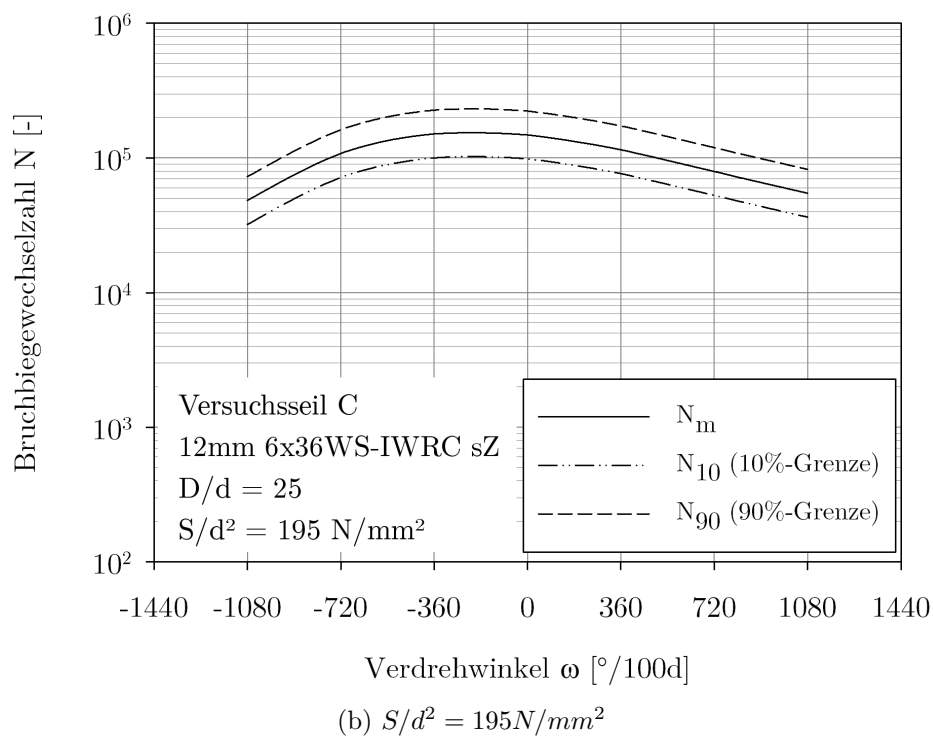
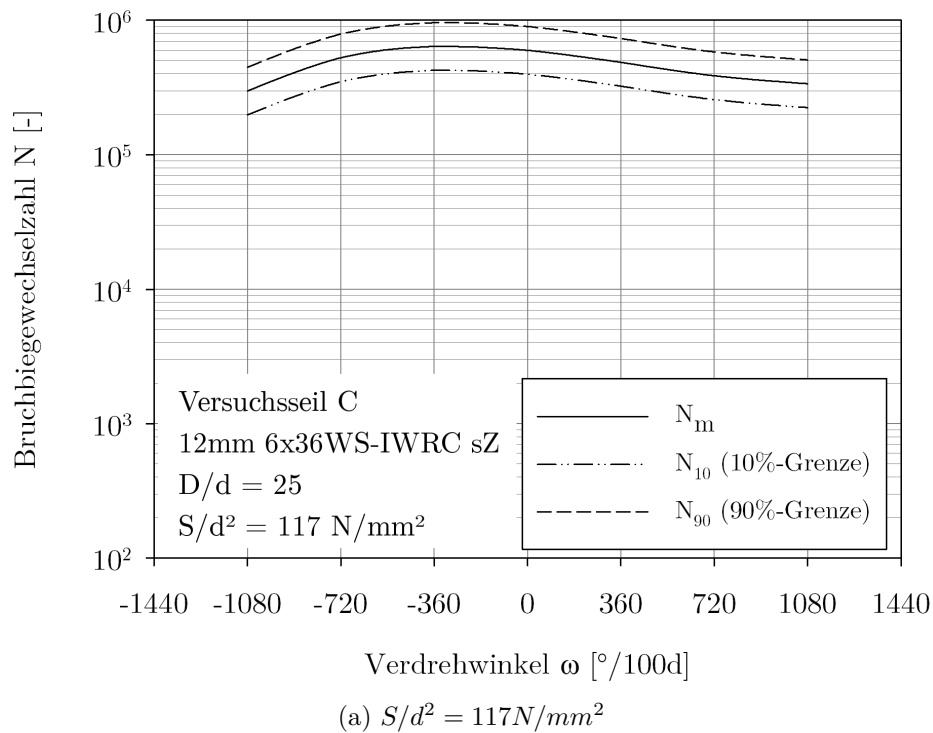
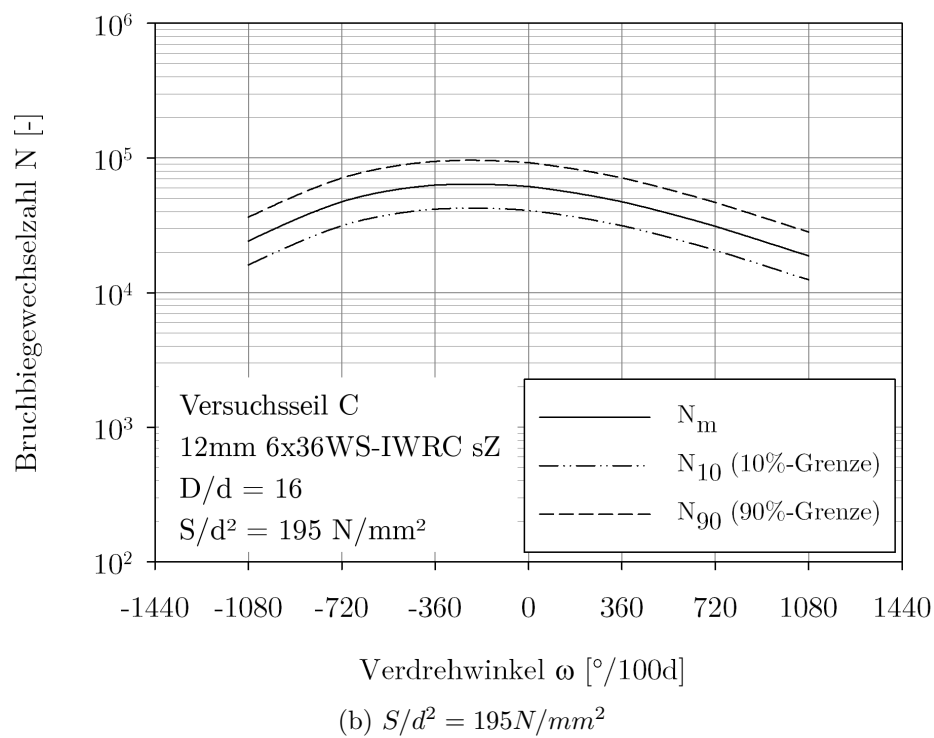
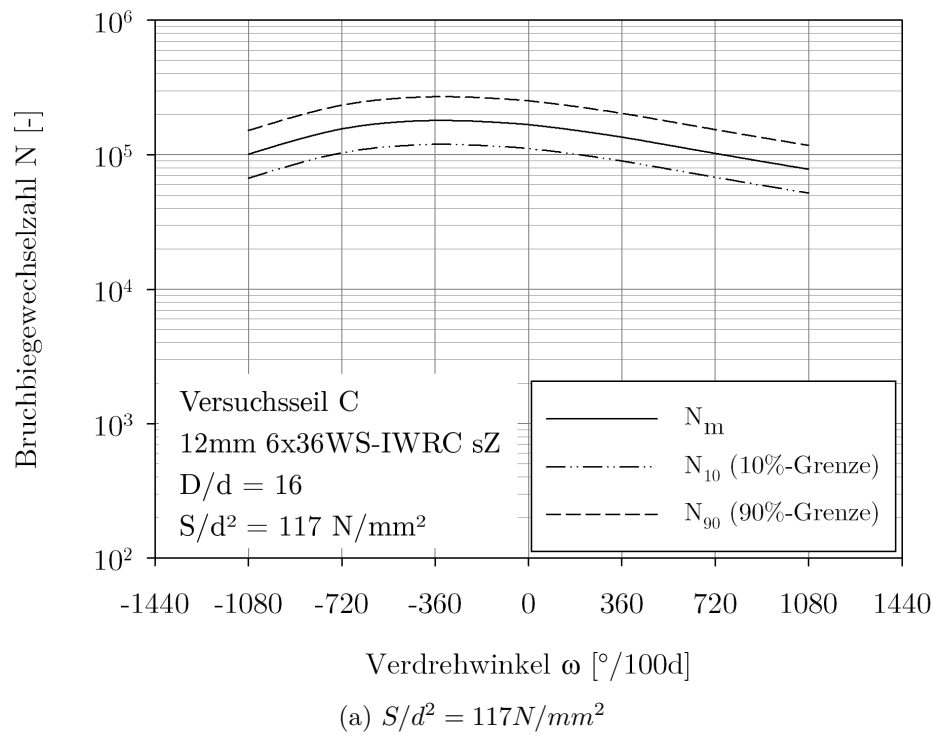


Abbildung A.5: Seil C, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$

Abbildung A.6: Seil C, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$

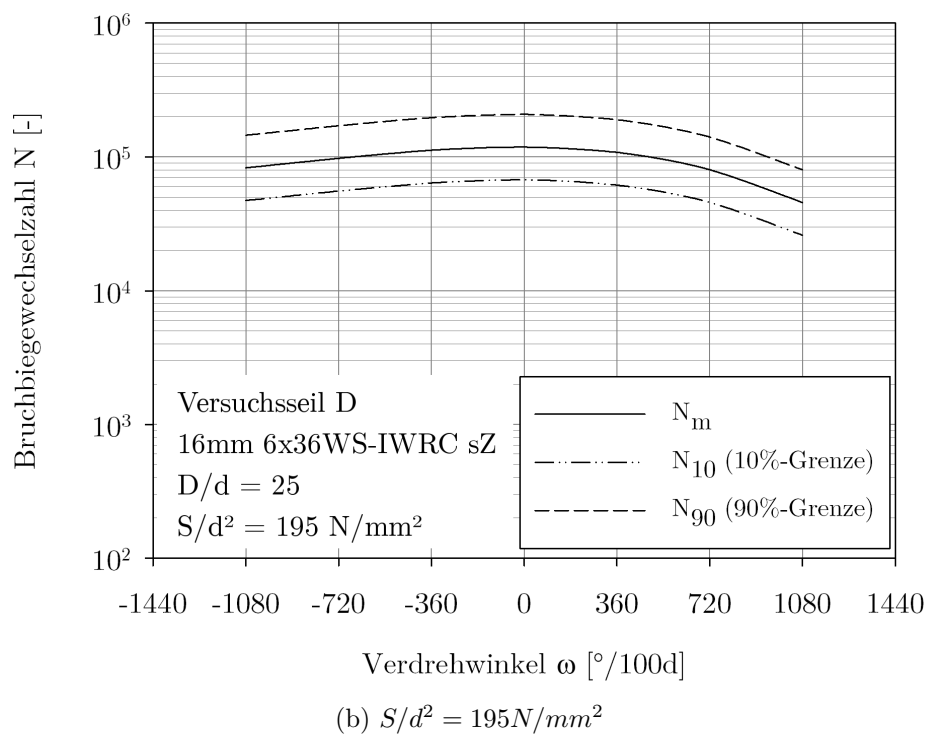
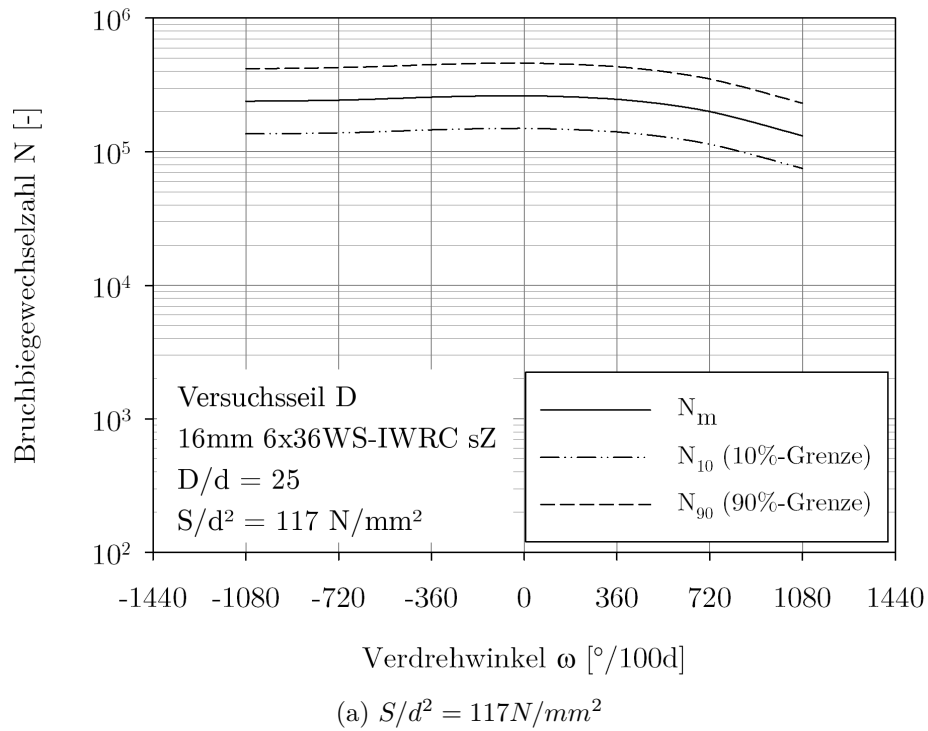
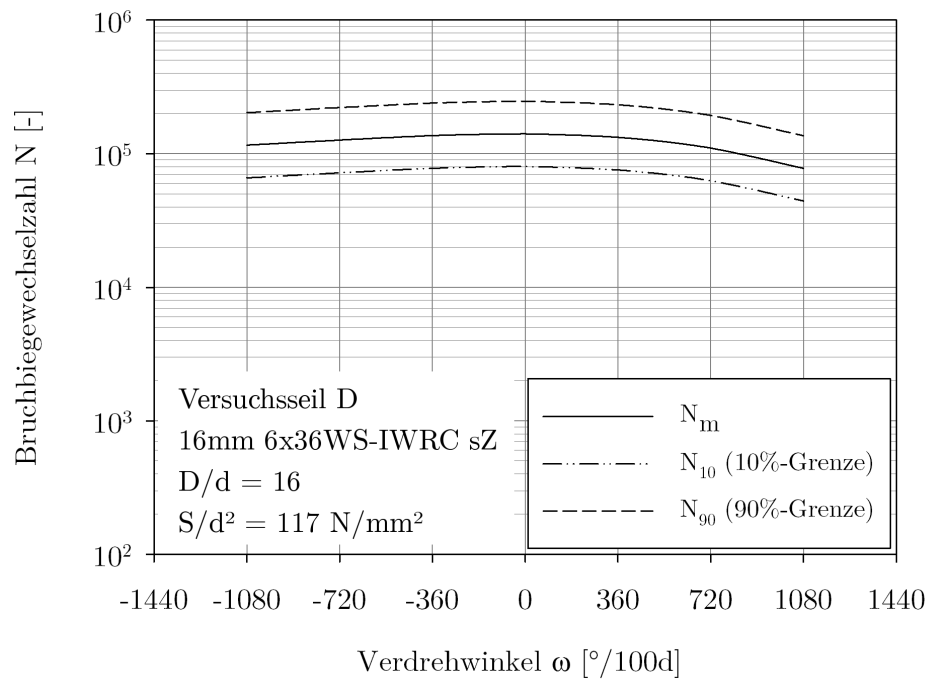
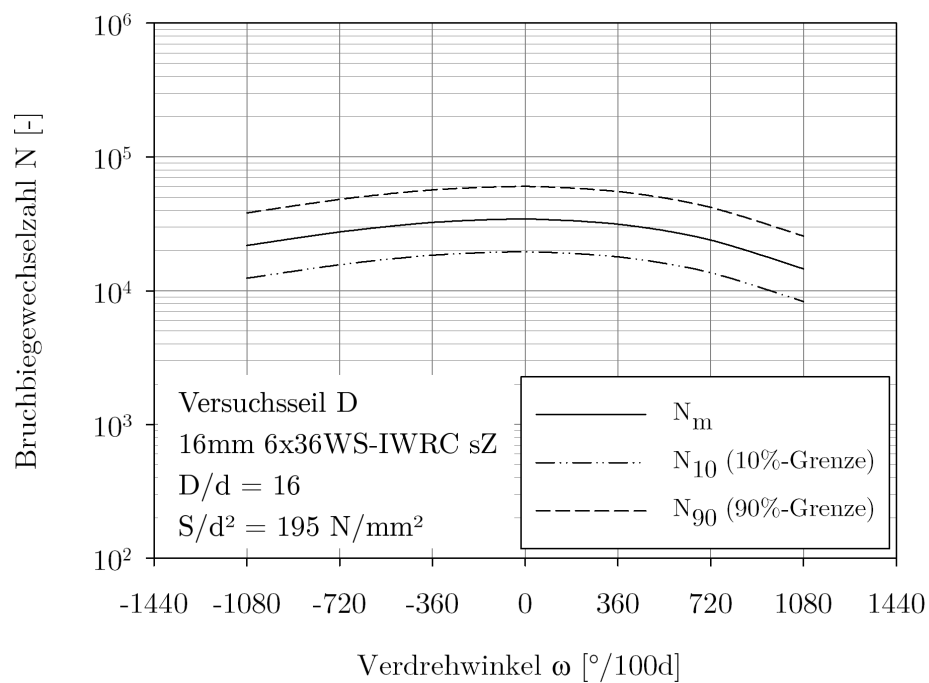


Abbildung A.7: Seil D, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$

(a) $S/d^2 = 117 \text{ N/mm}^2$ (b) $S/d^2 = 195 \text{ N/mm}^2$ Abbildung A.8: Seil D, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$

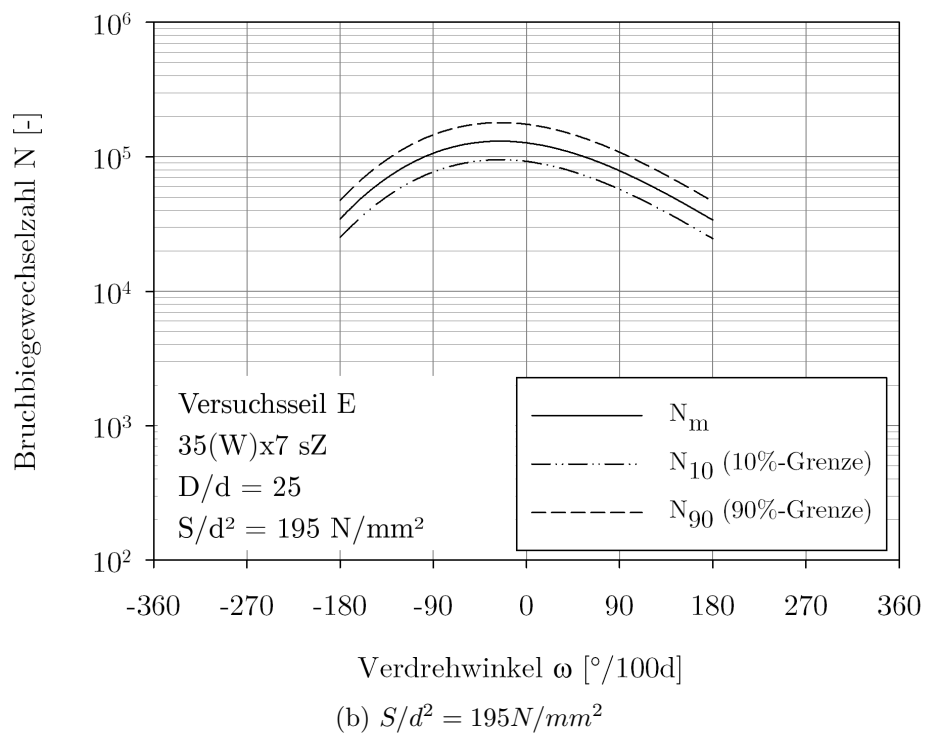
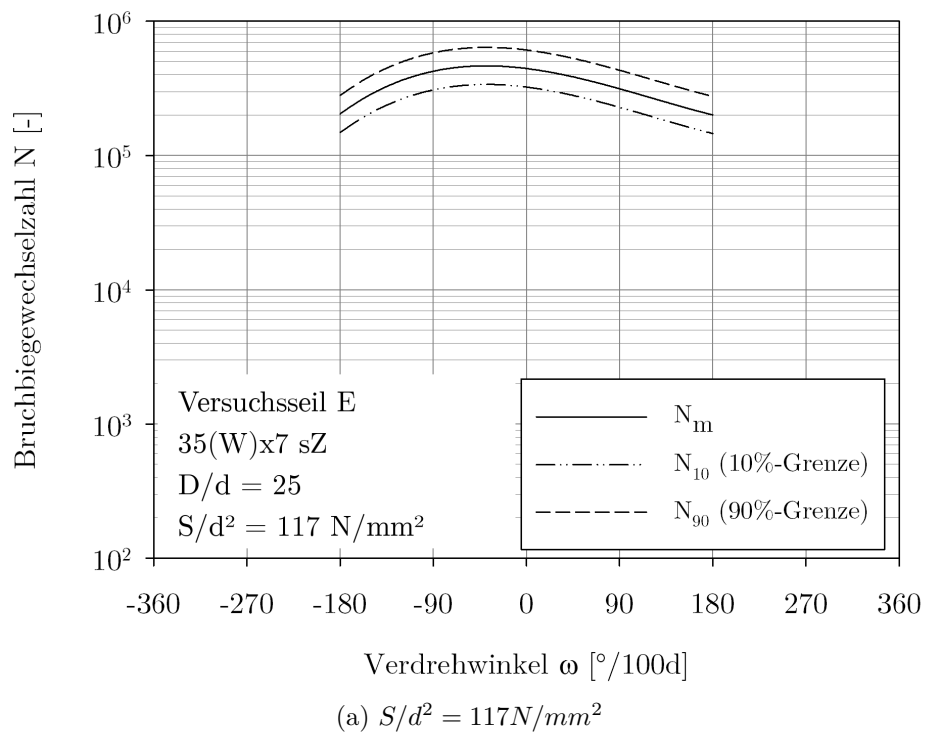


Abbildung A.9: Seil E, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 25$

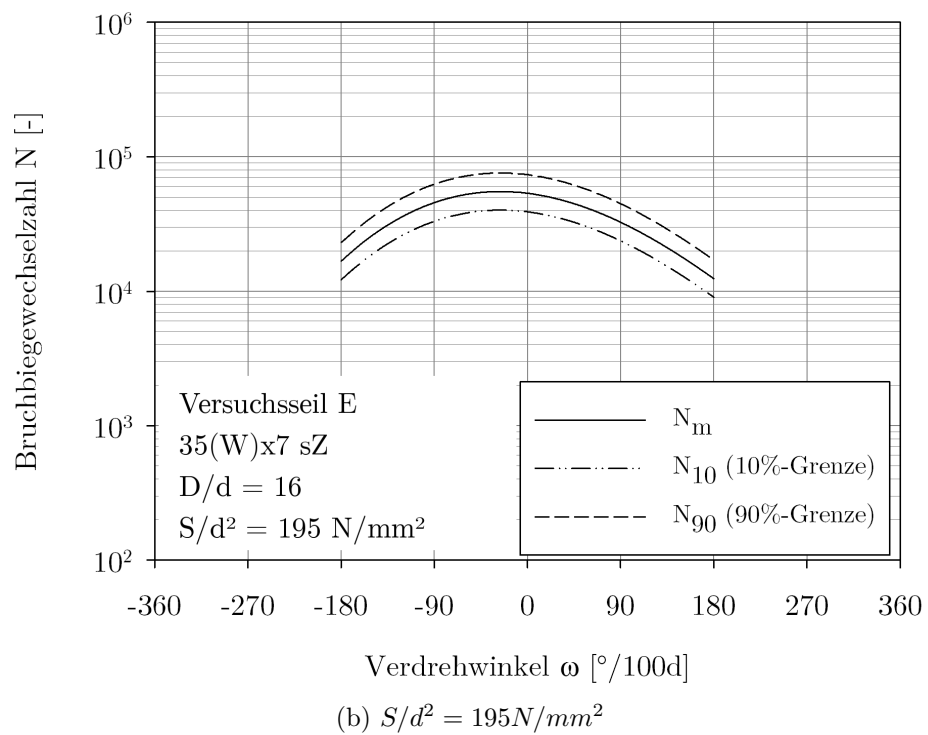
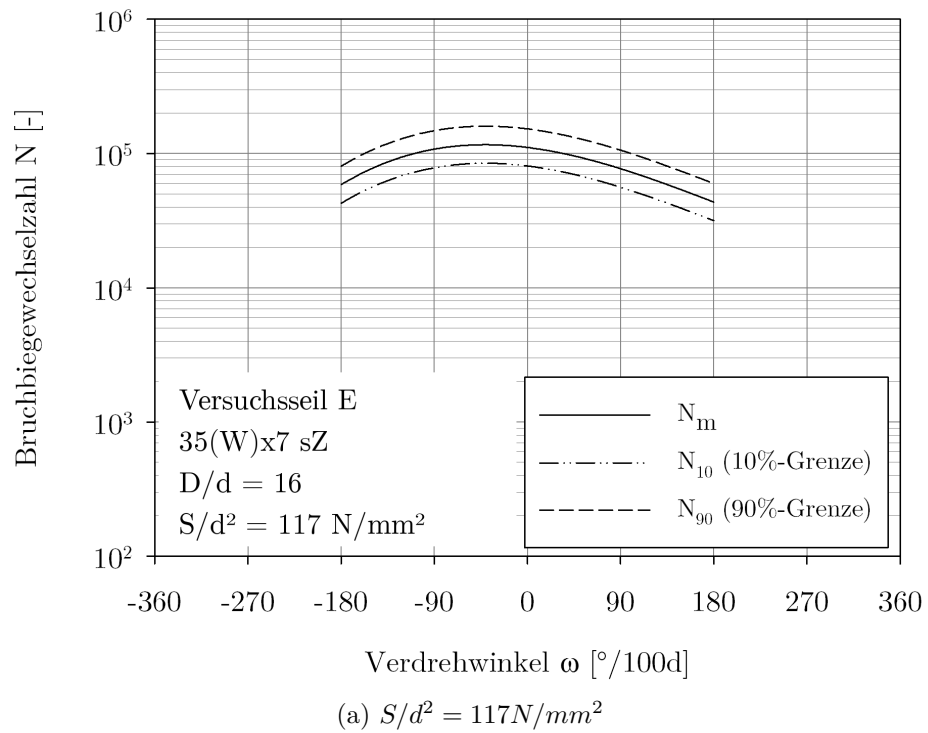


Abbildung A.10: Seil E, N_m mit N_{10} und N_{90} , $D/d = 16$