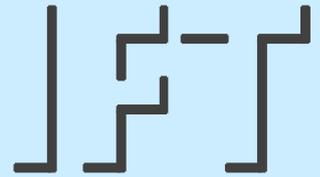


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

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

UNIVERSITÄT STUTTGART



Konstantin Kühner

Beitrag zur Untersuchung der Schädigung von Seilbahnseilen durch Drehung und Verdrehung im Betrieb

Juni 2017

Beitrag zur Beurteilung der Schädigung von Seilbahnseilen durch Drehung und Verdrehung im Betrieb

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. Konstantin Alexander Kühner
aus Siegen

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. C. Salander
Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. M. Liewald MBA

Tag der mündlichen Prüfung: 01.06.2017

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
der Universität Stuttgart

2017

1. *Nicht alles ist vernünftig, was mit ernstem Gesicht vorgetragen wird.*
2. *Nicht alles, was vernünftig ist, muss mit ernstem Gesicht vorgetragen werden.*
3. *Formalien können nur den schwachen Gemütern den Spaß an der Wissenschaft nehmen.*

aus (Meyer-Krentler und Moeninghoff 2013)

meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Vorwort	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Kurzzusammenfassung	IX
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Drahtseile	1
1.2 Seilbahnen	3
2 Problemstellung, Zielsetzung und Abgrenzung	6
2.1 Seildrehung und Verdrehung	6
2.2 Seilschädigung durch Verdrehung	7
2.3 Zielsetzung und Abgrenzung	12
3 Stand der Technik und Wissenschaft	14
3.1 Theoretische Modelle der Seildrehung	14
3.2 Messung der Seildrehung	17
3.3 Messung der Schlaglänge	18
3.4 Visuelle und Magnetinduktive Seilprüfung	19
4 Lebensdauereinfluss von Verdrehung	21
4.1 Kennwertbestimmungen am Versuchseil	21
4.2 Dauerbiegeversuche von Gleichschlagseilen unter Verdrehung	23
4.3 Ergebnisaufbereitung und Diskussion	26
4.4 Lebensdauerfaktoren nach Feyrer	32
5 Erweitertes theoretisches Modell der Seildrehung	36
5.1 FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse der Einflussparameter	37
5.2 Mathematische Erschließung der wirksamen Einflussfaktoren	46
5.3 Zusammenfassung theoretisches Seildrehmoment einer Pendelbahn	68
5.4 Digitale Seildrehungsmessung	72
5.5 Messungen ausgewählter Anlagen	77
6 Analyse magnetinduktiver Prüfdaten und Schlaglängenauswertung	85
6.1 Ermittlung von Ablegereife und Seillebensdauer	85
6.2 Ermittlung des Schlaglängenverlaufs	88
7 Untersuchung von Ansätzen für Bewertungsmodelle	95
7.1 Ansatz technische Bewertung	95
7.2 Ansatz Lebensdauerpolynom nach Feyrer	95
7.3 Ansatz Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner	96
7.4 Ansatz Entscheidungsregeln nach Hurwicz, Laplace und Savage-Niehans	97
8 Gesamtmodell zur Seilschädigung aus Verdrehung	99
8.1 Bewertung und Auswahl des Abbildungsmodells	99
8.2 Beurteilung und Vorhersage der Seillebensdauer in der Praxis	100
8.3 Validierung	103
8.4 Empfehlungen	105
9 Übertragungspotential	108
9.1 Übertragung auf Leerseile von Einseilumlaufbahnen	108
9.2 Hinweise zur Übertragung auf allgemeine Seiltriebe	113
10 Zusammenfassung und Ausblick	118
10.1 Zusammenfassung	118
10.2 Ausblick potentielle Weiterentwicklung des Themas	123
Literaturverzeichnis	125
Anhang	132

Vorwort

Das vorliegende Projekt wurde als zweijähriges Forschungsprojekt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) öffentlich finanziert. Den beteiligten Gremienmitgliedern, Gutachtern und Projektkoordinatoren der DFG danke ich herzlich für das Vertrauen und die Förderung dieser Forschungsarbeit.

Mit diesen Worten möchte ich zudem Herrn Professor Wehking für die Betreuung der Arbeit sowie Herrn Professor Liewald für die Mitberichterstattung herzlich danken.

Ein besonderes Dankeschön geht auch an den Emeritus des IFT, Prof. Feyrer, dass er sich kontinuierlich über den Fortschritt der Arbeit informiert und mir bei Fragen helfend zur Seite stand.

Des Weiteren danke ich meinem Abteilungsleiter Sven Winter von Herzen für seinen fachlichen Beistand und sein zuverlässiges Bauchgefühl bei kniffligen Fragen. Den Kolleginnen und Kollegen Marina Härtel, Samuil Bakschan, Werner Beck, Ralf Eisinger, Alexander Haase, Dirk Moll, Gregor Novak, Sebastian Traub und Martin Wehr sei für ihre Unterstützung bei der Softwareentwicklung, dem Prototypenbau, bei Versuchen und Testmessungen sowie besonders für das freundschaftliche, stets ermunternde Arbeitsklima gedankt.

Ohne die Freude am Ausprobieren und Hilfsbereitschaft der Seilbahnbetreiber und Unterstützung aus der (Seilbahn-)Industrie wäre diese Arbeit ebenfalls nur schwerlich zustande gekommen. Daher möchte ich allen am Projekt Beteiligten herzlich danken. Besonders hervorzuheben sind dabei: Rudolf Beha, Leitner AG; Markus Herter, Schilthornbahn AG; Martin Hurm und Marcus Liebscher, Bayerische Zugspitzbahn Bergbahn AG; Bruno Longatti und Oliver Reinelt, Fatzer AG; Harald Muchow, Robert Bosch GmbH; Stephane Pernot, LetScan SARL; Jörg Tonett, Wire Rope Service Inc.; Robert Traxl, Teufelberger GmbH; Tobias Weber, VDMA.

Mag die technische Seite in dieser Abhandlung vermeintlich noch so sehr im Vordergrund stehen, auch die Familie hatte während der Bearbeitung viel zu Tragen und einiges zu Entbehren. Meiner Frau Friederike, den Töchtern Marlene und Pia sowie meiner Schwester Carolin, meinen Eltern und Schwiegereltern danke ich von ganzem Herzen, dass sie mir das Schreiben dieser Arbeit mit ihrer Zeit überhaupt ermöglicht und mich stets zu diesem Schritt ermutigt haben.

Konstantin Kühner

Stuttgart, im Januar 2017

Abkürzungsverzeichnis

Kurzform	Einheit	Bedeutung
A	-	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers in der FMEA
a	m/s ²	Beschleunigung / Verzögerung einer Seilbahnanlage
a ₀ , a ₁ ,...	-	Konstanten der Lebensdauerformel ohne Verdrehung
B	-	Bedeutung der Auswirkung eines Fehlers in der FMEA
	-	Bestimmtheitsmaß einer Näherungsgleichung
b ₀ , b ₁ ,...	-	Konstanten der Lebensdauerformel bei Verdrehung
c ₁ , c ₂ , c ₃	-	Drehmomentkonstanten
c _L	-	Schlaglängenfaktor
d	mm	Seildurchmesser
D	mm	Scheibendurchmesser
	N/mm ²	Drehsteifigkeit
D/d	-	Verhältnis der Durchmesser von Seilscheibe und Seil
d ₀	mm	Hilfsgröße, um den Seildurchmesser d dimensionslos zu machen
d _L	mm	Litzendurchmesser
E	-	Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers in der FMEA
	N/mm ²	Elastizitätsmodul eines Drahts oder Seils
f	m	Durchhang eines gespannten Seils
	-	Faktor zu Seillebensdauerberechnung
		technischer Bewertungsfaktor im Gesamtmodell
F	N	Kraft
G	N/mm ²	Schubmodul eines Seils
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe eines Seilspannfeldes, Höhenunterschied einer geneigten Seilstrecke
H	kN	Horizontale Seilspannkraft am unteren Ende eines Feldes
L	m	Länge eines Seilfeldes
L _L	mm	Nennschlaglänge eines Seils
L _L '	mm	sich neu einstellende Schlaglänge eines verdrehten Seils
m	kg	Masse, z.B. einer Seilscheibe
M	Nm	Drehmoment
MBK	kN	Mindestbruchkraft eines Drahtseils (Katalogwert)
N	-	Biegewechselzahl eines Seils bis Bruch
	U	Anzahl der Rotationen des Seils
	N	Normalkraft eines Seils zu einem Stützelement
q	N/m	Spezifische Seilgewichtskraft
q*	N/m	Spezifische Seilgewichtskraft in Abhängigkeit der Feldsteigung
Q	kg	Gewicht eines Fahrzeugs
r	mm	Rillenradius einer Scheibe oder Rolle
R bzw. R _L	mm	Teilkreisradius der Litzen im Seil
R ₀	N/mm ²	Nennfestigkeit eines Seils
s	-	Standardabweichung einer Näherung
S	kN	Seilkraft
S/d ²	N/mm ²	Durchmesserbezogene Seilkraft
S ₀	kN	Hilfsgröße, um die Seilkraft S dimensionslos zu machen
s _Q	mm	Sperrung der Litzen in einem Seil
T	h bzw. Tage	Betriebszeitraum / Einsatzdauer einer Seilbahnanlage
t	s	Zeitverluste bei Umfahrten einer Seilbahnanlage
v	m/s	Fahrgeschwindigkeit einer Seilbahnanlage
w		Anzahl der äquivalenten Biegewechsel während eines Zyklus
W	Wochen	Betriebszeitraum einer Anlage pro Jahr

Abkürzungsverzeichnis

x	m	Längenkoordinate eines Seilbahnprofils
y	m	Höhenkoordinate eines Seilbahnprofils
Z	Stück	Anzahl von Seilscheiben in einem Bahnsystem
Z	Stück	Anzahl ertragbarer Zyklen
μ	-	Reibbeiwert (Mittelwert Nennbetrieb)
α	° bzw. rad	Neigung eines Seilfeldes Ablenkwinkel einer Stütze / eines Seilreiters
β bzw. β_L	° bzw. rad	(Litzen-)Schlagwinkel eines Seils
β'	° bzw. rad	Schlagwinkel eines verdrehten Seils
ε_D	-	Dehnung eines Drahts
η	-	Ausnutzungsgrad einer Seilbahnanlage / eines Seils
η	-	Verlust an Seillebensdauer
φ	° bzw. rad	Drehwinkel eines Seils
ω	° bzw. rad / m	Längenbezogener Verdrehwinkel, negativ aufdrehend, positiv zudrehend
Φ	%	Schadenslevel des Gesamtmodells
Φ_L	° bzw. rad	halber Winkel zwischen zwei benachbarten Litzen am Umfang
2S		Zweiseilumlaufbahn
3S		Dreiseilumlaufbahn
AG		Aktiengesellschaft
bzw.		beziehungsweise
CBOS		Cyclic bending over sheaves
DIN		Deutsches Institut für Normung
EN		Europäische Norm
EUB		Einseilumlaufbahn
FC		Fiber Core
FMEA		Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse
GmbH		Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HRC		Härte nach Rockwell
ID		Identifikationsnummer eines Fehlers der FMEA
IFT		Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
MI		magnetinduktive Seilprüfung
MRT		Magnetic rope testing, engl. für MI
NA		Biegewechselzahl bei Ablegereife
RPN		risk priority number, vgl. RPZ
RPZ		Risikoprioritätszahl in der FMEA
SARL		Société à responsabilité limitée, franz. für GmbH
spa		Società per azioni, ital. für AG
TSF		Zugsicherheitsfaktor
u.a.		unter anderem
UM		Umweltministerium
VDI		Verein Deutscher Ingenieure
z.B.		zum Beispiel
z.T.		zum Teil
ZAm		Anzahl Betriebszyklen, bei der mit 95% Wahrscheinlichkeit 50% der Seile ablegereif sind
zZ		Gleichschlag rechts

Kurzzusammenfassung

Bewegte Seile, beispielsweise die Zugseile einer Zweiseilpendelbahn, drehen sich während der Fahrt Kabine bzw. der Bewegung des Systems um ihre eigene Achse. Die helixförmige Struktur von Stahlseilen ist maßgeblich an diesem Effekt beteiligt. Zum Teil ist er durch die physikalischen Umgebungsbedingungen unvermeidbar, jedoch kann ein vermeidbarer Anteil durch die mechanische Einstellung und Kombination von Anlagenparametern entstehen, der sich zu einer bleibenden Verdrehung im Seil aufstauen und gespeichert werden kann. Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung von Seilbahnseilen aus der Forschungs- und Dienstleistungstätigkeit des Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart (IFT) haben gezeigt, dass nach derzeitigem wissenschaftlichen Stand der Bereich der Schadensentwicklung eines Zugseils nicht zwangsläufig nur mit den offensichtlichen Belastungszonen aus Betriebsbeanspruchungen oder dem Lauf über Scheiben und Stützen erklärt werden kann, vgl. Kapitel 2.2. Detaillierte Analysen der Drahtbruchentwicklung, insbesondere der Lage der Drahtbrüche lassen eben diese Verdrehung als beschleunigenden Schädigungsanteil erkennen.

Bisher war die messtechnische Abbildung der Drehung eines Seiles über die Fahrstrecke und somit die Übertragung auf das bleibende Verdrehungs- bzw. Schadensbild nicht möglich, es wurden lediglich optische Beobachtungen durchgeführt. Drallerscheinungen sind daher nach aktuellem Stand der Technik kaum planbar und werden erst im Betrieb erkannt und nur situativ bekämpft bzw. weitestgehend hingenommen. Ein neuartiger Sensor, der am IFT in Eigenleistung entwickelt und erfolgreich getestet wurde, erlaubt nun die digitale Aufzeichnung der Drehung über der Zeit, wodurch bisher nicht bekannte Informationen über das dynamische Seilverhalten an einem beliebigen Ort entlang der Abwicklung der Seilschleife erlangt werden können. Mithilfe dieser neuen Messdaten kann das Drehverhalten von Zweiseilpendelbahn-Zugseilen analysiert und maßgeblichen Parametern zugeordnet werden. Ziel der Arbeit ist es, den Zusammenhang aus Drehung, bleibender Verdrehung und resultierender Schädigung in der Seilbahnpraxis ermittelbar und vorhersagbar zu machen. Durch die Identifikation und Bezifferung von drehungsfördernden Parametern in Kombination mit den Schadensbildern der Seile aus zerstörungsfreien Prüfungen wird ein neuer Berechnungsansatz zur Auslegung von Seilbahnzugseilen gefunden, mit dessen Hilfe die Sicherheit, Seillebensdauer und Verfügbarkeit der Systeme verbessert werden kann.

Die Forschungsarbeit berücksichtigt dabei drei Pfade, die abschließend zu einem Gesamtmodell zusammengeführt werden. Im ersten Pfad werden Dauerbiegeversuche mit diskret verdrehten Gleichschlagseilen durchgeführt, um die Lebensdauerrechnung nach Feyrer und Weber für die üblichen Seilkonstruktionen in Seilbahnen zu ergänzen. Als Ergebnis liegen nun Parameter vor, welche durch Regression ermittelten wurden und die Berechnung der theoretisch erreichbaren Biegewechsel bis zur Ablegereife der Seile bei Sichtkontrolle ermöglichen. Im zweiten Pfad wurde mit Hilfe der Methode der FMEA das System Pendelbahn grundlegend systematisch in Bezug auf Faktoren analysiert, die Drehmomente im und am Seil bewirken können. Nach Bewertung und Auswahl werden zu diesen Faktoren soweit möglich mathematische Beziehungen aufbereitet oder neu entwickelt, so dass die erwartbare Drehmomententwicklung eines Seilbahnseils berechenbar wird. Mit Hilfe eines Stammdatenblatts können somit Seilbahnanlagen bei Verwendung weniger Geometriedaten bereits in der Planung auf ihre Drehmomententwicklung rechnerisch geprüft werden.

Der oben beschriebene Drehsensor wird dazu auf 25 Pendelbahnanlagen zur Messung der realen Drehung eingesetzt, wodurch die Annahmen aus der FMEA untermauert und um Details ergänzt werden. Die Drehungsdifferenz der Seile zwischen einer Berg- und Talfahrt ist zudem ein Maß für den real entstehenden Stau der Seildrehungen und somit für das erwartbare Ausmaß der Schädigung.

Im dritten Pfad werden schließlich zerstörungsfreie Prüfdaten von magnetinduktiven Seilprüfungen, z.T. von mehreren Seilgenerationen der untersuchten Seilbahnanlagen auf die Seillebensdauer, Schadensentwicklung und gänzlich neu auf den realen Schlaglängenverlauf analysiert. Durch lokale Fouriertransformation kann aus den Messdaten ein Frequenzspektrum berechnet und die periodisch verlaufende Schlaglänge des metallischen Seils isoliert werden. Dies gestattet die direkte Umrechnung der Schlaglänge zum Verdrehwinkel des Seils und entspricht somit einer Beziehung zu den in Pfad 1 gefundenen Lebensdauer kennwerten der verdrehten Seile.

Alle Pfade werden nach Analyse und Auswahl möglicher Methoden abschließend zu einem Gesamtmodell zusammengeführt, welches das erwartbare Schadensausmaß durch Verdrehung erstmalig für Seilbahnen berechenbar macht. Sind zudem Daten aus dem realen Einsatz der Anlage bekannt, können nun je nach Vorhandensein von Informationen die Seillebensdauer, die verbleibende Schlaglänge oder die voraussichtliche Drehintensität rechnerisch abgeschätzt werden. Dazu gibt die Arbeit Empfehlungen zur drallmindernden Konstruktion von Seilbahnanlagen und zum Umgang mit vorgefundenen Verdrehungsproblemen.

Die Ergebnisse werden ebenso hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Seiltriebe analysiert. Dazu erfolgt eine detaillierte Vorstellung der Verdrehungsthematik für Seilbahnen im Umlaufbetrieb. Berechnungsmöglichkeiten und Empfehlungen zur Behandlung von Seildrall werden auch hier ebenfalls zur Verfügung gestellt. Die Übertragbarkeit auf allgemeine Seiltriebe wird grundsätzlich diskutiert und erste Ansätze und Bewertungen lohnenswerter weiterer Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet dargelegt. Die bestehende Literatur zum Thema Seildrehmoment und Seilverdrehung wird für dieses Aufgabengebiet sortiert aufbereitet.

Die Arbeit soll möglichst als Grundlage für weitere Arbeiten im Bereich von Seildrehungen und Schäden aus Verdrehung Verwendung finden. Grundsätzlich konnte bewiesen werden, dass das Phänomen Seildrall physikalischen Gesetzmäßigkeiten folgt und kaum von zufälligen Ereignissen geprägt wird, so dass ähnliche Untersuchungen z.B. an Schachtförderanlagen, Aufzügen oder Kranen oder zukünftig für hochfeste industrielle Faserseile als erfolgversprechend eingestuft werden können.

Abstract

Introduction

In every setup of rope drive, the running rope rotates around its axis due to load changes and dynamics as well as by mechanical contact to sheaves, rollers and drums or static guiding elements (Engel 1966). Assuming an ideal line setup without fleet angle, this rotation is created both by the spring-like wire- and strand-layout of the rope, leading to inner torque under load, and by the screw-like surface shape of at least classic stranded ropes. Depending on the arrangement of rope driving- and guiding elements in an individual installation, this rotation can be massaged through the rope and stored at discrete sections, leading to rope twist which causes a local change of the original lay length (Engel 1994). A deviation of lay length can lead to inner touching of the strands which can increase the damage development of the rope severely (Briem 1995). Rope twist is differentiated between a de-twisted rope to an increased lay length by negative specific twist angle “ $-\omega$ ” and closing twist which leads to a reduced lay length, specified by a positive twist angle “ $+\omega$ ” (Ernst 2012; Weber 2013). Figure 1 shows different states of twist illustrated by a soft hand model.

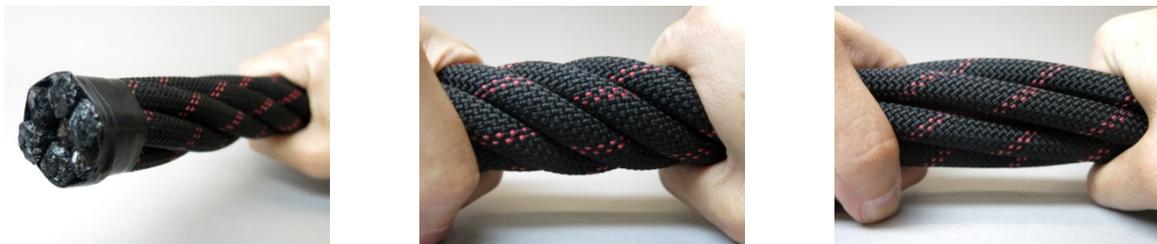


Figure 1: Hand model showing nominal lay length (left), closing twist “ $+\omega$ ” (middle) and de-twisting “ $-\omega$ ” (right)

Up to now, some parameters have been investigated to predict the lifetime of specific ropes designs in twisted state, but still there are rope constructions which have not been in focus of research yet. Furthermore, it is not known at all how much rotation is created by specific rope drive elements, how much twist will be stored in summary and how much lifetime reduction has to be expected. After successful trials using a new digital rotation sensor (Wehking et al. 2013), a publicly funded project was launched¹, consisting of three focal points, which are illustrated by figure 2. The investigated ropes are mainly running ropes of ropeways which allow access to big scale rope drives and their related rotation behavior. Later on, methods of transferring the results to general rope drives are discussed and approaches are given.

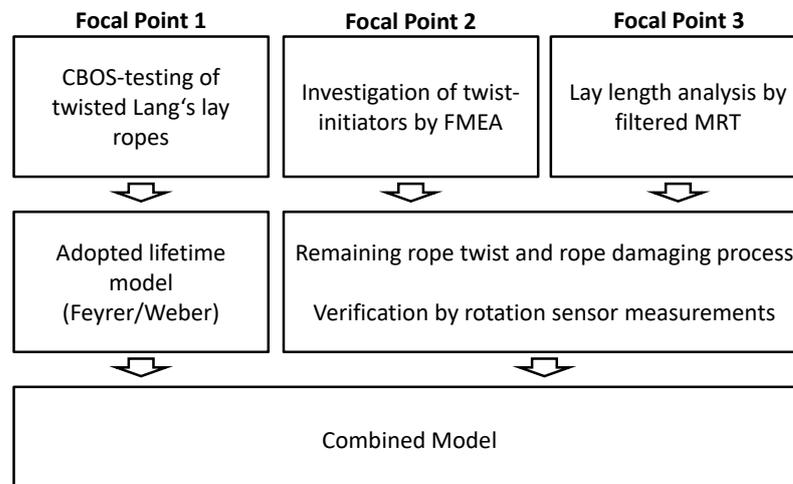


Figure 2: Illustration of research project structure investigating the chain from rotation over stored twist to expectable lifetime reduction of a running (ropeway) ropes

¹ German Research Foundation „DFG“, project no. WE 2187/33-1

CBOS-Testing of twisted Lang’s lay ropes and lifetime calculation

Within the project, two CBOS²-test series at different load levels were carried out to enlarge the database of (Weber 2013) to the rope-designs of Lang’s lay ropes with fiber core. The rope samples are twisted to a defined level referred to a reference length of 100 times rope diameter. By performing repetitive tests at each twist angle level, the values can be approximated by regression to a compensating curve. The diagram in figure 3 shows the results for bending tests at a diameter-ratio of sheave-diameter to rope diameter of $D/d=20$ and a diameter-related rope tension of $S/d^2=100 \text{ N/mm}^2$. The rope used in the tests was of the type 15 6x19S-FC 1960 B zZ. The continuous best-fit curve relates to the achieved bending cycles N until rope failure, the dashed one shows the approximated average point of discard NA^3 by visual inspection.

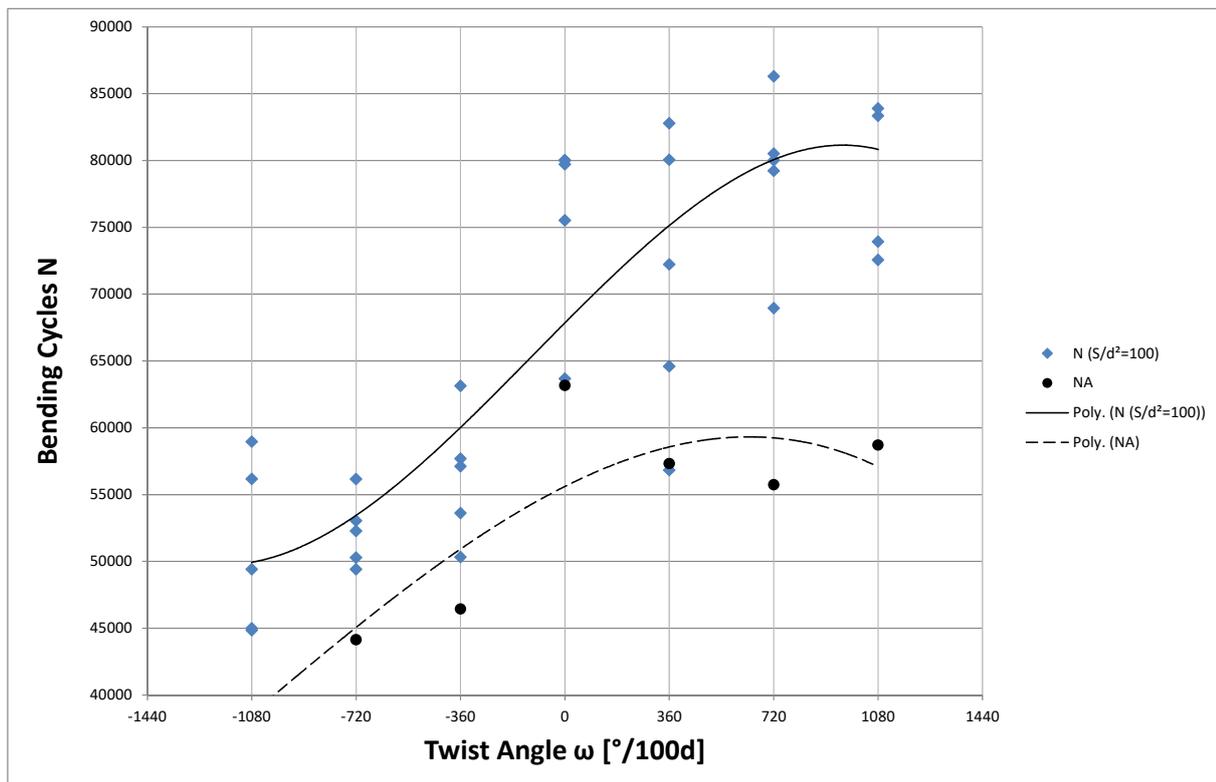


Figure 3: Bending test results at $D/d=20$, $S/d^2=100 \text{ N/mm}^2$

The results show clearly, that in de-twisted state respectively at a long lay length, the rope lifetime until break is massively reduced while at closing twist, the rope lifetime increases slightly or stays constant. This can be explained first by the amount of strands touching a sheave and the resulting pressure distribution in relation to the actual lay length of a rope. Second, the rope compound is weakened against transverse forces as the wire tension is reduced at decreasing lay angles. This is enlarging the tendency of the rope to ovalize which leads to an increased damage behaviour. Even stronger, the time slot between visible discard maturity and total rope failure is reduced by negative twist angles displayed in the diagram. To investigate the inner damage caused by a de-twisted lay length, a suitable bending test setup was stopped in advance of its expected failure to open it into strands and carry out a microscopic analysis. The strands show inner abrasion at their touching zones and incipient cracks leading to inner wire breaks.

This behavior is directly related to a reduced safety level as de-twisted Lang’s lay ropes develop more increased inner damage level than their outer appearance may indicate. Even

² Continuous bending over sheaves

³ Abbreviation „A“ for german „Ablegereife“, meaning discard maturity

under magneto-inductive supervision at usually 3 year intervals (Norm DIN EN 12927-7), intermediate visual inspections may lead to euphemized evaluations.

To fit to the large diameter ratios of ropeways which have to be minimum $D/d=80$, the polynomial structure of (Weber 2013) was modified to a final formula (1) fulfilling the recommendations about standard deviation and coefficient of determination.

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

$$+ b_0 \cdot \left(\frac{\omega}{\frac{Sd_0^2}{d^2S_0}} \right) + b_1 \cdot \left(\frac{\omega}{\frac{Sd_0^2}{d^2S_0}} \right)^2 + b_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\frac{Sd_0^2}{d^2S_0}} \right)^3$$

N_{ω}	gainable bending cycles in twisted state
D	sheave diameter [mm]
d	rope diameter [mm]
S	rope force [N]
a_i, b_i & f_i	factors for rope lifetime calculation
ω	twist angle [rad/100*d]
R_0	rope nominal strength [N/mm ²]
S_0, d_0	auxiliary factors for clearing dimensions of "S/d"

The final factors b_0 to b_2 for calculating the point of discard, indicated by (A), and rope breakage are given in the following table 1.

Constant factors	b0 (A)	b1 (A)	b2 (A)
discard	0.8022	-2.5351	-6.1300
Constant factors	b0	b1	b2
rope breakage	0.8018	-1.7440	-9.4568

Table 1: Constant factors calculated by the test results for rope type 6x19S-FC zZ referring to discard (A) and breakage

Investigation of potential Twist-Initiators by FMEA

The method of FMEA⁴ is well-approved in the industrial environment to avoid planning, concept and design failures at prototype stage of new developments (Eberhardt 2013). The method consists of several main steps:

- Step 1: Structural analysis
- Step 2: Functional analysis / Failure analysis
- Step 3: Risk evaluation
- Step 4: Measures of Improvement

Although the analysis of rope twist is not a product development process, the method provides valuable features to capture the complex system of a ropeway installation, combining structural analysis with the knowledge of both experts and open-minded participants with technical understanding.

After the structural analysis of step 1 of the FMEA, illustrating all mechanical elements of a ropeway installation which are directly linked to rope forces, friction and related rotation and twist, in step 2, functions and potential failures are listed and linked to every structural element in function- and failure-nets. To every failure, three characteristics – severity, probability & detection – are evaluated by a scoring system to classify its individual risk level,

⁴ Failure Mode and Effekt Analysis

forming a final “risk priority number”, shortly called RPN. Following the failure net, it is possible to identify the main failures which lead to the heaviest impact. Therefore, usually a subsequent Pareto-analysis, also known as the 80-20-rule, is performed to determine the minority of failures which cause the majority of effects. Table 2 shows the final 14 elements which lead to rope twist according to the result of the FMEA on twist in ropeway installations.

No.	Failure description	RPN	Related Structural Element	Superior Structural Element
01	Difference in load level by rope weight (height stresses)	1000	Rope	
02	Change in rope force by running direction up-/downhill	1000	Car	
03	Loss by elastic deformation	1000	Roller Lining	Station
04	Loss by elastic deformation	1000	Sheave Lining	Station
05	Change of rope force by traction drive	1000	Drive	Station
06	Change of rope force by acceleration / deceleration	1000	Drive	Station
07	Frictional loss at roller (insufficient amount of rollers)	1000	Station	
08	Frictional loss at roller	1000	Roller Lining	Tower
09	Frictional loss at roller	1000	Roller Lining	Slack Hanger
10	Insufficient Lubrication	640	Rope	
11	Low Modulus of Elasticity (rope appears “soft”)	560	Rope	
12	Radial run-out	560	Sheave	Station
13	Slack / soft to twist	500	Rope	
14	High normal force	400	Tower	

Table 2: Main elements leading to rope twist according to the result of the FMEA

For every determined type of influencing element a mechanical and/or mathematical background is established to allow either a calculation of the resulting rope torque caused by the individual element or to at least quantify the severity of its influence in relation to the acting boundary parameters. The analysis finally allows pre-calculating an expectable rope torque in the ropeway installation. As most of the twist factors are influenced by only a few parameters like the geometrical line of the ropeway, location of drive and tensioning elements, the cabin size or the rope design and diameter, the analysis can be automated using a simplified master data sheet and e.g. Microsoft Excel as processing software, which can be easily filled out by planners, developers or operators.

The rotation measurement on hauling and counter ropes of 25 ropeway systems of the type “jigback” aerial tramway was carried out (see Figure 4). The measurements are used to validate both assumptions and theoretical analysis as well as to complement the physical backgrounds of rope rotation.



Figure 4: Digital rotation measurements at jigback aerial tramways

The database of measurements allows first general statements on the rotation behaviour of hauling ropes:

- The rotational behavior of the hauling ropes is reproducible. By carrying out measurements repeatedly in the same set-ups, it could be proved that rope rotation is a physical process rarely influenced by accidental impacts.
- Similar line setups show similar rotational behavior. Comparing several measurements, similar geometrical arrangements of different ropeway installations generate similar curve shapes. The amount of rotation may vary over the height and length of the installation, but the curve shapes are basically the same.
- Ropes show the same rotational behavior under similar boundary conditions. By measuring two parallel hauling ropes in the same ropeway system at the same time, it could be proved that these ropes rotate parallel in the same way and amount.
- Tower rollers create both a twist barrier and rope torque. Following the measurement charts, most ropes show a characteristic rotation gradient linked to the passage of both car and sensor passing a tower. The rope rotates following height stresses and twist compensation between the field spans at these points. A sketch in Figure 5 explains the rope rotation behavior above the car within a downhill ride for a right hand laid rope.

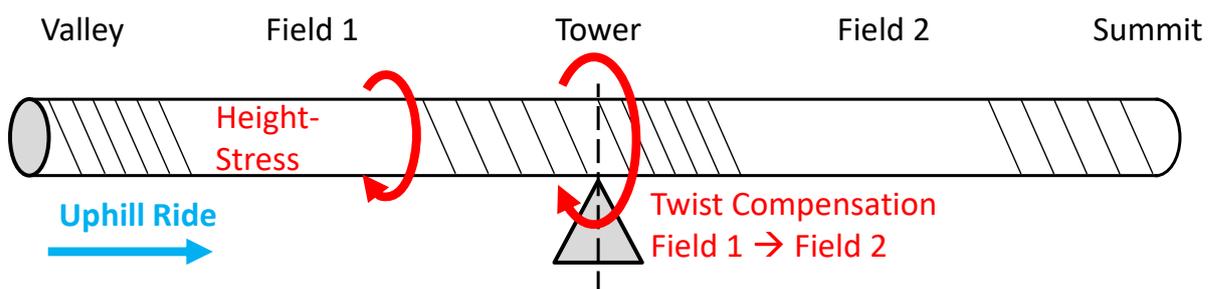


Figure 5: Rope rotation behavior above the car within a downhill ride for a right hand laid rope

The amount of rotation, twist storage and twist release is directly linked to the field geometry, the roller pressure and friction loss due to rubber linings on the towers. The final model combines the severity of influencing factors and their impact to the observed rope rotation, residual change of lay length and finally to the loss of effective rope lifetime.

To get an impression of typical amounts of rope rotation within one ride of a single track rope system, the following table 3 gives extreme and average values.

1 track rope without slack hangers	Upper hauling rope Uphill ride	Upper hauling rope Downhill ride
Minimum gradient [U/100m]	-0.36	0.08
Average gradient [U/100m]	-0.12	0.44
Maximum gradient [U/100m]	0.20	1.08
Absolute Rotations min [U]	-8.00	-7.00
Absolute Rotations Aver. [U]	-1.00	3.64
Absolute Rotations max [U]	9.00	11.00
1 track rope without slack hangers	Lower hauling rope Uphill ride	Lower hauling rope Downhill ride
Minimum gradient [U/100m]	-1.92	-0.31
Average gradient [U/100m]	-0.75	0.14
Maximum gradient [U/100m]	-0.06	1.06
Absolute Rotations min [U]	-12.00	-9.00
Absolute Rotations Aver. [U]	-4.92	-4.00
Absolute Rotations max [U]	9.00	3.00

Table 3: Average and extreme values of rope rotation of jigback tramways with single track ropes (positive: closing twist, negative: de-twisting)

Lay length analysis of filtered magneto-inductive rope-tests

At a first glance, the ground signal of an MRT appears to contain no useful information. For this reason it is sometimes misleadingly called ground “noise” instead of “signal” as a much better expression. Any damage signal like e.g. wire breaks or lightning strokes peak out of the signal basis as a characteristic signal which has to be interpreted by the inspector in charge (Pernot et al. 2016). Invisible to the human eye are those periodic frequencies of the strand and rope lay length, which are also carried by the ground signal (Widmann 2013). By local Fourier transformation in sections of the measurement, it is possible to display a lay length chart over the whole rope length at the measuring point – which is in general directly at the station, close to sheaves and drive pulleys reducing the ropes residual life time by every bending cycle.

Carrying out local Fourier analysis creates some problems which have to be solved by additional tools. E.g. the edges of each frame of local analysis cause discontinuities which can be suppressed by a so-called Hamming-window, which allows fading out the intensity of the perturbing border area. In the final evaluation model, the deviation of lay length can be directly related to the twist angle and thus the resulting lifetime (reduction) of the bending tests. For this purpose, equation (2) is used describing the lay angle β' in twisted state given by (Ernst 2012):

$$\tan \beta' = \frac{\tan \beta - R\omega}{1 + \varepsilon_D} \tag{2}$$

- β' lay angle of the twisted rope [rad]
- R pitch radius of the strands [mm]
- ω length related twist angle [rad/mm]
- ε_D wire elongation

The equation is slightly modified by neglecting the wire elongation ε_D and substituting the twisted lay angle for the change of lay length in twisted state, see equation (3).

$$\omega = \frac{\tan \beta}{R} \cdot \left(1 - \frac{L_L}{L_L'}\right) \tag{3}$$

L_L nominal lay length [mm]
 L_L' lay length in twisted state [mm]

The formula could be proved by the experimental results comparing applied twist angle and resulting lay length in the bending tests. Doing this, the first focal points of the project are successfully joined. It is now possible to relate the expectable lifetime to the measured lay length at the twisted portions of the rope.

Following, typical shapes of lay length charts of upper and lower hauling ropes are given in figure 6. In general, upper hauling ropes show a convex lay length shape, de-twisting in their middle sections and closing at the edges. Instead, lower hauling ropes show a concave lay length chart with closing twist in the middle sections and de-twisting at their edges.

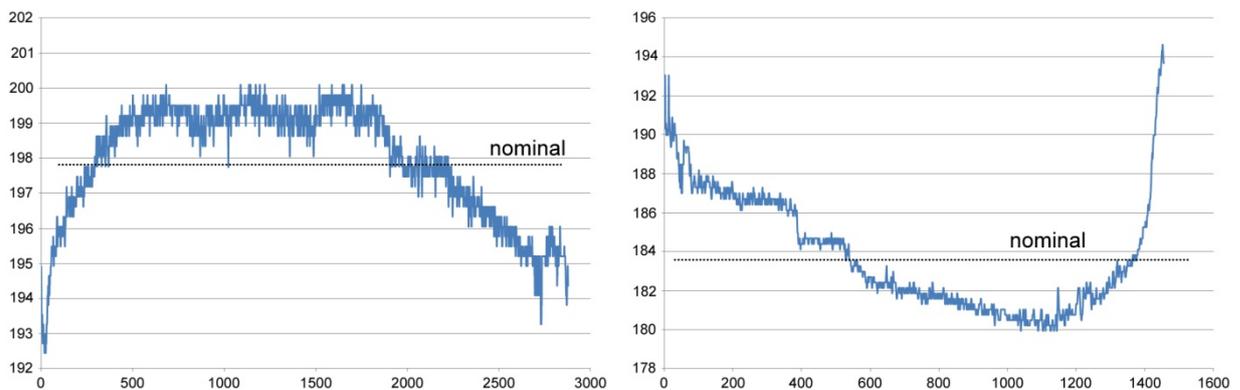


Figure 6: Typical shapes of lay length charts of upper (left) and lower hauling ropes (right)
 (x-axis: rope distance [m], y-axis: lay length [mm])

The range of calculated twist angles based on the lay length extracted of the MRT-measurements is given in table 4.

	Upper hauling ropes, edge	Upper hauling rope, middle section
Minimum twist angle [°/100d]		-162.2
Average twist angle [°/100d]	92.9	-72.0
Maximum twist angle [°/100d]	312.8	
	Lower hauling ropes, edge	Lower hauling rope, middle section
Minimum twist angle [°/100d]	-487.7	
Average twist angle [°/100d]	-231.0	83.7
Maximum twist angle [°/100d]		151.0

Table 4: Range of calculated twist angles in middle sections and at edges
 (positive: closing twist, negative: de-twisting)

Combined Model

The identified, analysed and developed influencing factors are set into relation within a combined model. At first, different possible methods are analysed and tested for efficiency and suitability:

- Rating following VDI 2225 (Feldhusen und Grote 2013; Richtlinie VDI 2225-3)
- Polynomial of similar structure to lifetime formula by Feyrer (Feyrer 2000)

- Linear damage hypothesis of Palmgren-Miner (Palmgren 1924)
- (Economical) decision theories of e.g. Hurwicz or Savage-Niehans (Bamberg et al. 2012)

By evaluating the methods referring to specially raised criteria like traceability, flexibility and functionality of the final model, a joined formula of both technical rating and damage hypothesis of Palmgren-Miner was developed. The formula for the reference reduction level Φ_{ref} caused by twist is expressed as follows, using the backgrounds of these factors developed within the FMEA:

- No.01: diameter related height force S_H/d^2
- No.02: diameter related friction force S_R/d^2 caused by change of travelling direction
- No.05: diameter related traction drive force S_U/d^2
- No.08: diameter related torque caused by tower friction M_{ST}/d
- No.09: diameter related torque caused by slack hanger friction M_{SR}/d .

$$\Phi_{ref} = \frac{\frac{S_{H,j}}{d_j^2} \cdot f_{01} + \frac{S_{R,j}}{d_j^2} \cdot f_{02} + \frac{S_{U,j}}{d_j^2} \cdot f_{05} + \frac{M_{ST,j}}{d_j} \cdot f_{08} + \frac{M_{SR,j}}{d_j} \cdot f_{09}}{\sum f_{ID,i}} \quad (5)$$

$$\frac{69,9 \frac{N}{mm^2}}{23,3 \frac{N}{mm^2}} + \frac{96,1 \frac{N}{mm^2}}{0,426 \frac{Nm}{mm}} + \frac{1,113 \frac{Nm}{mm}}{1,113 \frac{Nm}{mm}}$$

For validation, the equation is linked to the actual normalized states of twisted lay length, residual rope lifetime and rotation difference between up- and downhill ride. Achieving a value of 100% means that the rope will show the maximum lifetime reduction level by twist which has been revealed in the quantity of investigated ropeway systems.

Using values of the database generated within this project, the final equation (4) for the damage level Φ_{act} of the actual side is:

$$\Phi_{act,i} = \frac{\frac{\omega_j}{-487,7^\circ/100d} \cdot 1 + \left(1 - \frac{Z_{Am,IST,j}}{Z_{Am,Fey,j}}\right) \cdot 0,5 + \frac{19 - \Delta N_{rot,B-T,j}}{42} \cdot 1}{2,5} \quad (4)$$

- Φ damage level [%]
- ω length related twist angle [°/m]
- f factor for technical rating [-]
- Z_{Am} rope life time referring to discard maturity of 50 % of the ropes [cycles]
- N turns of the rope within an up- and downhill ride cycle [U]

The necessary rating factors $f_{i,j}$ of the reference level have been separated to different sets for upper and lower hauling ropes, differentiating direct influence of and isolation against the traction drive. This was done referring to the different lay length characteristics of the four different combinations. The factors were optimized keeping whole-number values to strengthen the convenience of using the model for third parties. Also the risk of errors e.g. by mistyping is lowered by this strategy. Negative values are also permitted to allow the influencing factors a positive effect on the twist behavior as it is demanded in the literature (Engel 1977). The best fit parameter sets are given in the following table 5.

Factor $f_{i,j}$	No.01 Height force	No.02 Rope friction force	No.05 Traction drive force	No.08 Torque of tower	No.09 Torque of slack hanger
Upper hauling rope with drive	2	3	1	3	2
Upper hauling rope	1	2	0	0	-1
Lower hauling rope with drive	1	1	3	-1	1
Lower hauling rope	2	3	-2	0	1

Table 5: Parameter sets for analysing the reference level of damage Φ_{ref}

The quality of the final model can be expressed by the average deviation between calculated damage of the reference side and the actual damage developed using the data basis of existing ropeway systems. The achieved value of average deviation is -1.61 %. The referring standard deviation of this level is 16.3 %, which may appear high in mathematical terms. But for (experimental) rope research applications, deviations below 20 % can be rated as a satisfying range.

Adaptivity to other Rope Drives

Within the project, the adaptivity of the findings to other rope drives shall be evaluated. A first step is made following the rotation behavior of continuous moving gondola systems which show a free rotating closed rope loop without fixed ends – if the vehicles are taken off the rope. The theoretical rotation analysis can be adapted using a modified master data sheet. Although the rotation does not result in residual twist and thus not affect the ropes lifetime, the analysis and measurements can help to evaluate the correctness of track gauge adjustment. In addition, eliminating torque multipliers can reduce operational vibration of the system. For future research, advice is given on implementing rotation analysis in general rope drive environments, taken into concern common rope design varieties and drive setups as well as alternative materials like high modulus fibre ropes. Existing literature on torque and twist is sorted to common subjects to support future research.

Conclusions

The research project on rope rotation, residual twist and resulting lifetime reduction of ropeway ropes allows an approach to analyse a ropeway system regarding its geometrical setup and technical equipment for the first time. The results show a severe influence of rotation on the serviceable rope life time by the conducted bending tests. In addition, the field-test data of measured residual lay length and digital rope rotation measurements revealed that rotation and twist characteristics of the ropes running in rope drives are repeatable and comprehensive. The final model allows calculating the expectable damage level caused by rope twist with a high average performance and a satisfying standard deviation. With an increasing database integrating input of third party users, the models values can be refreshed continuously to fit to future developments in rope design and ropeway techniques.

In the future, the experiences made in this project can be transferred to investigation of general rope drives and their individual rotational problems.

1 Einleitung

1.1 Drahtseile

In Zentraleuropa fand im Jahre 1834 das erste Litzenseil aus Stahldrähten seinen Einsatz in einem Bergwerk bei Clausthal. Seitdem gilt Oberbergrat August Albert als der Erfinder des Drahtseils (Schatz 1987), welches mit der fortschreitenden Industrialisierung eine sprunghafte Entwicklung des seilgebundenen Material- und vorerst innerbetrieblichen Personentransports erlebte.

Obwohl Litzenseile im Drahtaufbau, dem Grad der Materialveredelung, Härtung und plastischen Formgebung vielfältige Variationen erfahren haben, sind sie in ihrem Grundaufbau stets ähnlich, wie Abbildung 1 nach (VDI-Richtlinie 2358) zeigt. Auch der Bau moderner Personenseilbahnen wurde erst durch die Weiterentwicklung des Albertseils möglich (Schmoll 1999).

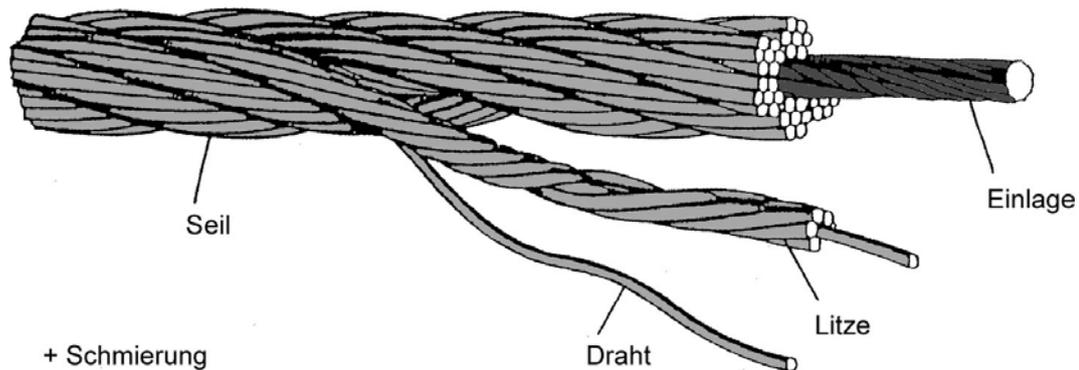


Abbildung 1: Aufbau eines Draht-Litzenseiles nach VDI 2358

Das Drahtmaterial ist in seiner ursprungsform ein vergleichsweise weicher, geringfügig kohlenstoffhaltiger Stahl ohne nennenswerte Zusätze. Seine Eigenschaften, insbesondere sein Härtegrad entstehen durch eine Kombination aus spezieller Wärmevorbehandlung, beim Seildraht „Patentieren“ genannt, und anschließender Kaltverformung in mehreren Stufen. Das fein-perlitische Gefüge des Rohdrahtes wird durch Ziehen des Drahtes, zum Beispiel durch Wolframkarbid-Ösen, in Drahtrichtung verspannt und kann somit theoretisch Festigkeiten über 4000 N/mm² erreichen (Wehking und Winter 2014). Da die Drähte jedoch noch ausreichend flexibel zur Verarbeitung und insbesondere im Betrieb sein müssen, sind in laufenden Seilen von Seilbahnen meist Drahtnennfestigkeiten im Bereich von 1860 bis 2160 N/mm² vorzufinden (Reinelt 2014; Schärli 2007).

Im Verseilprozess werden einzelne Drähte zu Litzen und anschließend in einem weiteren Durchgang mehrere Litzen zu Seilen geschlagen. Bei einem Litzenseil spricht man daher von einer zweifachen Verseilung. Um den Litzen und Seilen ihr Bestreben zu nehmen, sich selbst wieder aufdrehen zu wollen, werden diese im Verseilprozess plastisch vorgeformt, so dass sie im spannungslosen Zustand weiterhin ihre Helixform aus dem Seilverbund halten (Meebold 1959). Diese Vorformung ist ein wichtiger Bestandteil des Betriebsverhaltens eines Seils und wird zu Beginn des Fertigungsprozesses beim Einrichten der Verseilmaschine durch Messung der Ganghöhe und des Spiraldurchmessers einzeln entnommener Drahtproben überwacht.

Während in vielen Anwendungen als Einlage oder Kern des Seils wiederum Stahlseile verwendet werden, weisen Seilbahnseile in ihrem Innern gewöhnlich Faser- oder Vollkunststoffeinlagen auf, die das Seilgewicht gering halten und die Litzen trotzdem für diese Anwendung ausreichend gegen Berührung untereinander stützen können. Heute kaum noch als Einlagenmaterial genutzte Naturfasern wie Hanf oder Sisal konnten zusätzlich Schmiermittel speichern und dieses während des Betriebs sukzessive abgeben. Die (Langzeit-)Stabilität und zuverlässigere Materialbeschaffenheit moderner Kunststoffe hat die Naturfasern jedoch vom Markt verdrängt, wie Kataloge namhafter Seilhersteller belegen (Fatzer AG 2014; Redaelli spa 2013; Teufelberger GmbH 2013).

Als bewegte Seilbahnseile kommen gemäß der geltenden Norm (Norm DIN EN 12385-8) klassische Seilkonstruktionen mit 6 bis zu 8 Litzen zur Anwendung, die aufgrund ihrer Geometrie spleißbar sind⁵, einen flexiblen Lauf über (Antriebs-) Scheiben und Rollen erlauben und zudem resistent gegen mechanischen Abrieb und Korrosion sind. Wie unter anderem Seil-Abnahmeprotokolle aus der Prüfstellentätigkeit des Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart, aber auch Referenzen der Seilhersteller zeigen⁶, werden üblicher Weise rechtsgängige Gleichschlagseile der Konstruktionen 6x19 Seale, 6x25 Filler und 6x36 Warrington-Seale eingesetzt, vgl. Abbildung 2, die nicht drehsteif sind, jedoch ideale Eigenschaften für den Betrieb in Seilbahnanlagen mit gummigefütterten Seilführungselementen aufweisen. Zur besseren Ausnutzung des Querschnitts können die Litzen zudem vor dem Verseilprozess erneut durch eine Vorrichtung gezogen und somit verdichtet oder kompaktiert werden⁷, so dass sie bei gleichem Außendurchmesser einen höheren metallischen Füllungsgrad aufweisen und letztlich mehr Last übertragen können (vgl. Abbildung 3).

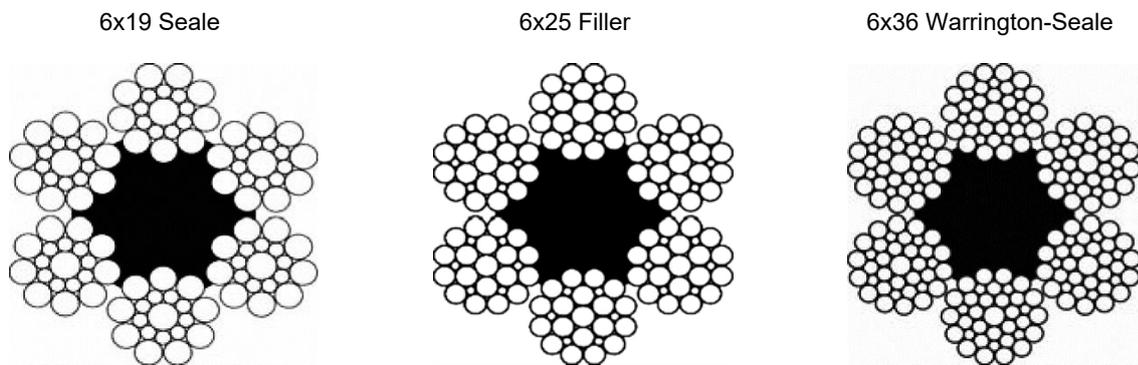


Abbildung 2: Übliche Konstruktionen von bewegten Seilbahnseilen

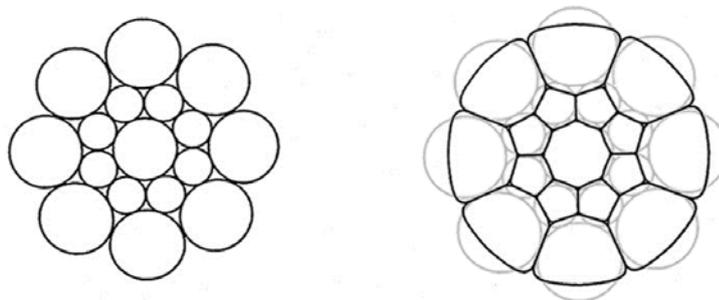


Abbildung 3: Verdichtung einer Litze

Wichtige geometrische Kenngrößen bei der Herstellung und dem Einsatz von Seilen sind der Seildurchmesser als Umkreis des Seilquerschnitts und die sogenannte Schlaglänge, welche die Ganghöhe einer Litze im Seilverband beschreibt, ähnlich der Gewindesteigung einer Schraube. Mithilfe dieser Größen lässt sich unter anderem der Abstand der Litzen

⁵ Als Spleißen wird eine Verbindungstechnik für Seile bezeichnet, bei der durch reibschlüssiges Ineinanderlegen von Litzen z.B. zwei Seilenden zu einem durchgehenden Seilstrang mit nahezu gleichem Durchmesser im Vergleich zur freien Seilstrecke geformt werden. Bei Seilbahnen wird durch Spleißen der endlose Ring geformt, der einen kontinuierlichen Umlaufbetrieb der Fahrzeuge ermöglicht (Czitary 1962).

⁶ vgl. Referenzdatenbank Fa. Fatzer AG Drahtseilwerk, Romanshorn auf <http://reference.ropes.ch/fatzer/>, abgerufen am 17.08.2015

⁷ „Kompaktierung“ bzw. „compacted“ war ursprünglich ein Markenbegriff aus der britischen Seilerbranche (vgl. Verreet 2002), dem die Bezeichnung „Verdichtung“ lange Zeit durch andere Hersteller entgegengestellt wurde, wie pensionierte Mitarbeiter des IFT berichten. Heutzutage ist „kompaktiert“ als Gattungsbegriff in der Branche eingezogen. Hersteller wie die Fatzer AG oder die Teufelberger Seil Ges.m.b.H verwenden ihn gleichermaßen.

zueinander, die sogenannte Sperrung beeinflussen, wie (Jenner 1992; Shitkow und Pospeschow 1957) im nachfolgenden Formelzusammenhang ausdrückt:

$$\Delta s_Q = 2 \cdot \Delta R_L \cdot \sin \Phi_L - \frac{d_L}{\cos \Phi_L} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta_0 + \tan^2 \Phi_L}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta_1 + \tan^2 \Phi_L}} \right) \quad (1)$$

mit s_Q Sperrung zwischen den Litzen
 R_L Windungsradius der Litze
 d_L Litzendurchmesser
 Φ_L halber Winkel zwischen zwei benachbarten Litzen am Umfang
 β_i Schlagwinkel des Seils

Da Drähte und Litzen eines Seils ähnlich einer Schraubenfeder gewunden sind, ist ein Seil gegenüber einem Stahl-Vollmaterial nicht nur elastischer unter Zugbelastung, sondern es entstehen auch ähnliche Torsionseigenschaften: ein Seil baut unter Zug ein Torsionsmoment auf, es längt und verjüngt sich und dreht sich dabei auf. Diese (lokale) Abweichung der Schlaglänge von den Nennwerten wird auch als Verdrehung bezeichnet (Verreet 1996).

Wie in Formel (1) ersichtlich, haben die durch Verdrehung des Seilkörpers veränderlichen Komponenten R_L und β_i somit direkten Einfluss auf die Sperrung und können diese bis zur Berührung mindern. Für ein laufendes Seil ist die Aufrechterhaltung der Sperrung überlebenswichtig, denn die Litzen dürfen sich selbst unter Betriebslast nicht berühren, da das Seil sonst unter Reibung und gegenseitiger Blockierung der Litzen besonders im gebogenen Zustand inhomogene Spannungsverteilung und Abrasion in der Litzengasse erfährt sowie erhöhte Querpressungen auf die Drähte entstehen (Jemlich 1985), vgl. auch Kapitel 2.2. Dieser Zustand der Litzenberührung wird in der Fachwelt auch als „totes Seil“ bezeichnet (Doppelmayr 1998). Temporär kann Litzenberührung auch während der Biegung eines Seils um Scheiben auftreten, während es erhöhten Querkräften ausgesetzt wird. Das Seil federt in radialer Richtung ein und kann somit Litzenberührung erfahren. Dieses Verhalten wird auch „Ovalisierung“ genannt (Feyrer 2000).

Durch die Existenz der Sperrung erhält das Seil jedoch die oben beschriebene Eigenschaft der torsionalen Elastizität, die in dieser Arbeit besonders behandelt werden soll: durch den lichten Abstand der Litzen zueinander wird das Seil elastischer gegen Verdrehung (Ernst 2012; Weber 2013). Es kann durch die Kombination aus Betriebsbelastung und äußeren Einflüssen in jeder Art von seilgebundener Förderanlage sogar bis zur schädlichen Litzenberührung verdreht werden, wie die nachfolgenden Kapitel darlegen.

1.2 Seilbahnen

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts tauchten Materialeilbahnen erstmals im industriellen Maßstab im Bereich des Bergbaus und der Schüttgutveredelung auf (Hötzel und Krieg 2007; Trennert 2001). Als Quasistandard etablierte sich aus dieser Zeit die Zweiseilumlaufbahn für den Materialtransport (vgl. Abbildung 4), die in großer Stückzahl auch von den deutschen Firmen Bleichert in Leipzig und Pohlig in Köln auf der ganzen Welt errichtet wurden (Bleichert 1916, 1927; Pohlig 1931; Trennert 2001).

Im ersten Weltkrieg wurden zudem Feldseilbahnen in der Wehrtechnik eingesetzt (Pohlig 1917), die dem südtiroler Personenseilbahn-Pionier Louis Zuegg vorerst als Erfahrungsgrundlage zur experimentellen Entwicklung dienten, um anschließend die rechnerische Auslegung der schlanken Seillinien moderner Seilschwebbahnen zu entwickeln (Staffler und Innerhofer 1996). Mit dem Wiederaufleben des Fremdenverkehrs in den 20er Jahren entstanden auch im deutschen Alpenraum kühne touristische Pendelbahnen nach dem inzwischen kombinierten System Bleichert-Zuegg (Kubanda 2003), zum Beispiel die Kreuzeckbahn in Garmisch-Partenkirchen oder die Predigtstuhlbahn in Bad Reichenhall (vgl. Abbildung 5).

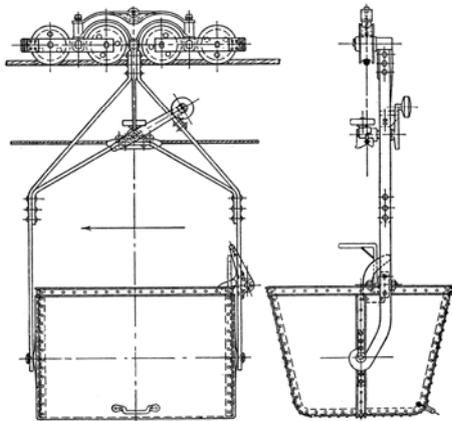


Abbildung 4: Zweiseilumlaufbahn für Materialtransport, System Pohlig (Stephan 1921)

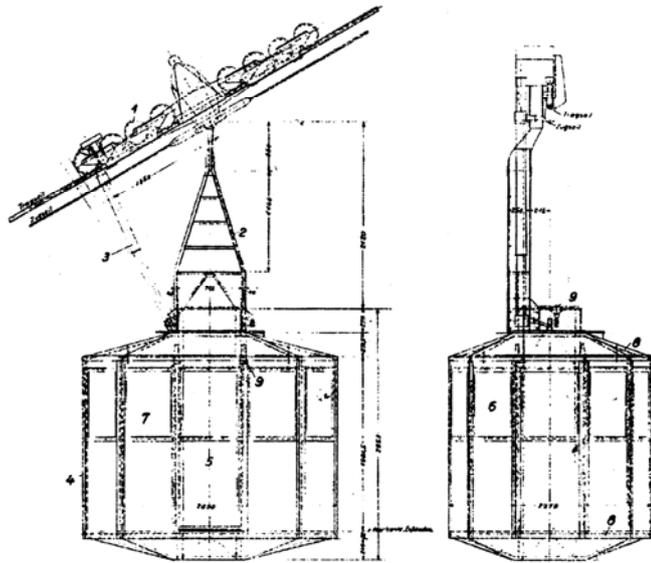


Abbildung 5: Pavillonkabine und Laufwerk der Predigtstuhlbahn, Baujahr 1927 (Lang 2003)

Seit dem touristischen Wiederaufschwung der 1960er Jahre entstanden standardisierte Anlagen zum Massentransport, deren Kapazität, Fahrgeschwindigkeit und Verfügbarkeit bis heute stetig optimiert wurden (Vorarlberger Illwerke AG 1996). Durch den Klimawandel und die letztlich auch touristischen Krisenjahre alarmiert, drängen die Hersteller in jüngster Zeit von ihrem Kernmarkt, den alpinen Wintersportbahnen, in den Bereich der urbanen Verkehrslösungen (Drißner 2003; Gleich 2011; Seeber 2010). Dies bedeutet gegenüber saisonal betriebenen Sportbahnen höchste Anforderungen an Betriebsdauer, Verfügbarkeit und Wartungsarmut (Kehse 2013). Nach erfolgreichen Projekten in südamerikanischen Megacities (Koch 2011) erscheinen auch in Deutschland schleichend urbane Systeme (Häusser 2016; Wehking und Moll 2015). Auch wenn vorerst nur Anlagen bei Freiluft-Ausstellungen wie Bundes- oder Landesgartenschauen (Bender 2015) und kurze Verbindungen an Flughäfen realisiert werden (Seeber 2010), finden sich in den Medien mehr und mehr ernsthafte Diskussionen über Lösungen in gewöhnlichen urbanen Strukturen zur Entlastung oder Erweiterung von Bus- und Stadtbahnverbindungen, insbesondere bei der Anbindung von zuverlässig vielfrequenzierten Universitäten (Bosse 2016; Hoppe 2014), denkmalgeschützten Altstädten (Rau 2013) oder anderen exponiert gelegenen touristischen Attraktionen wie zum Beispiel zoologische Gärten (Kälin 2013).

Als relevante Systeme sollen hier zum einen sogenannte kuppelbare Einseilumlaufbahnen erwähnt werden, bei denen ein einziges, endlos umlaufendes Förderseil die Fahrzeuge trägt und bewegt, während letztere in den Stationen vollautomatisch vom Seil gelöst und verzögert werden können, um eine Ent- und Beladung zu ermöglichen. Anschließend werden die Fahrzeuge wieder beschleunigt, mit dem Seil synchronisiert und am Ende des Stationsumlaufs aufgekuppelt. Diese Systeme zeichnen sich durch einen hohen Anteil wirtschaftlich kombinierbarer Modulkomponenten und verhältnismäßig niedrigen Investitionskosten aus, nach (Monheim et al. 2010) liegt der Kilometerpreis von städtischen Seilbahnanlagen je nach System bei 6 bis 15 Millionen Euro. Zum anderen werden bei urbanen Hochleistungsanlagen verstärkt wieder jene Systeme eingesetzt, bei denen das Ziehen der Fahrzeuge von einem separaten Zugseil übernommen wird, während die Fahrzeuge selbst auf Tragseilen oder Schienen entlangrollen, wie Abbildung 6 einer modernen Zweiseilpendelbahn mit Doppeltragseilen zeigt.

Neben pendelnden Systemen existieren auch Umlaufbahnen nach diesem Prinzip, sogenannte 2S-Bahnen mit einem Tragseil oder 3S-Bahnen mit Doppeltragseilen, vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8. Diese Aufteilung von Tragen und Ziehen schafft Energieeffizienz, da die Rollwiderstände des Systems niedriger sind (Stephan 1921).

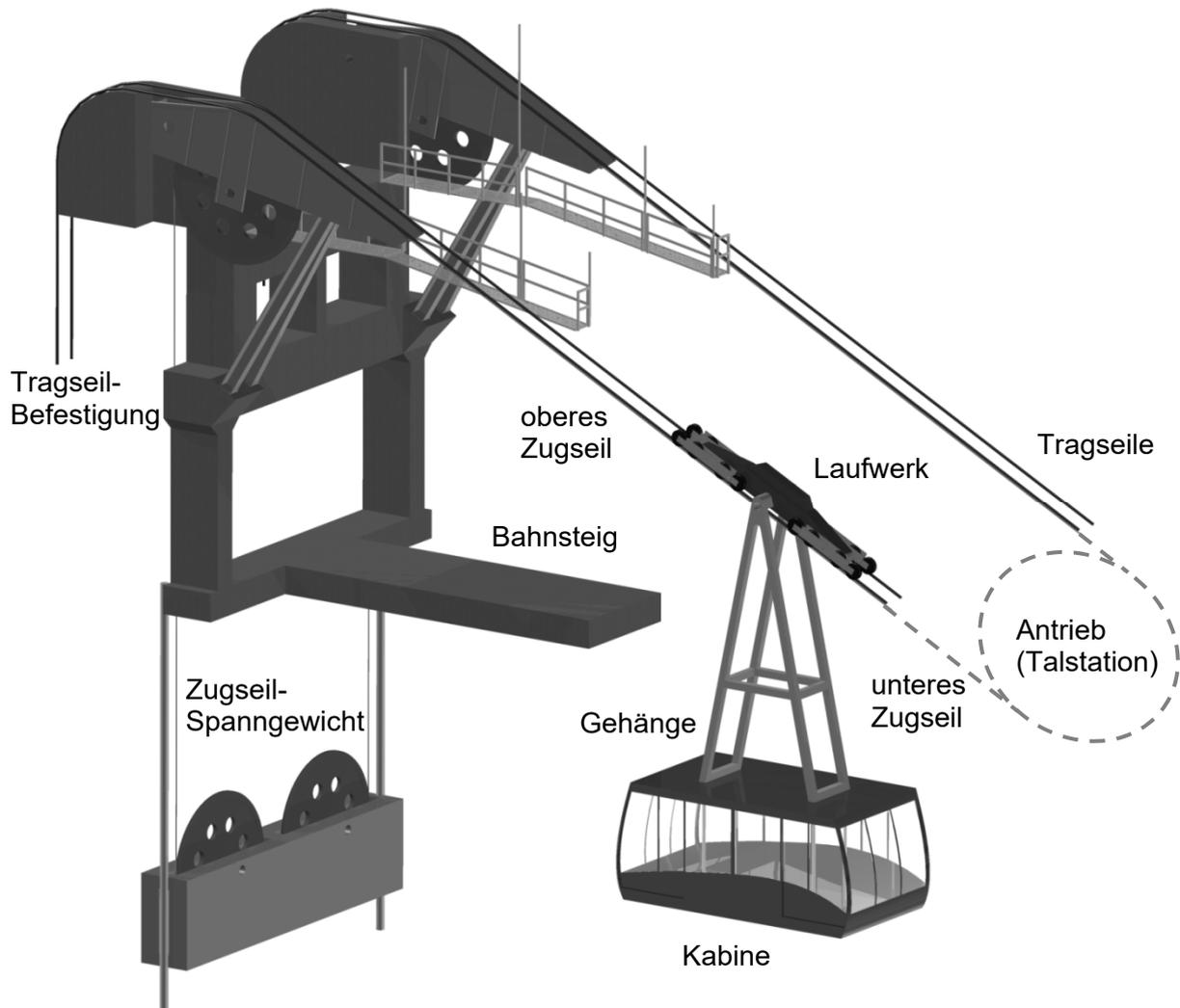


Abbildung 6: Gegenstation und Fahrzeug einer Zweiseilpendelbahn mit Doppeltragseilen (Kühner 2009)

Zudem werden die Anlagen durch die Verwendung mehrerer Seile windstabil (Monheim et al. 2010) und erlauben größere Distanzen bis zum nächsten Stützenbauwerk. Durch die langen Abstände wird jedoch der Umstand begünstigt, dass sich die biegsamen Seile durch sowohl grundlegende physikalische als auch externe Einflüsse innerhalb des Systems verdrehen. Dies erfolgt zum Nachteil bezüglich ihrer Laufeigenschaften und Lebensdauer, wie im nachfolgenden Kapitel erläutert wird.



Abbildung 7: Zweiseilumlaufbahn (2S) Ngong Ping 360 in Hongkong, Leitner AG, Baujahr 2006



Abbildung 8: Dreiseilumlaufbahn (3S) Rheinseilbahn in Koblenz, Doppelmayr GmbH, Baujahr 2010

2 Problemstellung, Zielsetzung und Abgrenzung

2.1 Seildrehung und Verdrehung

Gemäß DIN EN 1907, § 4.3.5 ist der Seildrall wie folgt definiert:

Seildrall –Torsionsmoment, das im gespannten Seil auftritt. (Norm DIN EN 1907)

Der Seildrall führt zunächst einmal zu einem Drehbestreben des Seils. In Förderanlagen mit vergleichsweise kurzen Scheibenabständen, wie zum Beispiel bei Kranen oder Aufzügen, können zusätzlich vielzählige konstruktive Umstände wie Schrägzug oder Trommelbewicklung Seildrehung begünstigen. Im Fall von Seilbahnen sind Litzenseile jedoch durch große Spannweiten von mehreren hundert Metern und großen Höhenunterschieden zwischen den Auflagepunkten anderen, deutlicher differenzierbaren Betriebsbedingungen unterworfen. Seilbahnseile haben zwangsläufig das Bedürfnis, sich um ihre eigene Achse zu drehen. Nach (Engel 1994; Oplatka 2004) existieren hier für den „Drall“, das Drehbestreben der zugbelasteten Seile, folgende Gründe:

- Die Machart, der konstruktive Aufbau und das daraus unter Last resultierende innere Drehmoment M_t des Seils

$$M_t = \mu \cdot S \quad (2)$$

mit

μ [m] - Verdrehungskonstante des Seils (Engel 1994)

S [kN] - Zugbelastung des Seils

- Das Seil dreht durch die wachsende Höhenspannung S_h während der Fahrt zu Berg. Ein herabhängendes bzw. geneigtes Seil erfährt durch sein Eigengewicht einen Spannungszuwachs, je mehr man sich dem oberen Aufhängepunkt nähert. Dieser Effekt wird „Höhenspannung“ genannt. Gleichzeitig mit der Höhenspannung des Seils steigt das innere Moment des Seils, es längt und verdreht sich.

$$\Delta S_h = \Delta h \cdot q \quad (3)$$

mit

ΔS_h [kN] - Seilkraftänderung durch Höhenunterschied

Δh [m] - Höhenunterschied in einem Abschnitt des Seilfeldes

q [kN/m] - spezifisches Längengewicht des Seils

Dadurch wächst das Drehmoment mit wachsender Höhenspannung gemäß (2) und (3):

$$\Delta M_t = \mu \cdot \Delta S_h = \mu \cdot \Delta h \cdot q \quad (4)$$

- Die Drehung und der „Drallstau“ (Engel 1994) des schraubenförmigen Litzenseils, während es mit leichten Reibungsverlusten – mitunter auch nicht ganz sauber fluchtend – in die mit Gummi gefütterten Rollen einläuft.
- Auch wenn dies im Betrieb nicht relevant ist, kann jedoch die Durchführung der Montage (Oplatka 2004), der Abspulmechanismus sowie die Seilführung und Seilsicherung, z.B. bei Verwendung von Knebeln, während des Einziehens einen Einfluss auf die Seildrehung haben.

Eine grundsätzliche Drehung des Seils ist durch die physikalischen Gegebenheiten somit unvermeidbar. Drehung kann in einen beliebigen Seilabschnitt oder bis zu einer mechanischen Endbefestigung eines Seils hin gewalkt werden, so dass hier eine bleibende

Verdrehung entsteht und die geometrischen Parameter des Seils nachteilig verändert werden. Beispiele für einen festen Punkt können eine Fahrzeugklemme bei Einseilumlaufbahnen oder besonders die Endbefestigung eines Zugseils am Fahrzeug einer Pendelbahn sein. Insbesondere die Schlaglänge des Seils – die Ganghöhe der Schraubenlinie der Litzen – ist ein direkter Indikator für Verdrehung, da sie sich unter dieser Einwirkung verkürzt oder verlängert.

Dies hat unmittelbaren Einfluss auf die Seillebensdauer, da die Charakteristika des Seils durch Verdrehung geändert werden. Der Fortschritt der Seilermüdung nimmt zudem grundsätzlich einen exponentiellen Verlauf an (Müller 1966), ob ein Seil ideal belastet wird oder durch externe Einflüsse besonders gefordert wird – der Progress der Ermüdung wird in diesem Fall lediglich steiler. Die sogenannte Ablegereife⁸ (Norm DIN EN 12927-2) kann bei verdrehten Seilen somit unerwartet schnell erreicht sein. Dieser Zusammenhang zwischen Drehung, Verdrehung und Seilschädigung soll vorerst für Seilbahnen als neuartiger Ansatz erstmalig in vorliegender Arbeit untersucht werden.

Das nachfolgende Kapitel 2.2 gibt einen Überblick relevanter Schadensmechanismen von Drahtseilen und differenziert daraus die durch Seildrehung verursachten Schäden.

2.2 Seilschädigung durch Verdrehung

Drahtseile erfahren durch eine Vielzahl an Einflussparametern eine Schädigung, die sich im Endstadium gewöhnlich in Form von Abrieb des Drahtmaterials und letztlich Drahtbrüchen darstellt.

Abbildung 9 zeigt eine Übersicht wichtiger seilunabhängiger und seilabhängiger sowie innerer und äußerer Einflussparameter auf die Lebensdauer von Seilbahnseilen. Zudem wird eine erste Zuordnung gezeigt, welche Einflüsse mit dem Verdrehzustand des Seils in Verbindung stehen. Die systematische Behandlung dieses Ansatzes folgt in Kapitel 5.1.

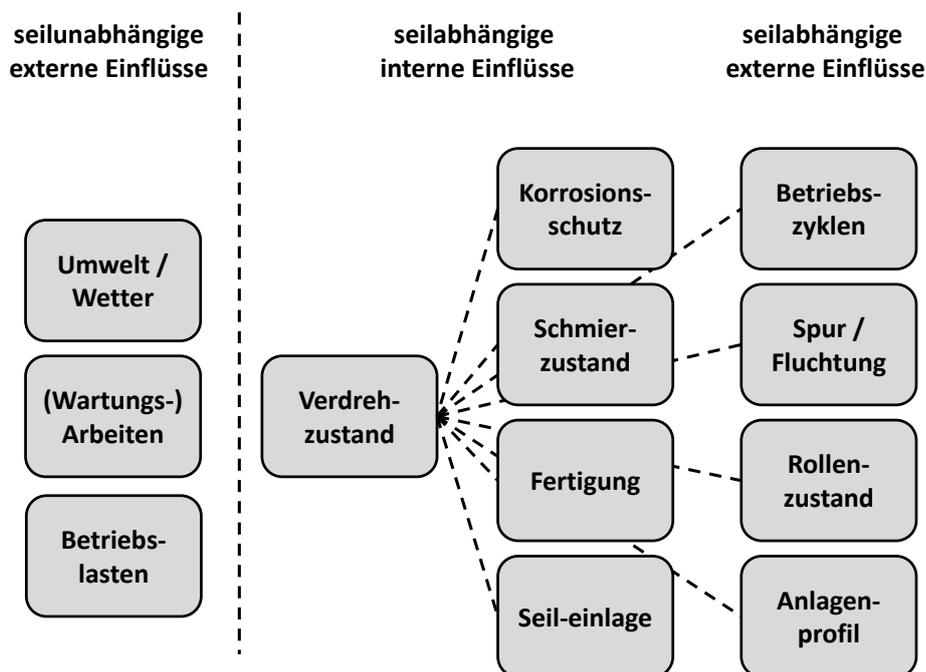


Abbildung 9: Wichtige Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Seilbahnseilen

Sämtliche Faktoren, die einen Einfluss auf die Seilzugspannung, äußere angreifende (Quer-) Kräfte sowie die Elastizität oder Steifigkeit des Seils haben, wirken sich direkt oder indirekt auf das Drehverhalten des Seils sowie seine Tendenz, sich zu verdrehen und diese

⁸ Zustand, bei dem gerade och ein sicherer Betrieb möglich ist und ein kurzfristiger Schadensfortschritt mit eventueller Beeinträchtigung der Betriebssicherheit zu erwarten ist, vgl. Absatz 6.1.

Verdrehung zu speichern, aus. Durch den verdrehten Zustand erfährt das Gleichschlagseil bei flächendeckender Litzenberührung oder durch Ovalisierung Abrieb am Drahtmaterial in der Litzengasse sowie erhöhte Querpressungen zwischen den Drähten, wodurch beschleunigt Drahtbrüche entstehen können.

Üblicherweise wird ein Seiltrieb in Bezug auf die erwartbare Lebensdauer des eingesetzten Seils dahingehend untersucht, welcher Seilabschnitt die meisten Biegungen über Scheiben unter hohen Betriebslasten erfährt (Norm DIN 15020 Blatt 1; Norm ISO 4309). In industriellen Anwendungen wie z.B. Regalbediengeräten stimmen die in den Diagrammen der magnetinduktiven Seilprüfung⁹ dargestellten Schadensentwicklungen meist gut mit der ermittelten meistbelasteten Seilzone überein (vgl. Abbildung 10). Der Bereich mit vielen Ausschlägen steht für Verschleiß und die Ansammlung von Drahtbrüchen in dem Seilabschnitt, der unter Last häufig um Scheiben gebogen wird und somit Schädigung akkumuliert. Seilabschnitte, die in der Anlage aufgrund der Länge des Fahrwegs z.B. nur wenige Scheiben passieren, liegen in ihrer Schadensentwicklung im Vergleich weiter zurück, wie es der linke und rechte Rand der Messung in der Abbildung zeigt.

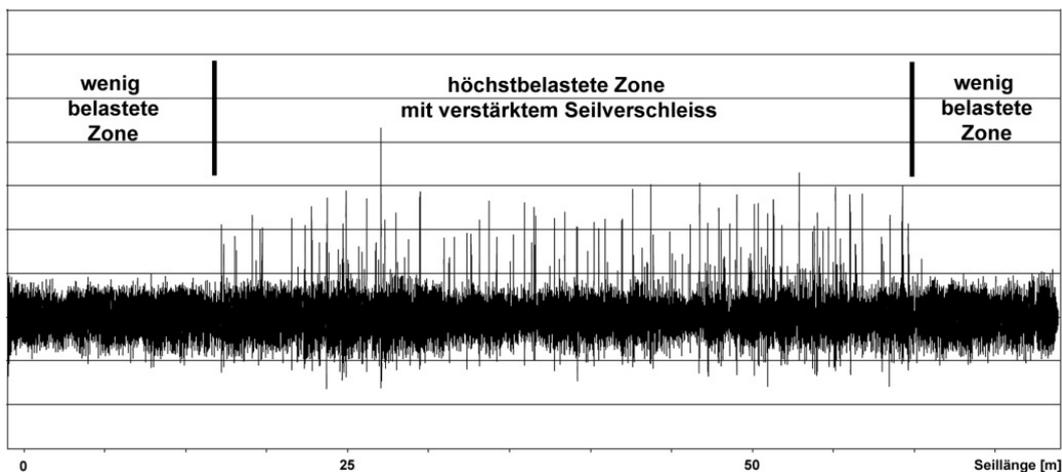


Abbildung 10: Magnetinduktives Prüfdiagramm des Hubseils eines Regalbediengerätes mit deutlich erkennbaren Belastungszonen

Seilbahnseile hingegen werden meist in verschiedenen Abschnitten unterschiedlich stark geschädigt, ohne dass man dies auf die Belastung des Seils aus der Geometrie oder der Scheibenanordnung der Anlage übertragen könnte (vgl. Abbildung 11). In der hier dargestellten Messung eines Seilbahnseils haben alle Seilabschnitte die gleiche Anzahl Scheiben passiert, die Schädigungszonen folgen jedoch nicht dieser relativ gleichmäßigen Belastungshistorie. Stattdessen sind Zonen mit deutlich unterschiedlichem Schädigungsfortschritt auszumachen. Der Lebensdauerverlust dieser Seilabschnitte mit fortgeschrittenem Schädigungsstadium ist gegenüber den nicht geschädigten Bereichen nach bisherigem Stand der Technik nicht untersucht worden und somit nicht quantifizierbar.

Die oben beschriebene ungleiche Verteilung des Schadensfortschritts lässt vermuten, dass hier unter anderem eine Verdrehung aufgrund zufällig kombinierter Umgebungsfaktoren in unterschiedlichen Stadien gespeichert wird und sich in diesen Bereichen schädigend auswirkt. Dadurch kann in vorerst völlig willkürlich erscheinenden Seilabschnitten die Drahtbruchentstehung im Vergleich zum restlichen Seil beschleunigt werden.

⁹ Zerstörungsfreie Prüfmethode zur physikalischen Detektion von Störstellen im Stahlseil, vgl. Absatz 3.4.

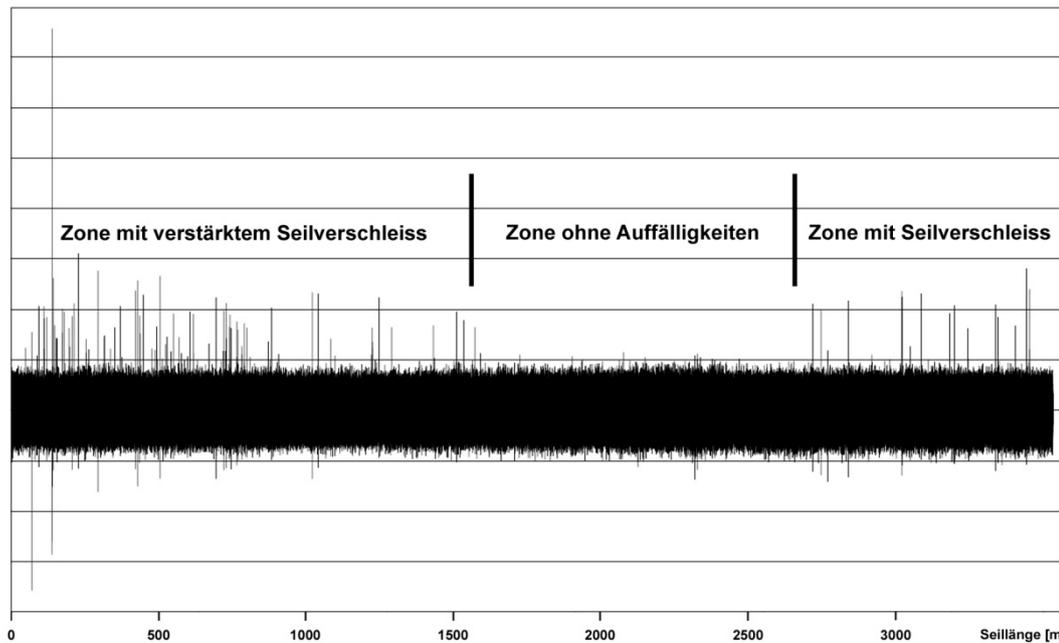


Abbildung 11: Magnetinduktives Prüfdiagramm eines Seilbahnzugseils mit ungleichem Verschleiß trotz annähernd gleichmäßiger Belastung

Die elektronische Messung des Verlaufs der Schlaglänge selbigen Seils über der gesamten Strecke bestätigt diese Vermutung und wird in Kapitel 6 zur Quantifizierung des Einflusses wieder herangezogen (vgl. Abbildung 12, blaue Linie). Im linken, am stärksten geschädigten Abschnitt ist die Schlaglänge am größten, das Seil somit am stärksten aufgedreht. Zur Veranschaulichung wurde das magnetinduktive Prüfdiagramm parallel überlagert, so dass der Zusammenhang zwischen Schädigung und aufgedrehtem Seil direkt erkennbar wird.

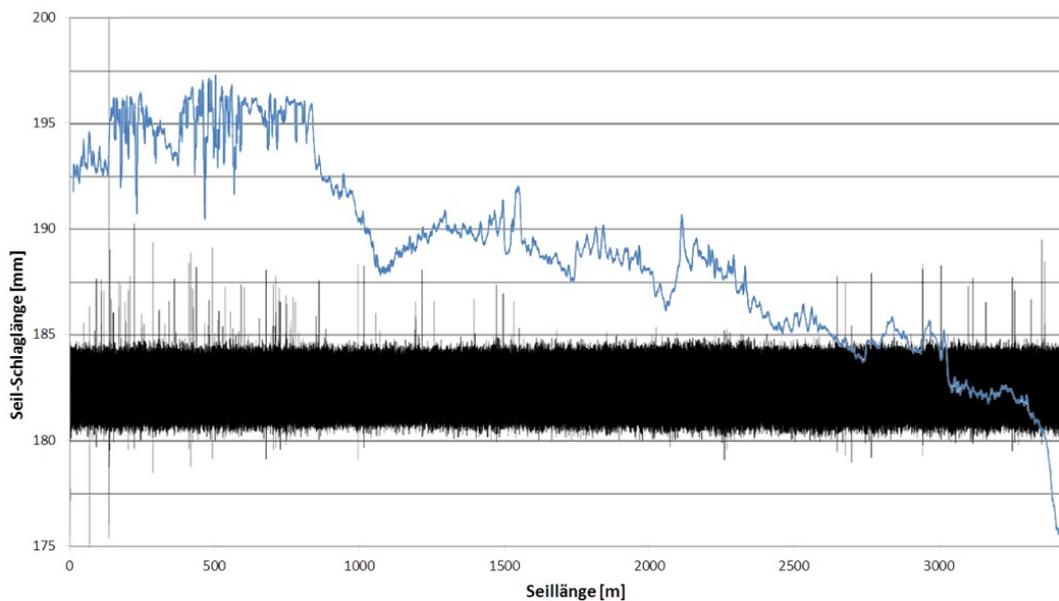


Abbildung 12: Schlaglängenverlauf (blau) und magnetinduktives Prüfdiagramm (schwarz) des untersuchten Seilbahnzugseils

Schäden aus Seildrehung treten nicht nur im Seilbahnbau auf. Auch bei Aufzügen, Schachtförderanlagen, Kranen und Abspanneinrichtungen verursachen die Drehmomente der Seile und ihr Einfluss auf die Anschlusskomponenten der Seiltriebe schädliche Systemzustände (Hobbs und Ridge 2013).

Die Einzeldrähte brechen letztendlich durch erhöhte (Zug-)Beanspruchung bei inhomogener Lastverteilung, Ermüdung durch Biegewechsel beim Auf- und Ablaufen von Seilscheiben und mechanischer Abrasion. Einen nicht zu vernachlässigenden Anteil auf die Seilschädigung hat dabei der Verdrehzustand, die lokale Schlaglänge, eines Seils, wie im Forschungsvorhaben (Wehking und Weber 2012) nachgewiesen wurde. Für gängige Kranseilkonstruktionen konnte im Rahmen dieses Projekts ein Rechenmodell entwickelt und im Experiment verifiziert werden, dass die Berechnung der Lebensdauerreduktion eines Seils in Abhängigkeit des Verdrehungswinkels auf einer spezifischen Bezugslänge erlaubt. Für Gleichschlagseile existiert bisher noch kein vergleichbares Rechenmodell. Zudem ist sowohl für Seilbahnen als auch für allgemeine Seiltriebe bisher vollkommen unbekannt, in welchem Maß die einzelnen Einflussfaktoren Seildrehung begünstigen und in wieweit sich dies auf diese auf den gespeicherten Verdrehungszustand im Seil auswirken. Die Verfügbarkeit von Seilbahnanlagen und letztlich von allgemeinen Seiltrieben wird durch diesen noch unbekanntem Zusammenhang zwischen Drallverursachern und bleibender Verdrehung nachhaltig eingeschränkt.

Um die Auswirkungen auf das Seilbahnseil zu charakterisieren, muss besonders zwischen "Aufdrehen" und "Zudrehen" unterschieden werden. Im aufgedrehten Zustand lockert sich das Seilgefüge, die Litzen werden nicht mehr gleichmäßig vom Kern gestützt, so dass der Seilverband ungleich trägt, wodurch einzelne Drähte oder Litzen erhöht belastet werden können (Verreet 1996). Zudem wirken sich Querbeanspruchungen, wie sie bei Seilbahnen unter anderem an jeder Stütze vorkommen, auf die Seillebensdauer verstärkt aus (Longatti 2012), so dass Drahtquetschungen, Materialveränderungen und schließlich Drahtbrüche entstehen. Ein durch Drehung gelockertes Seilgefüge ist diesem Effekt umso mehr ausgesetzt, da die Drahtzugspannung gegenüber den wirkenden Querkräften sehr niedrig ist.

Im zugekehrten Zustand hingegen wird die Sperrung, der Abstand zwischen den Litzen (Jenner 1992), wie bereits beschrieben vermindert, bis sich die Litzen direkt aufeinander abstützen, anstatt durch die Seileinlage gebettet zu werden. Dadurch reiben die Litzen bei jeder Biegung des Seils in der sogenannten Litzengasse aneinander, bis der korrosionshemmende Zinkmantel abgeschliffen ist und die Drahtquerschnitte abrasiv geschwächt werden (vgl. Abbildung 13), sichtbare Kerben ausbilden (vgl. Abbildung 14) oder die Drähte direkt durch die erhöhte Querpressung bei Litzenberührung brechen (Briem 1995). Diese Drahtbrüche in der Litzengasse sind mit den im Anschluss beschriebenen etablierten Prüfmethoden, insbesondere bei Sichtprüfung, zum Teil nur schwer zu detektieren (vgl. Abbildung 15).



Abbildung 13: Korrosion und Abrieb in der Litzengasse eines zugeordneten Seils



Abbildung 14: Kerbbildung an sich berührenden Litzen unter Verdrehung



Abbildung 15: Drahtbruch an der Litzengasse eines aufgedrehten Zweiseilpendelbahnzugseils

Durch den Kontakt mit Rollen und Scheiben kann das verdrehte Seil eine sichtbare Welligkeit, den sogenannten Korkenzieher, aufbauen (Verreet 2005). Die Litzen stützen sich in dieser Form ungleichmäßig untereinander ab, so dass Bereiche mit erhöhter (Quer-) Pressung, Abrieb an den Drähten und Drahtbrüchen entstehen, wie es besonders häufig bei kurvenreichen Standseilbahnen¹⁰ beobachtet werden kann (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17). Nachteilig wirkt sich dieser Zustand zudem im Betrieb in Form von Lärm durch verschleißfördernde Vibrationen aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bewegte Drahtseile in Seilbahnen örtlich verfrüht versagen, da durch lokale Verdrehung die Drahtbruchentwicklung gefördert wird. Wie der nachfolgende Stand der Technik in Kapitel 3 zeigen wird, bilden konventionelle Lebensdauermodelle das Vorkommen von Drall und die daraus entstehende Seilschädigung nicht ab. Schließlich ist das Phänomen nicht ausreichend messbar, so dass Drall erst im Betrieb erkannt und meist hingenommen wird. Nur Gelegentlich werden Maßnahmen zur Nachbesserung ergriffen.

¹⁰ Seilgebundenes Zugsystem, bei dem das Tragen der Fahrzeuge durch eine feste Fahrbahn erfolgt und ein Zugseil die Bewegung der Wagen übernimmt. In horizontalen Anwendungen wird diese Seilbahn auch „Peplemover“ genannt, z.B. an Flughäfen und in Park-and-Ride-Funktionen (Doppelmayer 2009; Seeber 2010.)



Abbildung 16: Korkenzieher an einem Peoplemover

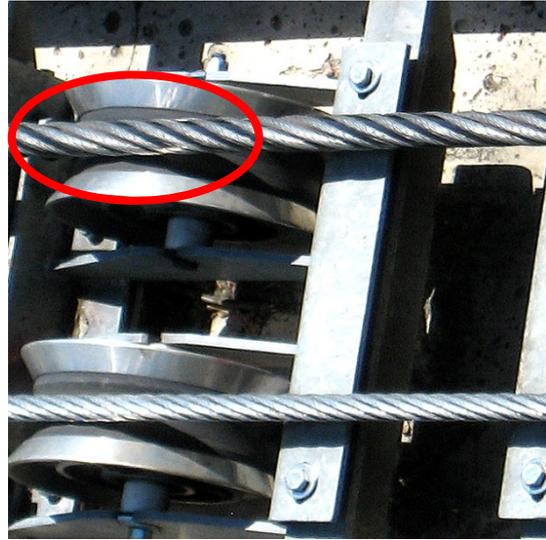


Abbildung 17: Durch Verdrehung beschädigtes Zugseil in einer urbanen Standseilbahn

2.3 Zielsetzung und Abgrenzung

Seildrehung ist wie zuvor dargelegt ein bekanntes, relevantes Problem in der bewegten Anwendung von Litzenseilen, deren Ursachen zum Teil qualitativ bekannt sind, jedoch in ihrem Zusammenwirken bisher nicht quantitativ in Bezug auf die bleibende Verdrehung und letztlich in ihren Auswirkungen auf die Seillebensdauer in der Praxis bekannt sind (Oplatka 2004). Die Schädigung aus Drehung wird bisher insbesondere bei Seilbahnen mangels effektiver Messmethoden hingenommen. Mit Blick auf die Verfügbarkeiten moderner Hochleistungsanlagen ist dieser Zustand jedoch kaum mehr als zeitgemäß einzustufen, denn wie obige Abbildung 16 und Abbildung 17 moderner Anlagen belegen, wird der Seildrall und die resultierende Verdrehung in der Planung von Seilbahnanlagen nicht berücksichtigt, sondern wird oft erst an der bestehenden Anlage diagnostiziert und zum Teil geduldet oder durch individuelle Ersatzmaßnahmen bekämpft.

Eine neue Sensortechnik ermöglicht nun die digitale Aufzeichnung der Drehung eines beliebigen Seilabschnitts während der Fahrt in einem Seiltrieb. Die Drehung ist nachweislich an der Schädigung eines Seils beteiligt (vgl. Kapitel 2.2 und (Oplatka 2004)), jedoch sind Ort und Ausmaß sowie der Anteil von vermeidbarer und unvermeidbarer Drehung nur unzulänglich bekannt.

Ziel der vorliegenden Abhandlung ist es, ein praxisrelevantes theoretisches Beurteilungsmodell für die Schädigung der Zugseile von Zweiseilpendelbahnen durch Drehung und Verdrehung im Betrieb zu entwickeln und zu verifizieren. Dazu werden existierende Forschungsergebnisse, weiterentwickelte theoretische Berechnungsansätze und im Rahmen der Seilprüftätigkeit des IFT Universität Stuttgart über Jahrzehnte dokumentierte Schadensentwicklungen von Seilen auf spezifischen Anlagen herangezogen. Begleitend werden Drehungsmessungen mit einem neuartigen digitalen Sensorsystem durchgeführt, das nachfolgend ausführlich beschrieben wird.

Mit Hilfe der Beurteilungsmodelle lassen sich anschließend ungünstige Anlagenkonfigurationen z.B. aus Streckenprofil und wirkenden Seilkräften auf Bestandsanlagen identifizieren und bewerten. Auf Basis dieser Untersuchungen können in Zukunft neue Verfahren zur Auslegung von Seilbahnen etabliert werden, welche die Sicherheit, Verfügbarkeit und letztlich auch die Betriebskosten von Seilbahnen, insbesondere im öffentlichen Personennahverkehr verbessern können.

Die Vorgehensweise zur Entwicklung des Gesamtmodells gliedert sich dabei in drei Pfade auf, die unterschiedliche Ansätze der Beurteilung von Seilschädigung vereinen, vgl. Abbildung 18:

- (1) Durch ergänzende Biegeversuche mit verdrehten Gleichschlagseilen¹¹ werden aufbauend auf das Forschungsvorhaben (Weber 2013) Lebensdauerfaktoren für die Berechnungsmethode nach Feyrer entwickelt, um die Lebensdauer verdrehter Seilbahnseile (somit Gleichschlagseile) voraussagbar zu machen
- (2) Bestehende theoretische Modelle zum Seildrehmoment werden Seilbahnbezogen, methodisch erweitert und mit Ist-Drehungsmessungen von Seilbahnanlagen in Beziehung gesetzt
- (3) Magnetinduktive Prüfdaten aus dem Archiv des IFT der im zweiten Pfad gemessenen Anlagen werden auf ihre Schadenshistorie, Seillebensdauer und ihren Schlaglängenverlauf hin untersucht.

Durch Verknüpfung der Ergebnisse aus den Pfaden 2 und 3 werden Aussagen über die bleibende Verdrehung aus charakteristischer Seildrehung getroffen und mit Pfad 1 die zu erwartende Lebensdauererminderung der verdrehten Abschnitte quantifiziert.

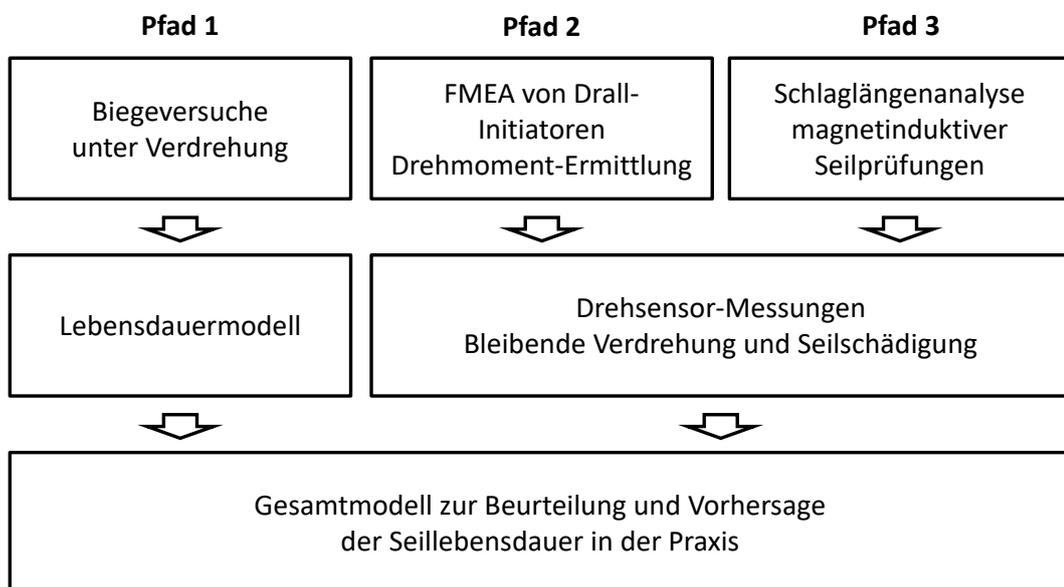


Abbildung 18: Schaubild der Arbeitspfade der vorliegenden Abhandlung und der geplanten Ziele

Die anhand von Seilbahnen zu entwickelnden Ansätze sind im Anschluss auf andere seilgebundene Förderanlagen übertragbar. Mit der Übertragung der Ergebnisse auf Einseilumlaufbahnen wird ein erster Schritt dazu vorgenommen. Die allgemeine Anwendung auf beliebige Seiltriebe wird abschließend diskutiert.

¹¹ Weber untersuchte für Hebezeuge relevante Seilkonstruktionen. Die Gleichschlagkonstruktion der Seilbahnseile wurde in den Versuchen ausgelassen.

3 Stand der Technik und Wissenschaft

3.1 Theoretische Modelle der Seildrehung

Mit Beginn der modernen universitären Drahtseilforschung in Zentraleuropa kurz vor dem Zweiten Weltkrieg wurde auch das Drehverhalten von Seilen diskutiert und erste Berechnungsansätze für das Drehmoment eines Seils unter Last veröffentlicht (Dreher 1933; Benoit 1934) und verfolgen das Ziel, ein möglichst drehmomentarmes Seil aufzubauen (Baum 1951). Inzwischen werden Drahtseile in der Norm grundsätzlich nach nicht-drehungsarm und drehungsarm unterschieden (Norm DIN EN 12385-2), es existiert jedoch außerhalb der Norm in der Fachliteratur eine weitere Unterscheidung zwischen drehungsarm und drehungsfrei (Feyrer 2000):

- „Drehungsfrei“ bedeutet, dass sich ein Drahtseil bei einer spezifischen Zugbelastung S/d^2 (mit der Seilkraft S [N] und dem Seildurchmesser d [mm]) zwischen 0 N/mm^2 und 150 N/mm^2 auf einer Referenzlänge des tausendfachen Seilnennendurchmessers nicht mehr als 360° dreht.
- „Drehungsarm“ bedeutet, dass ein Drahtseil unter Zugbelastung nur ein geringes Drehmoment entwickelt, was meist durch gegenläufiges Schlagen mehrerer Litzenlagen erreicht werden kann.
- Die übrigen Seile entwickeln unter Last größere Drehmomente und werden als „nicht-drehungsfrei“ bezeichnet. Zu diesen gehören die hier behandelten einlagigen Litzenseile.

In den meisten technischen Anwendungen ist diese Klassifizierung ausreichend. Bei kritischen Anwendungen kann das Drehmoment eines Seils experimentell bestimmt werden, in dem es unter Laborbedingungen definiert belastet und verdrillt wird, während das erzeugte Drehmoment mit einer Messwelle erfasst wird (Feyrer und Schiffner 1987; Novak 2010). Von der wirklichen Drehung eines laufenden Seils und der wirklichen bleibenden Verdrehung sind diese Werte jedoch noch weit entfernt, da die mannigfaltigen Einflussfaktoren auf das Drehverhalten eines Seils unter seinen spezifischen Einsatzbedingungen im Experiment nicht nachgestellt werden können.

In Bezug auf Seilbahnen sind in der Fachliteratur zwei grundlegende Berechnungsansätze zur Seildrehung bekannt, namentlich die Ansätze nach Kollross (Kollros 1974) und Feyrer (Feyrer 2000) sowie nach Engel (Engel 1966, 1994).

Engel formuliert mit Hilfe der Drehsteifigkeit D einer Seilkonstruktion in den Boomzeiten des Seilbahnbaus einen ersten Rechenansatz zur Ermittlung des Drehwinkels (Engel 1966), der das an seinem Ende fest eingespannte Zugseil einer Pendelbahn sowie das eher frei drehbare Förderseil einer Umlaufbahn beschreiben soll. Eine Verifikation dieses Modells und insbesondere die Nutzung des Ansatzes ist jedoch in der Fachliteratur nicht auffindbar. Die Drehsteifigkeit wurde schließlich zur bereits in Formel (2) verwendeten Verdrehungskonstante μ weiterentwickelt (Engel 1994). Engel bringt diese für die Berechnung des Seildrehmomentes eines 6-litzigen Seilbahnseiles unter Last mit Hilfe geringfügiger geometrischer Vereinfachungen des Seilkörpers in folgendem Formelzusammenhang:

$$\mu = \frac{1}{3}d \cdot \tan \beta + \frac{1}{9}d \cdot \tan \beta \cdot \cos^2 \beta = d \cdot \tan \beta \cdot \left(\frac{3 + \cos^2 \beta}{9} \right) \quad (5)$$

mit: d Seildurchmesser [m]
 β Schlagwinkel [rad]¹²

Eingesetzt in (4) erhält man somit nach Engel für die Drehmomentänderung eines Seils bei wachsender Höhenspannung:

$$\Delta M_{t,Eng} = d \cdot \tan \beta \cdot \left(\frac{3 + \cos^2 \beta}{9} \right) \cdot \Delta h \cdot q \quad (6)$$

Kollross und Feyrer hingegen entwickelten experimentbasierte Ansätze zur Voraussage der Verdrehung verschiedener Seilkonstruktionen unter Last (Feyrer 2000; Kollros 1974):

$$\Delta M_{t,Fey} = c_1 \cdot d \cdot \Delta h \cdot q + c_2 \cdot d^2 \cdot \Delta h \cdot q \cdot \omega + c_3 \cdot d^4 \cdot G \cdot \omega \quad (7)$$

mit $c_1 \dots c_3$ Konstanten
 ω Längenbezogener Verdrehwinkel [rad/m]
 G Schubmodul, nach (Feyrer 2000), S. 114, 76.000 [N/mm²]

Die Werte der Konstanten c_1 , c_2 und c_3 gibt Feyrer auf Basis von Experimenten wie folgt für typische bzw. ähnliche Seilkonstruktionen von Seilbahnen an. Der Verdrehwinkel lag dabei auf einer Länge des einhundertfachen Seilennendurchmessers bei maximal 360°.

Faktor	c1	c2	c3 · 10 ³
6x19 Seale	0,132	0,177	0,367
6x36 Warrington-Seale	0,128	0,183	0,342
6x19 Filler oder Warrington	0,126	0,183	0,342
6x7	0,123	0,127	0,732

Tabelle 1: Faktoren zur Drehmomentbestimmung von Gleichschlagseilen mit Fasereinlage nach (Feyrer 2000), Tabelle [2.6], S. 113

Mit den Ansätzen nach Engel und Feyrer können sich nun die physikalisch erwartbaren Drehmomente und Verdrehwinkel von im Gelände starr gespannten Seilen unter Höhenspannung mathematisch abbilden lassen. Da in der Praxis bei Drall-Untersuchungen oft mit einfachen Mitteln die Drehung des Seils untersucht wird (siehe nachfolgendes Kapitel), berechnet Engel in zahlreichen Veröffentlichungen den erwartbaren Drehwinkel eines bewegten Seils direkt aus den theoretischen Formelzusammenhängen, vgl. z.B. (Engel 1957, 1959). Dabei wird vorausgesetzt, dass die Ableitung des wirkenden Drehwinkels im Feld $d\varphi/dx$ direkt zum längenbezogenen Verdrehwinkel des Seilquerschnitts ω führt:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \omega \quad (8)$$

mit: φ Seildrehwinkel [rad]
 x Längenelement [m]
 ω längenbezogener Verdrehwinkel [rad/m]

¹² Anmerkung des Verfassers: die Aussage von Engel, der Schlagwinkel eines 6-litzigen Seils liege üblicher Weise bei $\pi/6$, ist nicht korrekt. Nach den Recherchen aus Kap. 5.2 liegen die Werte in Realität zwischen 16° und 18°, somit im Bereich $\pi/10$.

Engel benennt später auch den drall-stauenden Einfluss von Seilstütz- und Führungselementen sowie die mögliche Erzeugung zusätzlicher Drehmomente, schließt diese aber von einer weiteren Untersuchung aus (Engel 1977). Auch die Untersuchungen zur Entgleisungssicherheit von Seilen an Rollenbatterien von Piskóty gehen nicht auf ein mögliches Stützeninduziertes Drehmoment ein (Piskóty 1995). Die berechneten Werte von Engel für erwartbare Umdrehungen weichen letztlich zum Teil übermäßig von den später durch digitale Messung erfassten Drehungen ab, vgl. Kapitel 5.4.

Gassmann betrachtet in seiner Abhandlung das Seiltorsionsmoment in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration und erarbeitet ein Rechenmodell für Umlaufbahnen (Gassmann 1981). Ziel der Arbeit ist jedoch die Beschreibung der Torsionsbelastung der Fahrzeugklemme und der Beeinträchtigung des Reibschlusses durch Torsionsmomente zwischen Seil und Scheibe am Antrieb. Die dabei genannten Ergebnisse in Bezug auf die erwartbare Seildrehung stimmen jedoch nicht mit den in der Praxis durch digitale Messung ermittelten Werten überein.

In einem neu erschienenen, umfassenden Fachbuch über den Seilbahnbau (Hofmann 2015) versucht Hofmann auf Basis der Seildrehungstheorie nach Kollross und Feyrer ebenfalls eine Kalkulation der theoretisch erwartbaren Rotationen des Seils während einer Umfahrt. Die Größenordnung der von Hofmann postulierten Umdrehungszahlen wird in der Praxis jedoch ebenfalls nicht erreicht, wie die Messungen mit dem in Kapitel 5.4 vorgestellten digitalen Drehsensor zeigen. Dies ist ein zusätzlicher Beweis, dass zur Untersuchung der Drehungsphänomene ein neuer, ganzheitlicher Ansatz benötigt wird und nicht allein auf bestehende Formelwerke zurückgegriffen werden kann.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass ein weiteres, nicht näher beschriebenes Rechenprogramm zur Voraussage von Seildrehung der Universität Grenoble existiert (Terriez und Reineri 1997), welches jedoch in der Fachliteratur nach der Erstveröffentlichung im Jahre 1997 nicht weiter aufgegriffen oder zitiert wird. Die dargestellte Verifikation des Programms an einem einzigen Leerseil einer Sesselbahn lässt zudem Zweifel an der Richtigkeit der Annahmen aufkommen, denn die hier angegebenen Seilumdrehungswerte sind bereits als überdurchschnittlich hoch anzusehen, wie die nachfolgenden Ausführungen dieser Arbeit zeigen werden.

Dies führt zu dem Schluss, dass zu den bisher physikalisch erwarteten oder mathematisch erschlossenen Drehungsverursachern zusätzliche vielschichtige Faktoren hinzukommen. Diese müssen systematisch erschlossen und durch experimentelle Datenerhebungen erfasst werden. Die einfache Beziehung zwischen Dreh- und Verdrehwinkel kann für bewegte Seile nicht vorausgesetzt werden. Es soll daher nicht wie in den vorangegangenen Untersuchungen versucht werden, die Drehung des Seils vollumfänglich berechenbar zu machen. Stattdessen sollen die Seildrehmomente in einer Seilbahnanlage theoretisch ermittelt und die Plausibilität anhand der messbaren Drehkurve überprüft werden. Beide Ergebnisse können anschließend mit der verbleibenden Drehung in den Endbereichen der Seile in Beziehung gesetzt werden, so dass ein Maß für die Drall-Intensität entwickelt werden kann.

Im folgenden Kapitel wird der technische Stand zur Erfassung von Drall- und Schadenserscheinungen auf Drahtseilen von Seilbahnen vorgestellt.

3.2 Messung der Seildrehung

Die Beherrschung von Seildrehung ist sowohl während der Montage als auch im Betrieb gewünscht bzw. notwendig. Für beide Situationen existieren bisher einfache mechanische Hilfsmittel, mit denen Drehung blockiert wird. Während der Montage werden als Drehmomentstützen sogenannte Knebel aus Holz oder Metall eingesetzt, die durch lange, zum Teil am Ende fixierte Hebelarme ein Verdrehen des Seils während des Einziehens oder ein Umschlagen von Flaschenzügen beim Abspannen verhindern können, vgl. Abbildung 19. Im Betrieb können zum Beispiel Drallstützen oder auch Drallhalter genannte Klemmblöcke eingesetzt werden, welche die Verdrehung von Spannseilen und die unerwünschte Verfrachtung dieser Bewegung auf die über Vergussmuffen direkt angebundene Tragseile blockieren (vgl. Abbildung 20) (Hudler 1958). Bei Umlaufbahnen erfüllen die Fahrzeuge in begrenztem Maße eine Knebelwirkung, die sich jedoch bei übermäßigem Drall in Form von Fahrzeugschwingungen auf der Strecke oder deren Schiefstellung negativ auswirkt. Bei betrieblich lösbaren Klemmen, also kuppelbaren Anlagen, führt das abrupte Lösen der Klemmen während des Auskuppelvorgangs zu Verschleiß an Rollen und Klemmen sowie zu unerwünschter Geräuschentwicklung, die selbst der meist nicht fachkundige Fahrgast nach mündlicher Aussage von Betreibern als unerwünschten Effekt wahrnehmen kann.



Abbildung 19: Drehmomentstützen bei der Montage eines Sesselbahnförderseils
(Quelle: seilbahnen-kogler.at)

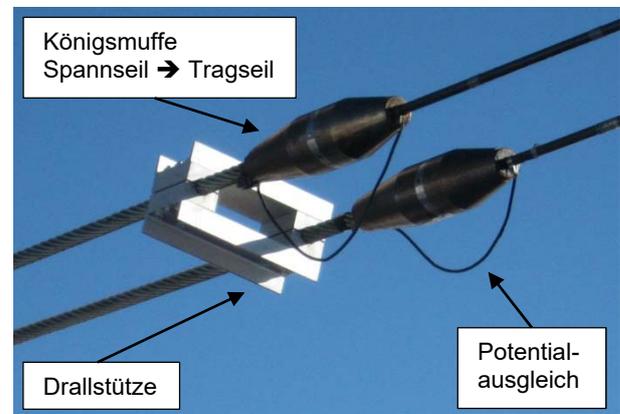


Abbildung 20: Drallstütze an den Spannseilen einer Zweiseilpendelbahn am Übergang zum Tragseil

Drehungsmessungen an laufenden Seilen wurden bisher nahezu ausschließlich in zwei Varianten auf mechanischem Wege durchgeführt: Einige Seilhersteller bringen im letzten Fertigungsschritt eine Farblinie auf die Oberfläche auf, die das Zählen von Umdrehungen des Seils an einem festen Beobachtungspunkt ermöglicht. Nicht nur bei Seilbahnen, insbesondere auch beim Aufzugsbau werden die Farblinien eingesetzt (vgl. Abbildung 21), damit die parallel verlaufenden Tragseile unverdreht eingebaut werden können und somit möglichst gleiche Dehnungs- und Fahreigenschaften aufweisen (Pfeifer 2004). Farblack-Markierungen werden auf Seilbahnen bei Vorort-Untersuchungen auch nachträglich manuell aufgebracht, um Drehung zu beobachten. Alternativ werden Fähnchen, beispielsweise aus Klebeband, in gewissen Abständen auf das Seil appliziert, um die Drehung von einem festen Punkt aus beobachten oder aufnehmen zu können.

Eine weitere triviale Messmethode zur Erfassung des Betrags der Umdrehungen eines Seils im Betrieb während eines Fahrspiels ist die Fadenmethode. Dabei wird eine Faden auf der Seiloberfläche appliziert, der sich mit den Seilumdrungen auf- oder abwickelt (vgl. Abbildung 22). Diese Methode ist jedoch sehr störungsanfällig, da mitunter der Faden an Zwischenstützen verloren geht oder zum Teil abgerissen wird.

Beide etablierten, provisorisch durchzuführenden Methoden zur Ermittlung von Seildrehung haben den Nachteil, dass sie kaum Hinweise über den Verursacher der Seildrehung liefern können, da sie vom Beobachtungsort abhängig sind und im Fall der Fadenmethode zusätzlich streckenweise rückwärtige Drehung nicht erfassen können. Sie können zudem weder die Seildrehung messtechnisch auflösen, noch erlauben sie, den Verlauf der Drehung eines beliebigen Seilabschnitts über der Zeit abzubilden. Stattdessen zeigen sie das

ortsabhängige Ist-Bild der Drehung. Den Weg zum Verdrehten Zustand können alle bisher bekannten Methoden nicht flexibel quantitativ abbilden und auch nicht dokumentieren. Dieser technische Missstand führte zur Entwicklung einer neuen Messmethode, welche in Kapitel 5.4 näher beschrieben wird.

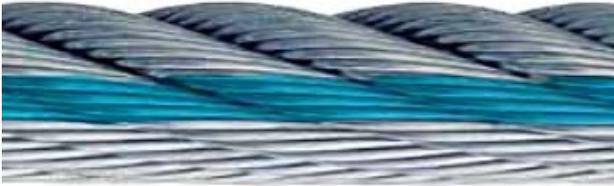


Abbildung 21: Farbmarkierung eines Drahtseils zur Überwachung der Verdrehung bei der Montage (Quelle: www.brugglifting.com)



Abbildung 22: Fadenmethode zur einfachen Messung von Seildrehung

3.3 Messung der Schlaglänge

Wie bereits ausgeführt stellt die Schlaglänge als Konstruktionsparameter die Ganghöhe einer Litze im Seilverband dar. Folgt man der Seiloberfläche auf einer Mantellinie in Richtung der Seil- beziehungsweise Bewegungsachse, beschreibt die Seiloberfläche eine periodische Welle zwischen Litzenkuppen und Litzengassen, die sich messtechnisch erfassen lässt und somit eine Bestimmung der Abstände der Litzenkuppen, respektive der Schlaglänge erlaubt. Messtechnisch kann dies über kapazitive Näherungssensoren geschehen, wie sie in elektronischen Schlaglängenmessgeräten bereits eingesetzt werden (vgl. Abbildung 23) (Reichart 2006; Rittner 2012). Die Messdaten werden softwareseitig weiterverarbeitet, geglättet und zur Ist-Schlaglänge umgerechnet. So lässt sich zum Beispiel ermitteln, welchen Zustand das Seil in Bezug auf die maximale Schlaglängenänderung als kritisches Kriterium vorweist. Gemäß dem aktuellen Normentwurf der DIN EN 12927, Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr – Seile, ist bei einer Schlaglängenabweichung von mehr als $\pm 15\%$ von der Nennschlaglänge ein Sachverständiger hinzuzuziehen.¹³

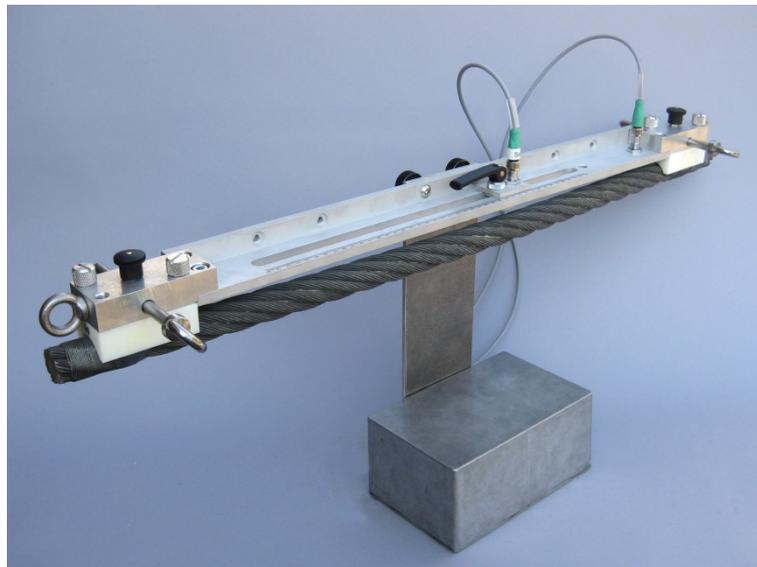


Abbildung 23: Elektronisches Schlaglängenmessgerät

¹³ Aus Sicht der Seilverdrehung wirkt dieser Grenzwert asymmetrisch. Die genannte Schlaglängenabweichung entspricht einer längenbezogenen Verdrehung eines sechslitzigen Seils von -865° auf 100 Mal Seilnennndurchmesser (aufgedreht) bzw. $+640$ auf 100 Mal Seilnennndurchmesser (zugesdreht).

Schlaglängenänderungen können zudem manuell gemessen oder aus den Bilddaten digital-optischer Seilprüfgeräte erfasst werden (siehe Kapitel 3.4). Eine weitere Methode ist, durch Frequenzanalyse der magnetinduktiven Messdaten die nur schleichend veränderliche, stabile Frequenz der Schlaglänge zu isolieren (Widmann 2013). Diese Möglichkeit wird in Kapitel 6 später wieder aufgegriffen, da sie direkt aus dem Ist-Verschleißzustand bei der magnetinduktiven Prüfung eines Seilbahnseils parallel korrespondierende Schlaglängendaten liefern kann.

Mit Hilfe der Schlaglängenmessung lässt sich zwar nicht die Drehung des Seils selbst, jedoch bei veränderter Schlaglänge der Stau von Verdrehungen im Seil bestimmen. Das Zusammenwirken aus der eingebrachten Drehung im Betrieb und der gestauten Drehung im Seil können schließlich zum vorzeitigen Verschleiß und Erreichen der Ablegereife führen. Diese Größen sollen im Rahmen dieser Arbeit in Verbindung gebracht werden, um nicht zuletzt ein Maß für schädliche Drehung und unschädliche Drehung zu definieren.

3.4 Visuelle und Magnetinduktive Seilprüfung

Nach geltendem Recht sind Seile in der Personenfördertechnik regelmäßig zerstörungsfrei auf ihren Verschleißzustand zu prüfen (Norm DIN EN 12927-7; Norm DIN EN 81-1; Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg 11-2004). Während Aufzüge bei einem hohen Seilsicherheitsfaktor von 14 eher selbständig operieren und nur vergleichsweise selten inspiziert werden müssen, gelten für Seilbahnen bei Sicherheitsfaktoren zwischen 3,0 und 4,5 strengere Prüfintervalle und Prüfverfahren. Die visuelle Seilprüfung wird bis zu monatlich durch den Betreiber selbst durchgeführt, um frühzeitig äußere Beschädigungen und Gefahren wie Riefen, Kerben, Blitzschläge und herausstehende Drahtenden zu finden und zu behandeln. Seit wenigen Jahren sind im deutschen Alpenraum durch das IFT erforschte und patentierte digital-optische Verfahren (vgl. Abschlussbericht (Wehking 2009)) als technische Unterstützung zugelassen, bei denen Bilder der Seiloberfläche voranalysiert werden können (Pröhl und Nejez 2012). Diese Geräte können auch geometrische Daten aus dem Bild erfassen, wodurch sich zum Beispiel der Verlauf der Seilschlaglänge als relativer Trend über die gesamte Messung darstellen lässt (Kühner et al. 2012).

Die meist in mehrjährigen Abständen durchgeführte magnetinduktive Seilprüfung¹⁴ hingegen untersucht auch innere Seilschäden, wie sie zum Beispiel durch Litzenberührung oder gewöhnliche Ermüdung des Seils entstehen können (Messmer 2008; Winter 2013; Norm DIN EN 12927-8). Das Seil wird als quasi-homogener Eisenkern durch ein Magnetfeld bewegt und bis zur Sättigung erregt (vgl. Abbildung 24). Drahtbrüche und andere Schädigungen stellen eine Änderung der metallischen Querschnittsfläche dar und erzeugen ein magnetisches Streufeld. Dieses Streufeld erzeugt in der Messspule des Prüfsystems einen induktiven Spannungsimpuls, der als Peak über dem Grundsignal des Seils deutlich hervortritt.

Durch die magnetinduktive Prüfung können Drahtbrüche somit physikalisch sicher detektiert und der gemessenen Seilstrecke örtlich zugeordnet werden. Unter normalen Bedingungen sollte ein Seilbahn-Seil mit der Zeit gleichmäßig verschleißen, da nahezu jedes Seilstück eine ähnliche Anzahl Biegewechsel über Seilscheiben unter den wirkenden Betriebslasten erfährt. Wie bereits angedeutet, ist in der Praxis die Drahtbruchverteilung eines Seilbahnzugseiles mitnichten gleichmäßig. Stattdessen wechseln sich Bereiche mit verstärkter Drahtbruchzahl mit Zonen guten Zustands ab (vgl. Kapitel 2.2). Bis zum heutigen Zeitpunkt ist kein direkter Zusammenhang bekannt, mit dem dieses Phänomen quantitativ ermittelt werden kann. Messungen der Schlaglänge und händische Beobachtungen der Seilwelligkeit weisen in den meisten Fällen nur qualitativ darauf hin, dass das Seil verdreht ist.

¹⁴ im deutschen auch kurz als „MI“ Prüfung, im englischen oft mit „MRT“ Prüfung bezeichnet

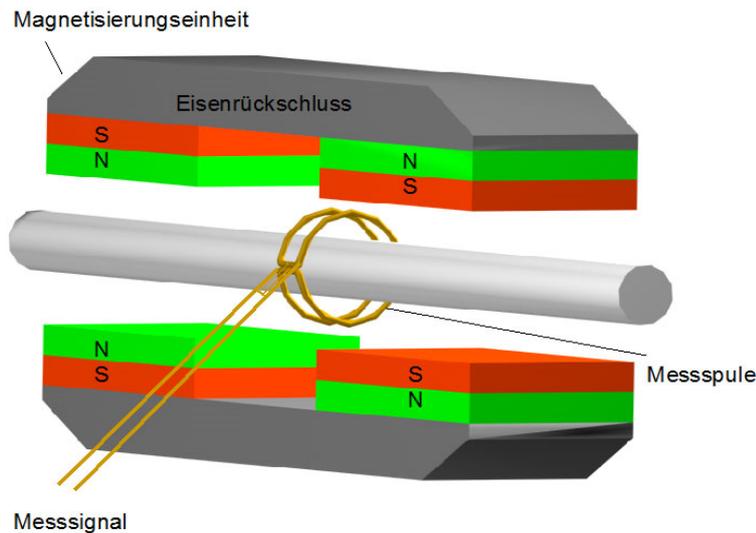


Abbildung 24: Schema eines magnetinduktiven Prüfgerätes (Winter 2006)

Visuelle und magnetinduktive Prüfung ergänzen sich durch eine gemeinsame, hohe Prüftiefe zu einem entsprechend hohen Sicherheitsniveau der zerstörungsfreien Prüfung von Seilen in Personenseilbahnen (Nejez et al. 2014). Während die magnetinduktive Prüfung das reine Vorhandensein eines Schadens detektiert, kann eine (ergänzende) Sichtprüfung auch über Schadensursachen Auskunft geben. Dieses Prinzip wird auch in der vorliegenden Abhandlung herangezogen, um physikalische Zusammenhänge und Kausalketten zu belegen. Eine Übersicht über die durch beide Prüfkonzepte erfassten Schadensarten gibt abschließend Abbildung 25. Die Darstellung veranschaulicht, dass beide Methoden nur eine gewisse Überschneidmenge an Schadensarten bilden, während bestimmte Schäden nur durch das jeweilige individuelle Konzept erfasst werden.



Abbildung 25: Übersicht der Prüftiefe der Methoden "magnetinduktiv" und "visuell" (Quelle: IFT)

Fazit

Von theoretischer Seite ist die Entwicklung des Seildrehmoments unter wirkenden Zugkräften weitestgehend erschlossen, jedoch konnte bis heute kein Zusammenhang zwischen Drehmoment, real auftretenden Seildrehungen und lokal gespeicherter Verdrehung hergestellt werden. Lebensdauerfaktoren für verdrehte Gleichschlageile existieren zudem bislang nicht. Im Folgenden werden die bestehenden Modelle durch experimentelle Untersuchungen und mathematische Betrachtungen ergänzt, um die komplexen Wirkverhältnisse von Seildrall voraussagbar und beurteilbar zu machen.

Die bisher unzureichende Methode zur Bestimmung von Seildrehung wird durch neue Messtechnik abgelöst, während bestehende Systeme zur Erfassung des Seilschädigungszustands weiter verwendet und zum Teil um benötigte Funktionalitäten ergänzt werden können. Nachfolgend werden die Forschungspfade nach Abbildung 18 detailliert behandelt.

4 Lebensdauereinfluss von Verdrehung

Gemäß der dargelegten Forschungsstrategie aus Abbildung 18, Seite 13, wird nun der **erste Pfad** zur Erfassung der komplexen Ausgangssituation in Form einer experimentellen Untersuchung von Drallschädigung an Seilbahnseilen durch Biegeversuche unter diskreten Verdrehwinkeln im Labor bearbeitet. Ziel dieses Pfades ist eine Erweiterung des Feyrer'schen Lebensdauermodells auf verdrehte Seilbahnseil-Konstruktionen. In den darauffolgenden Kapiteln 5 und 6 werden in den Forschungspfaden 2 und 3 zuerst die theoretischen Einflussfaktoren möglicher Drallverursacher analysiert und quantifiziert, um diese durch Drehungsmessungen auf existierenden Anlagen zu prüfen, anschließend werden im letzten Pfad magnetinduktive Prüfdaten aus den Lebenszyklen der untersuchten Seile auf die reale Schadensentwicklung analysiert und durch Fouriertransformation die reale Verdrehung der Seile in Form der Schlaglänge aufgearbeitet. Die drei Pfade werden schließlich in Kapitel 7 zu einem Gesamtmodell verknüpft.

4.1 Kennwertbestimmungen am Versuchsseil

Das verwendete Gleichschlagseil der Konstruktion 6x19 Seale mit Fasereinlage und einem Nenndurchmesser von 15 mm wurde gezielt auf Eigenschaften hin untersucht, die mit der Drallwirkung in Verbindung stehen, um diese mit den bestehenden Literaturwerten aus (Feyrer 2000; Weber 2013) zu vergleichen und die Eignung des Prüfseils nachzuweisen. Neben üblichen Bruchkraftversuchen zur Bestimmung der wirklichen Bruchkraft der Prüflinge wurden daher Drehmomentversuche nach der Methode Schiffner durchgeführt (Feyrer und Schiffner 1987). Die Parameter des Versuchsseils lauten gemäß Tabelle 2 wie folgt:

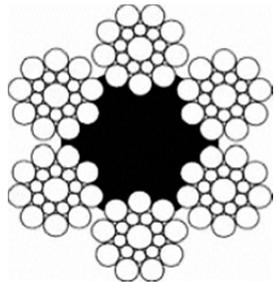
Merkmal	Ausprägung	
Nenndurchmesser	15,0 mm	
Konstruktion	6x19 Seale	
Schlagart und Richtung	Gleichschlag rechtsgängig	
Einlage	Fasereinlage	
Oberflächenbehandlung	verzinkt gezogen	
Drahtnennfestigkeit	1960 N/mm ²	
Mindestbruchkraft	147 kN	
Bezeichnung nach DIN EN 12385-2	15 6x19S-FC 1960 B zZ	

Tabelle 2: Parameter des Versuchsseils

Bruchkraftbestimmung

Die Seilbruchkraft wurde unter Einhaltung der Kriterien DIN EN 12385-1 (Norm DIN EN 12385-1) auf einer Zugprüfmaschine durchgeführt, die von unabhängiger Stelle nach ISO 7500-1 (Norm DIN EN ISO 7500-1) kalibriert ist. Die maximale Prüfkraft der Maschine beträgt 200 kN. Die Maschine wird für den Versuch Kraft geregelt betrieben, so dass die Prüfkraft kontinuierlich um 0,5 % der angegebenen Mindestbruchkraft (MBK) pro Sekunde erhöht wird. Bei einer gegebenen MBK von 147,0 kN wurde die Prüflast somit bis zum Bruch einer Probe um 0,74 kN/s erhöht, die Proben wiesen eine freie Seillänge vom 200-fachen des Seilnenndurchmessers auf, als Endverbindungen wurden kegelige Metallvergüsse nach DIN EN 13411 (DIN EN 13411-4) eingesetzt. Insgesamt wurden drei Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche ergaben die folgenden Werte gemäß Tabelle 3:

Parameter	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Wirkliche Bruchkraft	167,25 kN	162,94 kN	167,42 kN
Wirkliche Bruchkraft bezogen auf MBK	113,78 %	110,84 %	113,89 %
Mittelwert wirkliche Bruchkraft	165,87 kN		
Mittelwert wirkliche Bruchkraft bezogen auf MBK	112,84 %		
Standardabweichung	2,45 kN		
Standardabweichung	1,53 %		

Tabelle 3: Ergebnisse der Bruchkraftversuche am Versuchsseil

Die ermittelten wirklichen Bruchkräfte liegen vollumfänglich oberhalb der angegebenen Mindestbruchkraft. Mit einer Standardabweichung von 1,53 % liegen die Werte in einem engen Streubereich ausreichend nah beieinander.

Drehmomentbestimmung

Zur Bestimmung des seileigenen Drehmoments wird erneut die oben genannte horizontale Zugprüfmaschine verwendet. Zwischen den maschineneigenen Aufnahmen und dem Seilprüfling werden nun zusätzlich ein mit Dehnmessstreifen versehenes Messrohr (vgl. Abbildung 26) sowie eine diskret einstellbare Winkelverdrehvorrichtung in Reihe geschaltet (vgl. Abbildung 27). Zur Ergänzung von bzw. Vergleichbarkeit mit (Feyrer 2000; Feyrer und Schiffner 1987) werden nun im unverdrehten Zustand sowie in den Stufen $\pm 360^\circ/100xd$, $\pm 720^\circ/100xd$ und $\pm 1080^\circ/100xd$ zyklisch Prüfkräfte bis zu einer Durchmesserbezogenen Prüfkraft von $S/d^2=450 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht. Die Literaturwerte sind jedoch nur bei Verdrehungen bis $\pm 360^\circ/100xd$ entwickelt worden.

Beim unverdrehten Prüfling werden die Belastungen fünfmal, bei den verdrehten Zuständen jeweils dreimal wiederholt und je Versuch die Daten des letzten Zyklus zur Bestimmung der Kennwerte verwendet.



Abbildung 26: Aufbau Drehmomentbestimmung, Messrohrseite



Abbildung 27: Aufbau Drehmomentbestimmung, Verdrehvorrichtung

Die ermittelten Drehmomentkurven des Seils sind in nachfolgendem Diagramm dargestellt:

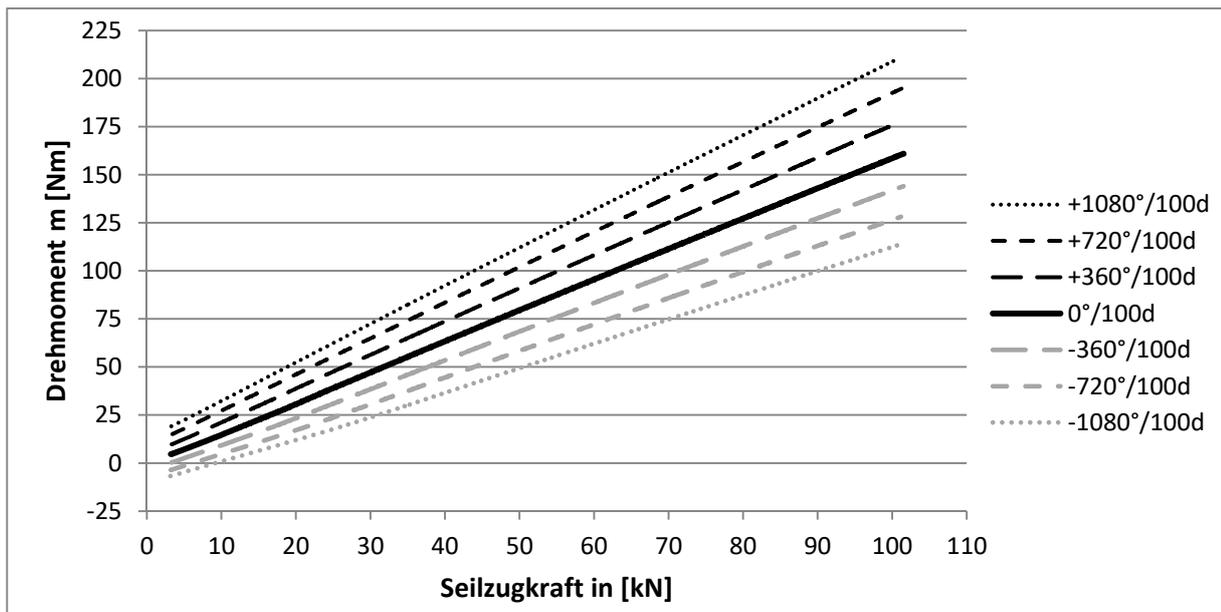


Abbildung 28: Drehmomentkennlinien des Versuchsseils Typ 15 6x19S zZ

Aus den Messwerten werden schließlich die Drehmomentkonstanten c_1 , c_2 und c_3 nach (Feyrer 2000) für Formel (7) auf Seite 15 bestimmt, siehe Tabelle 4.

Drehmomentkonstante	Wert Prüfmuster	Literaturwert nach (Feyrer 2000)	Abweichung in %
c_1	0,106	0,132	19,7
c_2	0,127	0,177	28,2
$c_3 \cdot 10^3$	0,269	0,367	26,7

Tabelle 4: Ermittelte Drehmomentkonstanten

Die ermittelten Werte weichen von den bestehenden Literaturwerten ab, unter anderem deshalb, weil die Konstanten mit Blick auf die bei Seilbahnen im Feld vorgefundenen Schlaglängen unter größeren Verdrehwinkeln von $\pm 1080^\circ$ ermittelt wurden. Trotzdem weichen die Ergebnisse noch in den üblichen Größenordnungen von den Literaturwerten aus kleinen Verdrehwinkeln ab. Feyrer gibt Standardabweichungen von bis zu 23% an. Zudem bemerkt bereits Weber, dass die Konstanten bei Verdrehwinkeln oberhalb 180° auf einer Bezugslänge von $100d$ gegenüber der experimentellen Datenbasis abweichen können. Das vorliegende Prüfseil erfüllt somit die notwendigen Eigenschaften für die nachfolgenden Versuchsreihen.

4.2 Dauerbiegeversuche von Gleichschlagseilen unter Verdrehung

Der Dauerbiegeversuch stellt ein erprobtes Mittel zur Bestimmung von Lebensdauer kennwerten von Seilen unter bestimmten Lasten und Krümmungsverhältnissen beim Lauf über Scheiben dar. Dazu können Einflussparameter wie zum Beispiel Scheibenwerkstoff oder Schmiermittelzustand gezielt gewählt werden (Feyrer 2000). Durch Prüfung verdrehter Seile im Biegeversuch kann somit die Änderung der erwartbaren Seillebensdauer gegenüber dem unverdrehten Normalzustand unter Berücksichtigung statistischer Rahmenbedingungen ermittelt werden. Dies erlaubt eine zukünftige Abschätzung der (reduzierten) Lebensdauer von Seilbahnseilen unter Dralleinwirkung mit bleibender Verdrehung.

Aufbauend auf die Versuche von Weber (Weber 2013) wurden Gleichschlagseile vom Typ 6x19 Seale mit Fasereinlage als klassische Seilbahn-Seilkonstruktion unter Verwendung einer vorhandenen Verdrehvorrichtung bei diskreten Verdrehwinkeln in Dauerbiegeversuchen auf ihre Lebensdauer hin bis zum Bruch einer Litze geprüft, vgl. Abbildung 29 und Abbildung 30.

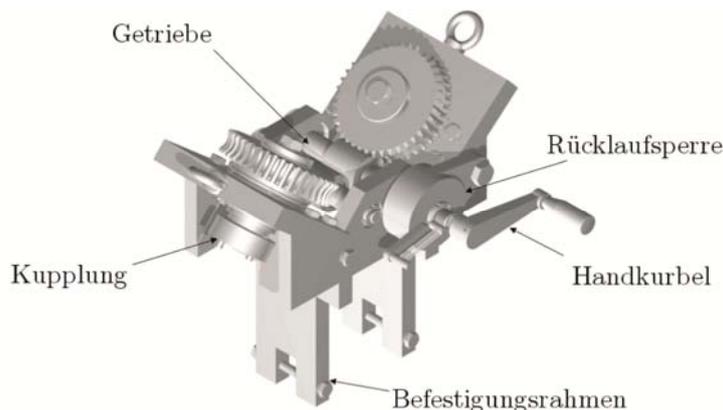


Abbildung 29: Verdrehvorrichtung nach (Weber 2013)

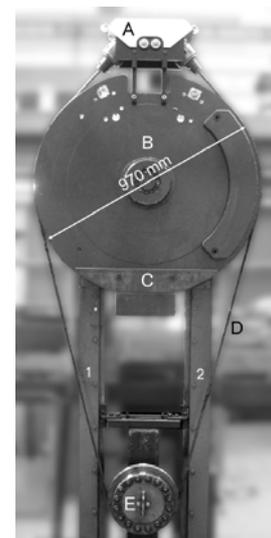


Abbildung 30: Einbau in Biegemaschine nach (Weber 2013)

Gegenüber den veränderlichen Verdrehwinkeln wurden die Versuchsparameter Scheibendurchmesser und Seildurchmesser konstant gehalten, so dass ergänzende Ergebnisse zur Arbeit von (Weber 2013) erzielt werden konnten. In Bezug auf die Seilkraft wurden zwei Laststufen untersucht, dabei wurde die überwiegende Anzahl der Versuche bewusst an der Größenordnung der realen durchschnittlichen Belastung eines

Seilbahnzugseils angelehnt. Aus dieser Annahme ergeben sich Versuchsreihe 1 mit einer durchmesserbezogenen Seilkraft von $S/d^2=100$ und die kleinere Versuchsreihe 2 mit $S/d^2=70$.

Die Geometrie und Verarbeitung der Versuchsscheiben wurde nach den üblichen Standards des Instituts sowie den Vorgaben der (Norm DIN 15020 Blatt 1) angesetzt. Sie wiesen einen gegenüber dem Seilnennendurchmesser um 6 % größeren Rillendurchmesser bei einem Öffnungswinkel von 60° auf. Das Material wurde im Bereich der Rille auf 60 HRC einsatzgehärtet, um ein plastisches Abdrücken des Seils und die daraus entstehende Kerbwirkung auf eventuell versetzt auflaufende Seildrähte zu minimieren. Die Prüfseile der Versuchsreihe 1 wurden jeweils fünffach unter folgenden Verdrehwinkeln ω , bezogen auf ein Hundertfaches des Seildurchmessers, getestet. Dies führt in Summe zu 35 durchgeführten Dauerbiegeversuchen. In der Versuchsreihe 2 wurde der Kurventrend unter der geringeren Laststufe durch Stichproben durchgeführt, hier erfolgten insgesamt 12 Dauerbiegeversuche. Die Kombination der Prüfparameter ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

Versuchs-Reihe	Seilkraft	Scheiben-durchmesser	$\omega 1$	$\omega 2_{a,b}$	$\omega 3_{a,b}$	$\omega 4_{a,b}$
1	22,5 kN ($S/d^2=100\text{N/mm}^2$)	300mm ($D/d = 20$)	$0^\circ / 100d$	$\pm 360^\circ / 100d$	$\pm 720^\circ / 100d$	$\pm 1080^\circ / 100d$
2	15,75 kN ($S/d^2=70\text{N/mm}^2$)	300mm ($D/d = 20$)	$0^\circ / 100d$	/	$\pm 720^\circ / 100d$	$\pm 1080^\circ / 100d$

Tabelle 5: Übersicht Versuchsreihen und Prüfparameter

Über ihre Lebensdauer hinweg wurden die Prüflinge nach geltenden Prüfstandards des IFT regelmäßig im Stillstand auf ihren sichtbaren Verschleißzustand hin untersucht und die Zwischenergebnisse dokumentiert.

Da erstmalig Gleichschlagseile mit Fasereinlage in dieser Form im Versuch getestet wurden, lag ein Augenmerk auf der Überprüfung der Richtigkeit der postulierten Seilgeometrien und des Lebensdauerhaltens. Folgende Parameter wurden dabei über die erwähnten Prüfstandards des IFT hinaus untersucht:

- die rechnerisch erwartbare Lebensdauer der unverdrehten Prüflinge zur Überprüfung der Eignung des gewählten Seils
- die Ist-Schlaglänge der verdrehten Prüflinge gegenüber der berechneten Schlaglänge zur Überprüfung des angepassten Formelwerks (vgl. Kapitel 6.2)
- das Drahtbruchbild zur Überprüfung des Versagensmechanismus

Anhand der gegebenen Versuchsdaten wurde die erwartbare Lebensdauer nach Feyrer für das unverdrehte Seil rechnerisch abgeschätzt (Feyrer 2011), vgl. Tabelle 6.

Art der Arbeitsspielzahl und statistische Sicherheit	Kurzzeichen	Anzahl Arbeitsspiele bzw. Maschinenzyklen
Höchstens 10% der Seile ablegereif	ZA10	43.300
50% der Seile ablegereif	ZAm	103.900
Höchstens 10% der Seile gebrochen	Z10	76.200
50% der Seile gebrochen	Zm	162.800

Tabelle 6: Nach Feyrer abgeschätzte erwartbare Lebensdauern der Prüflinge im unverdrehten Zustand

Die Ist-Schlaglänge aller Prüflinge wurde unter Belastung auf der Maschine durch Entnahme von Abdrücken dokumentiert und mit den rechnerischen Werten in Anlehnung an (Ernst 2012), vgl. §6.2, verglichen. Die Messmethode umfasst das Auflegen von Millimeterpapier auf die Seiloberfläche in axialer Richtung, auf dem durch sanften Druck z.B. mit einer Bleistiftmine das Oberflächenmuster des Seils abgenommen werden kann. Anhand des Abdruckbildes können die Übergänge der Litzen identifiziert und die Schlaglänge markiert und ausgemessen werden, vgl. Abbildung 31. Zur Minderung des Ablesefehlers der händischen Messung werden üblicher Weise mehrere Schlaglängen abgebildet und das Messergebnis durch die Anzahl redundanter Abschnitte geteilt. Die Methode stellt ein einfaches, anerkanntes und ausreichend akkurates Mittel zur Schlaglängenbestimmung dar und wird seit Jahrzehnten im Laborbetrieb des IFT Universität Stuttgart eingesetzt.

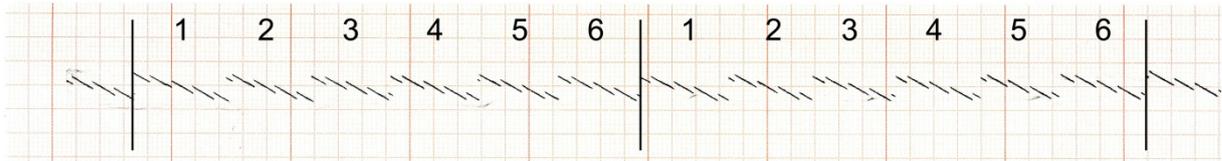


Abbildung 31: Beispiel einer Schlaglängenmessung durch Entnahme von Abdrücken

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 32 zeigt die ermittelten Ist-Schlaglängen der Prüflinge aller sieben Versuchsstufen zwischen $-1080^{\circ}/100d$ und $+1080^{\circ}/100d$. Die gemessenen Werte stimmen gut mit den berechneten Schlaglängen überein, die mittlere Abweichung der Ist-Werte zu den Nennwerten liegt bei 1,1 %. Ein Übertrag der experimentell ermittelten Werte auf eine Theorie zur Beurteilung der Lebensdauer von verdrehten Seilbahnseilen ist somit bei vernachlässigbarem Fehler zwischen Geometrieberechnungen und realem Verdrehen des Seils möglich.

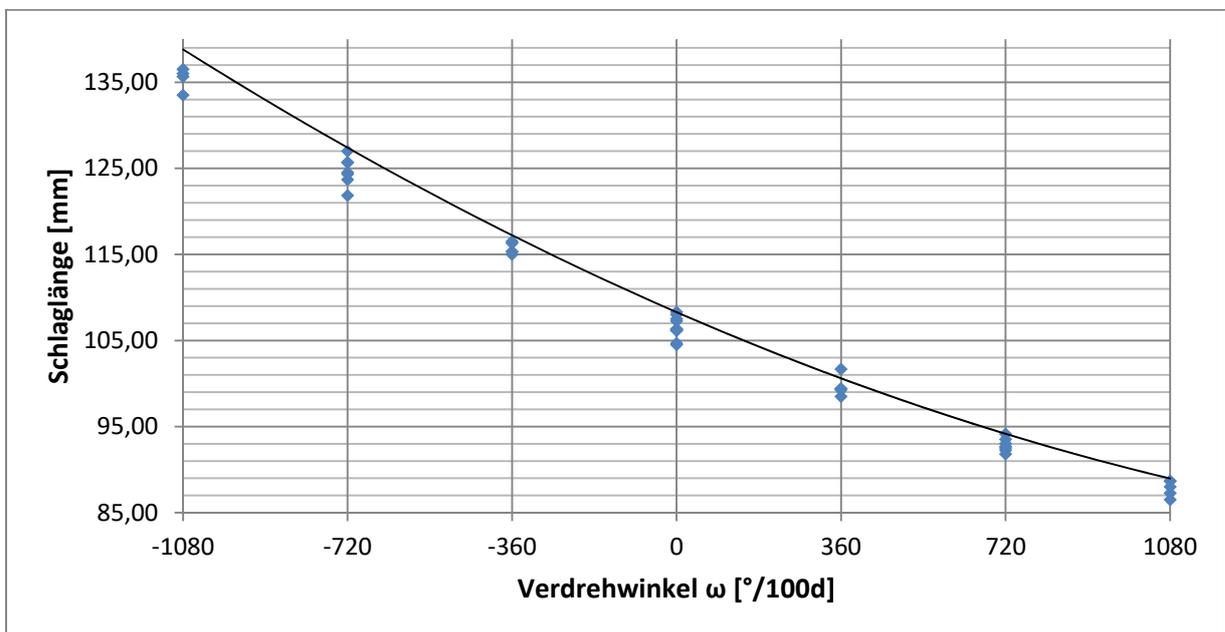


Abbildung 32: Ist-Schlaglängen aller Prüflinge gegenüber den rechnerisch ermittelten Nennschlagwinkeln bei diskreten Verdrehstufen

Nach Abschluss der ersten Dauerbiegeversuche wurden zudem stichprobenhaft Drahtbruchenden der verdreht geprüften Seilmuster mit einem Digitalmikroskop untersucht, um Ermüdung und Dauerbrüche als Versagensursache der Prüflinge bestätigen zu können. Ein Ermüdungsbruch von Seildrähten wächst grundsätzlich von der Drahtoberfläche über eine Vielzahl von Beanspruchungszyklen in den Draht hinein, so dass eine nahezu ebene Anrissfläche quer zur Drahtachse entsteht. Bei fortgeschrittenem Risswachstum bricht der noch tragende Restquerschnitt gewaltsam annähernd spröde, was sich in einer grobkörnig

geformten Restbruchfläche äußert (Meebold 1959; Verreet 2005). Die Ergebnisse der Mikroskopuntersuchungen zeigen, dass die Bruchmechanischen Umstände der Ermüdung gegeben sind und die Dauerbiegeversuche somit als gültig betrachtet werden können vgl. Abbildung 33. Durch die Verdrehung und experimentelle Verschärfung der Prüfsituation in Form des Durchmesserverhältnisses und Scheibenwerkstoffs gegenüber der Seilbahn tritt keine Verfälschung auf, so dass die Ergebnisse für die weitere Aufbereitung verwendet werden können.



Dauerdrahtbruch bei $-1080^{\circ}/100d$



Dauerdrahtbruch bei $-1080^{\circ}/100d$



Dauerdrahtbruch bei $+1080^{\circ}/100d$



seltener Gewaltbruch mit Einschnürung bei $+360^{\circ}/100d$

Abbildung 33: ausgewählte Beispiele vorgefundener Drahtbrüche aus den Dauerbiegeversuchen

4.3 Ergebnisaufbereitung und Diskussion

Die benötigten Bruchbiegewechselzahlen ergeben sich aus den genannten Abbruchbedingungen direkt aus den Endergebnissen der einzelnen Biegeversuche. Das Erreichen der Ablegereife wird im vorliegenden Projekt hingegen nach dem Entwurf der neuen europäischen Norm für Seilbahnseile prEN12927:2016 angegeben, die in § 9.2.2.1 in Tabelle 11 der Norm für rein äußerlich inspizierte Gleichschlagseile Grenzwerte festlegt (Norm prEN 12927), siehe Tabelle 7. Die angegebenen Prozentwerte des maximal zulässigen Querschnittsverlusts der Seilkonstruktion 6x19 Seale wurden zusätzlich in äquivalente Anteile gebrochener Außendrähte umgerechnet¹⁵.

¹⁵ Gemäß den Geometriedaten nach (Feyrer 2000) entspricht der Anteil eines Außendrahts der Konstruktion 6x19 Seale am tragenden Gesamtquerschnitt 1,27 %.

Bezugslänge	Max. erlaubter metallischer Querschnittsverlust bei Sichtprüfung prEN 12927:2016	Äquivalenter Anteil gebrochener Außendrähte (6x19 Seale)
6xd	3,00 %	2,36
30xd	5,00 %	3,93
25xd (für Versuch interpoliert)	4,58 %	3,61

Tabelle 7: Ablegekriterien bei Sichtprüfung nach prEN 12927:2016 und Umrechnung auf Versuchskonfiguration

Die Drahtbruchentwicklung von Drahtseilen folgt bei reiner Ermüdung grundsätzlich einem exponentiellen Trend, der sich in logarithmischer Darstellung der Drahtbruchentwicklung über der Beanspruchungsdauer durch eine Gerade abbilden und voraussagen lässt (Pernot et al. 2016). Gemäß dieser Grundlage werden die dokumentierten Drahtbruchentwicklungen der Versuchsreihen 1 und 2 auf den Referenzlängen 6 x Seildurchmesser und 25 x Seildurchmesser der Dauerbiegeversuche gemittelt und entsprechend mit exponentiellen Ausgleichsfunktionen analysiert. Aus diesen Funktionen werden Ablegedrahtbruchzahlen für die Referenzlängen bei Erreichen des äquivalenten Anteils an gebrochenen Außendrähten bestimmt.

Versuchsreihe 1 – durchmesserbezogene Seilzugkraft $S/d^2=100$

Mit der durchmesserbezogenen Seilzugkraft von $S/d^2=100 \text{ N/mm}^2$ wurden insgesamt 35 Dauerbiegeversuche gefahren. Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt eine Zusammenfassung der Bruchbiegewechselzahlen und der interpolierten Ablegedrahtbruchzahlen. Abbildung 34 schließlich zeigt die Versuchsergebnisse, die interpolierte mittlere Biegewechselzahl bei Ablegereife und deren Ausgleichskurven.

Verdrehungs-konfiguration	Mittlere Biege-wechselzahl bei Bruch	Mittlere Biege-wechselzahl bei Ablegereife auf 6xd	Mittlere Biege-wechselzahl bei Ablegereife auf 25xd	Mittlere Biege-wechselzahl bei gemittelter Ablegereife
-1080° / 100xd	50.900	38.300	40.800	39.600
-720° / 100xd	52.200	45.100	43.200	44.100
-360° / 100xd	56.400	46.100	46.900	46.400
0° / 100xd	75.800	61.800	64.600	63.200
+360° / 100xd	71.300	58.400	56.300	57.300
+720° / 100xd	79.000	53.600	57.900	55.700
+1080° / 100xd	81.700	61.700	55.700	58.700

Tabelle 8: Bruchbiegewechselzahlen und interpolierte Ablegedrahtbruchzahlen der Versuchsreihe 1 mit $S/d^2=100$

Wie Abbildung 34 zeigt, erlauben die Versuche eine Annäherung durch eine Trendlinie und können zu einem Modell ausgewertet werden. Die Bruchbiegewechselzahlen streuen in seiltypischer Intensität, die erfahrungsgemäß und Abhängig von der Versuchskonfiguration im Bereich von 20% liegt.

In Bezug auf die Ablegereife wurden anhand der Versuchsprotokolle Mittelwerte für beide Bezugslängen 25xd und 6xd gebildet. Wie im Diagramm zu sehen folgen sich beide Ausgleichskurven „Poly. (NA 25d)“ und „Poly. (NA 6d)“ in geringem Abstand, so dass zusammenfassend eine gemittelte Trendlinie die Ablegereife unabhängig von der Bezugslänge gebildet wird, siehe Linie „Poly. (NA quer)“.

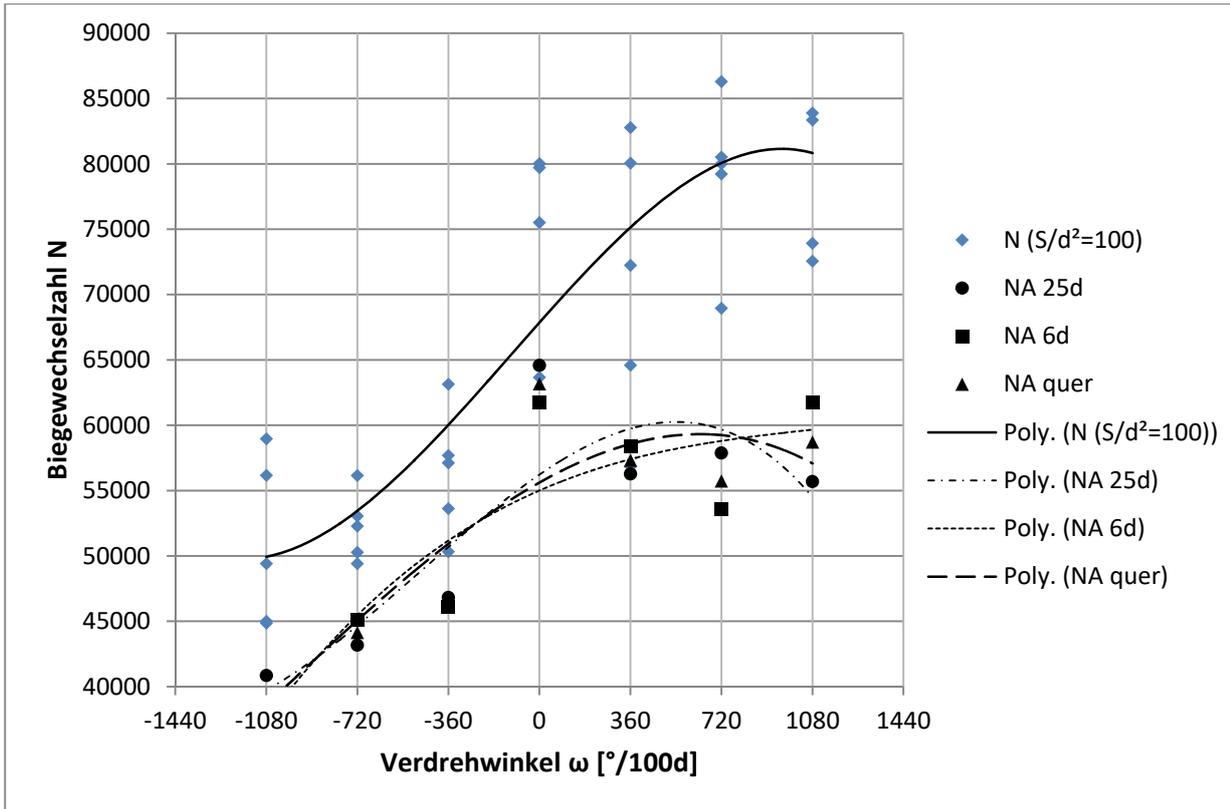


Abbildung 34: Ergebnisse Versuchsreihe 1
Bruch- und Ablegebiegezahl bei diskreten Verdrehwinkeln und $S/d^2=100$

Im unverdrehten Zustand erreichen die Prüflinge sowohl in Bezug auf die Ablegereife als auch auf den Bruch den durch die Methode Feyrer abgeschätzten statistisch erwartbaren Bereich. Die Seile wurden im Versuch wie am IFT üblich nicht bis zum vollständigen Bruch gefahren, sondern nur bis zum Bruch einer Litze mit sich entsprechend ausbildenden Korkenzieher (vgl. Abbildung 35 bis Abbildung 37). Dies ist im Versuchsbetrieb üblich, da die plastische Verformung der Prüflinge so stark zunimmt, dass ein Weiterfahren mit den Maschinen nicht sinnvoll möglich ist. Da sich die exponentiell verlaufende Schadensentwicklung der Prüflinge im weit fortgeschrittenen Zustand befindet und somit über den Belastungszyklen steil ansteigt, ist der vollständige Bruch in einer vernachlässigbar kleinen Anzahl weiterer Biegezyklen zu erwarten.



Abbildung 35: Versuchsende bei Litzenbruch, Drähte sind zur Mikroskopie markiert ($+1080^\circ/100d$)



Abbildung 36: Versuchsende bei Litzenbruch, Drähte sind zur Mikroskopie markiert (-1080°/100d)



Abbildung 37: Versuchsende bei ausgebildetem Korkenzieher (+1080°/100d)

Im **zugedrehten Zustand** (positiver Winkelbereich im Diagramm) halten die Prüflinge in Bezug auf den **Bruch** die Lebensdauerleistung des unverdrehten Zustands, einzelne Versuche erreichen sogar höhere Werte. Durchschnittlich werden hier bei +1080°/100d bis zum Bruch maximal 8% mehr Biegewechsel erreicht als im unverdrehten Zustand. Dieser Effekt ist bekannt (Verreet 1996) und unter anderem dadurch zu erklären, dass bei verkürzter Schlaglänge mehr Litzen im Eingriff der Scheibe liegen und somit Querpressungen durch Biegung besser verteilt werden können. Durch den erhöhten Schlagwinkel steigt die Drahtspannung und die vom Draht eingenommene Länge im Seilverband (Ernst 2012; Feyrer 2000), wodurch zwar eine höhere Zugbelastung des Drahtes entsteht, jedoch Querpressungen gegenüber der Drahtzugspannung zurücktreten. Dieser Effekt ist in ähnlicher Form auch im sogenannten Querlastverhältnis zwischen der Gewichtskraft des Fahrzeugs und der Spannkraft des Trageisls bei der Auslegung von Seilbahnen zu berücksichtigen (Norm DIN EN 12927-2) und hat nennenswerte Auswirkung auf die Lebensdauer der Drähte im Seil (Staffler und Innerhofer 1996). Die **Ablegereife** hingegen wird bei zugedrehtem Seil geringfügig früher erreicht als im unverdrehten Zustand, durchschnittlich reduziert sich hier die Lebensdauer bei +720°/100d um maximal 12% gegenüber dem unverdrehten Zustand. Dies kann unter anderem dadurch erklärt werden, dass mehr Litzen bzw. Einzeldrähte im Verschleißbereich der Biegezone liegen und somit statistisch gesehen mehr Drähte auf den Bezugslängen ermüden können. Der Abstand zwischen dem von außen sichtbaren Erreichen der Ablegereife und dem Seilbruch ist vergleichsweise hoch, so dass von einer sicheren, rechtzeitigen Erkennung der Ablegereife ausgegangen werden kann.

Im **aufgedrehten Zustand** (negativer Winkelbereich im Diagramm) brechen die Werte sowohl für die **Bruchbiegewechselzahlen** als auch für die **Ablegereife** gegenüber dem unverdrehten Seil ein und nähern sich zusätzlich einander an. Bei -1080°/100d ist bis zum Bruch eine Lebensdauerreduktion von ca. 30% gegenüber dem unverdrehten Zustand zu verzeichnen, die Ablegereife bricht um maximal 37% ein. Der Bruch folgt der erkennbaren Ablegereife in vergleichsweise kurzem Abstand, so dass von einer reduzierten

Sicherheitslage ausgegangen werden muss. Zum einen kann die bereits bekannte, analog zum zugedrehten Seil geführte Erklärung herangezogen werden, dass nun weniger Litzenkuppen in Eingriff mit der Prüfscheibe kommen und somit erhöhte Pressungen vorliegen. Zudem kann die frühe Ablegereife und der vorzeitige Bruch zusätzlich durch die Entwendelung des Seilverbands begründet werden, aus der zwangsläufig eine Destabilisierung und Ovalisierung des Querschnitts mit daraus erfolgender Litzenberührung entstehen muss. Während die Drahtzugspannungen durch den reduzierten Schlagwinkel sinken, können sich die Querpressungen im Seilinnern stärker auswirken, sodass die Drähte zusätzlich beansprucht werden. Dies kann durch die beiden folgenden Untersuchungen belegt werden.

Die erhöhte Ovalisierung des Seilverbands spiegelt sich in den Versuchsprotokollen der periodischen **Überwachung des Seildurchmessers** wider. Prinzipiell wird der Seildurchmesser im gleichen Abschnitt zweifach, 90° zueinander versetzt gemessen (Norm ISO 4309). Am IFT ist es üblich, die Maße in jenen Achsen am Seil abzunehmen, die während des Biegevorgangs der radialen und axialen Richtung zur Prüfscheibe entsprechen. Somit werden durch die Durchmesserwerte exakt die Haupt- und Nebenachse des elliptischen Querschnitts des ovalisierten Seils abgebildet. Die nachfolgende Abbildung 38 zeigt beispielhaft die Durchmesserwerte der um jeweils 1080° auf- bzw. zugedrehten Prüflinge. Während die Durchmesser des aufgedrehten, somit destabilisierten Seils (graue Punkte) vergleichsweise weit auseinander liegen, liegen die Durchmesser beim zugedrehten Seil näher beieinander. Gegenüber dem durchschnittlichen Seil-Istdurchmesser¹⁶ variiert die Rundheit des aufgedrehten Seils um ca. 6% mit steigender Tendenz zum Versuchsende hin. Beim zugedrehten Seil schwankt die Rundheit dagegen um 2% gegenüber dem mittleren Seildurchmesser. Es liegt also eine nennenswert größere Ovalität des aufgedrehten Seils gegenüber dem zugedrehten Seil vor.

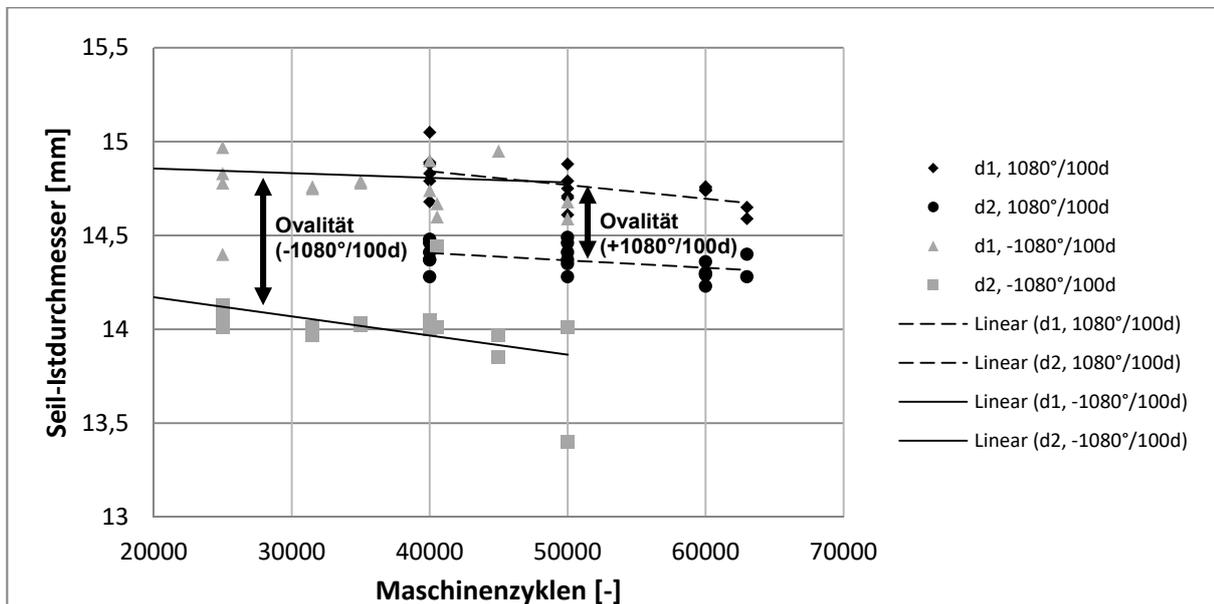


Abbildung 38: Versuchsreihe 1 – Ovalität am Beispiel der um 1080°/100d zu- und aufgedrehten Prüflinge

Um die Vermutung der vorauseilenden inneren Schädigung durch Litzenberührung zu verifizieren, wurde ein Versuch mit einem um -720°/100d aufgedrehten Seil nur bis 45.000 Maschinenzyklen gefahren. Das Seil wurde somit noch vor der Entwicklung äußerlich sichtbarer Drahtbruchhäufungen abgelegt, geöffnet und einer **Mikroskop-Untersuchung an den Litzenberührungspunkten** unterzogen. Die Biegezonen des Prüflings zeigen sichtbare Abschürfungen, Anrisse und Drahtbrüche im Bereich der Litzengasse. Dies weist eindeutig

¹⁶ Mittelwert aus beiden um 90° versetzt gemessenen Seildurchmessern

auf eine aktive Berührung der Litzen während des Biegevorgangs hin, vgl. Abbildung 39 und Abbildung 40.



Abbildung 39: Abschürfung mit Drahtbruch im Bereich der ehemaligen Litzengasse des aufgedrehten Seils

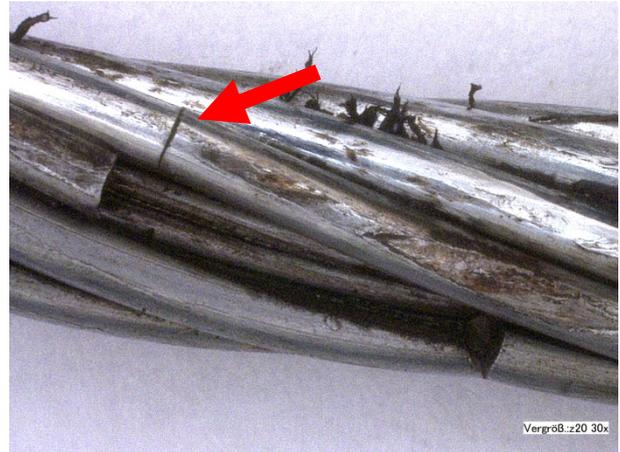


Abbildung 40: Abschürfungen, Anriss (Pfeil) und Drahtbruch im Bereich der ehemaligen Litzengasse des aufgedrehten Seils

Versuchsreihe 2 – durchmesserbezogene Seilzugkraft $S/d^2=70$

In Versuchsreihe 2 wurden zur Untersuchung des Seilkräfteinflusses 12 begleitende Versuche mit einer niedrigeren durchmesserbezogenen Seilkraft von $S/d^2=70$ gefahren. Die Bruchbiegewechselzahlen und aus der Schadensentwicklung interpolierten Biegewechselzahlen bei Erreichen der Ablegereife sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Verdrehungs-konfiguration	Mittlere Biege-wechselzahl bei Bruch	Mittlere Biege-wechselzahl bei Ablegereife auf 6xd	Mittlere Biege-wechselzahl bei Ablegereife auf 25xd	Mittlere Biege-wechselzahl bei gemittelter Ablegereife
-1080° / 100xd	74.400	66.600	68.600	67.600
-720° / 100xd	83.900	69.800	72.800	71.300
-360° / 100xd	96.400	63.400	61.300	62.300
0° / 100xd	135.400	84.200	96.500	90.400
+720° / 100xd	139.800	106.100	110.300	108.200
+1080° / 100xd	115.800	67.700	89.800	78.800

Tabelle 9: Gemittelte Ergebnisse der Dauerbiegeversuche mit $S/d^2=70$

Abbildung 41 zeigt die Versuchsergebnisse, die interpolierte mittlere Biegewechselzahl bei Ablegereife und deren Ausgleichskurven. Die Tendenz der niedrigen Lebensdauerleistung bei aufgedrehtem Seil bleibt qualitativ erhalten, überschlägig entsprechen sich somit die verschiedenen Verdrehzustände der beiden Versuchsreihen. Bis zum **Bruch** wächst die Lebensdauer im zugeordneten Zustand hier um 3%, während sich die Werte im aufgedrehten Zustand um maximal 45% reduzieren. Mit Blick auf die **Ablegereife** konnte im Versuch durch Zudrehen eine Lebensdauersteigerung gegenüber dem unverdrehten Zustand von 20% erzielt werden, während durch Aufdrehen bis zu 45% Verlust registriert werden konnten. Erneut reduziert sich der Abstand zwischen Ablegereife und Bruch im aufgedrehten Zustand, so dass sich das verminderte Sicherheitsniveau in Bezug auf die rechtzeitige Erkennbarkeit des Schadenslevels bestätigt. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe können somit zur Regressionsrechnung verwendet werden.

Nicht im Umfang der Seilprüfungen enthalten ist der Größeneinfluss durch das Durchmesser Verhältnis D/d . Der Einfluss des Durchmesser Verhältnisses auf die Ermüdung der Seildrähte ist grundsätzlich hinreichend bekannt und wird mittels einer Ähnlichkeitsbetrachtung aus den Ergebnissen der Grundlagenforschung des IFT Universität Stuttgart berücksichtigt. Wie durch Mikroskopie nachgewiesen wurde, liegt der

Lebensdauerabfall bei den aufgedrehten einlagigen Litzenseilen mit Fasereinlage in der Drahtschädigung durch Ovalisierung des Seilverbands.

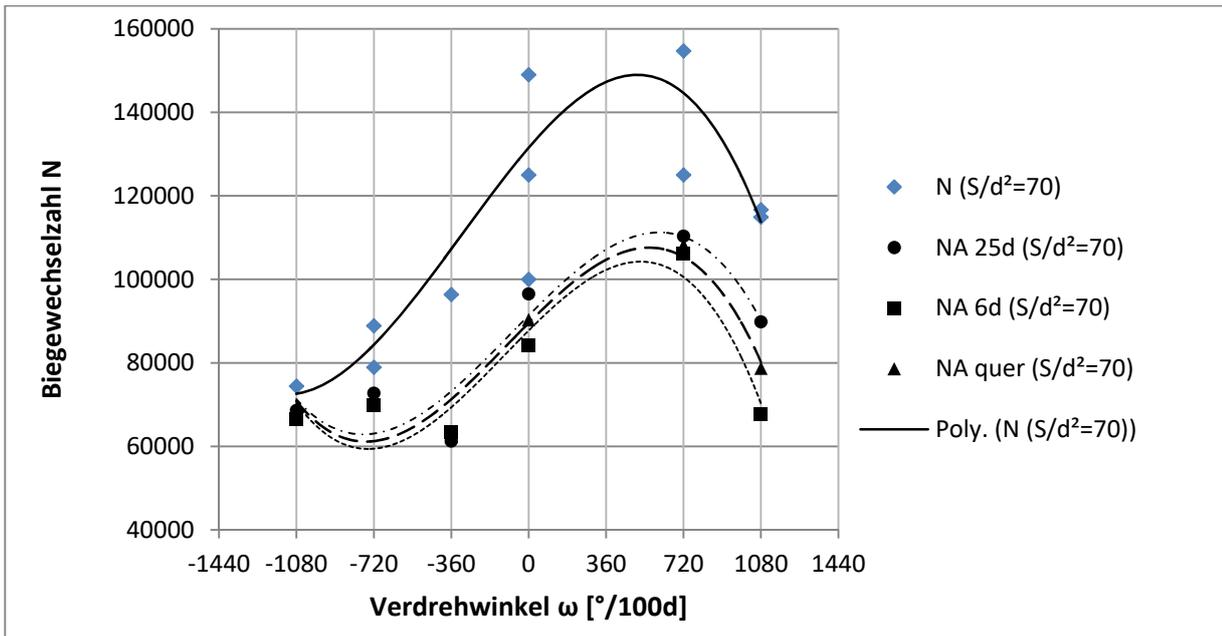


Abbildung 41: Ergebnisse Versuchsreihe 2
Bruch- und Ablegebiegewechselzahlen bei diskreten Verdrehwinkeln und $S/d^2=70$

Durch die Experimente konnte die nennenswerte Auswirkung von Seiverdrehung insbesondere im aufgedrehten Zustand nachgewiesen werden. Um diese rechnerisch nutzen zu können, werden die Versuchsergebnisse im folgenden statistisch ausgewertet und für die Lebensdauerrechnung nach Feyrer aufbereitet, so dass eine Vorrassage der Lebensdauer von Seilbahnseilen in verdrehtem Zustand möglich wird.

4.4 Lebensdauerfaktoren nach Feyrer

Aus den Ergebnissen der Biegeversuche werden nun ergänzende Faktoren für das Feyrer-Polynom ermittelt. Die Gleichung besteht grundlegend aus einem Polynom vom Typ $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots$, das relevante Seildaten wie Durchmesser oder Drahtnennfestigkeit enthält sowie die anwendungsbezogenen Faktoren a_i .

Im DFG Projekt 2187/24-1 (Wehking und Weber 2012) wurden bereits Faktoren für verdrehte Seile eingeführt, jedoch für den Einsatzbereich in industrieller Kran- und Fördertechnik und ohne die hier relevanten Gleichschlagseile mit Fasereinlage zu berücksichtigen. Die zugehörige Formel lautet nach (Weber 2013):

$$\lg N_\omega = a_0 + \left(a_1 + a_3 \cdot \lg \frac{D}{d} \right) \left(\lg \frac{S}{d^2} - 0,4 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} \right) + a_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_l + b_0 \cdot \omega + b_1 \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{Sd_0^2}{d^2 S_0} \right) + b_2 \cdot \omega^3 \cdot \frac{D}{d} \quad (9)$$

Mit:	N_ω	erreichbare Biegewechsel unter Verdrehung
	D	Scheibendurchmesser [mm]
	d	Seildurchmesser [mm]
	S	Seilkraft [N]
	a_i, b_i & f_i	Konstanten und Einflussfaktoren zur Berechnung der Seillebensdauer
	ω	Verdrehwinkel [rad]
	R_0	Seilnennfestigkeit [N/mm ²]
	S_0, d_0	Hilfsgrößen, die den Ausdruck „ S/d^2 “ dimensionslos werden lassen

Zuerst wurde versucht, die Ergebnisse der Biegeversuche nach Möglichkeit in der gleichen Form abzubilden, um das Modell von Weber zu erweitern und allgemeiner nutzbar zu 32

machen. Der Grundanteil des Feyrer-Polynoms bleibt erhalten. Es werden ausschließlich Faktoren für den zusätzlichen Drehungsrelevanten Teil des Polynoms ermittelt.

Es zeigte sich, dass das Modell nach Weber zwar in der Lage ist, die Versuchsergebnisse ausreichend treu abzubilden, bei Skalierung der Einflussfaktoren auf den realen Einsatzfall von Seilbahnen mit großen Biegeverhältnissen D/d^{17} im Bereich von 80 jedoch zum Aufschwingen neigt und surreale Ergebnisse erzeugen kann. Dies ist dem Glied dritter Ordnung des Polynoms zuzuschreiben, auf das der D/d -Anteil bei großen Scheiben starken Einfluss nimmt (vgl. Formel (9)).

Es wurde daher durch Überprüfung verschiedener Normierungsstrategien der Versuchsergebnisse ein angepasstes Polynom entwickelt, das die Versuchskurven sowohl aus den vorliegenden Versuchen als auch aus ähnlichen Ergebnisformen von Weber¹⁸ gerecht wird und eine praxisnahe Modellbildung des D/d -Einflusses für Seilbahnen erlaubt. Die mit der klassischen Methode nach Feyrer berechnete Lebensdauer bei unverdrehtem Seil bildet auf Basis der Ähnlichkeitsbetrachtung zu Weber den D/d -Anteil ausreichend genau ab.

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

$$+ b_0 \cdot \left(\frac{\omega}{S d_0^2} \right) + b_1 \cdot \left(\frac{\omega}{S d_0^2} \right)^2 + b_2 \cdot \left(\frac{\omega}{S d_0^2} \right)^3 \quad (10)$$

Faktoren in Bezug auf Seilbruch

Für die vorliegende Versuchsreihe sind die Ergebnisse der Regression in Bezug auf den Seilbruch in Tabelle 10 zusammengefasst.

Konstante	b0	b1	b2
Wert	0,8022	-2,5351	-6,1300

Tabelle 10: Konstanten des Polynoms für Seile Typ 6x19S-FC zZ in Bezug auf den Seilbruch

Zum Vergleich mit den Ergebnissen nach Weber wird zudem in gleicher Art die logarithmische Standardabweichung $\lg s$ sowie das Bestimmtheitsmaß B ermittelt (Schönherr 2005; Weber 2013), welche die Qualität der Ausgleichskurve klassifizieren. Die zugehörigen Formeln lauten:

$$\lg s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg N_{i,\omega})^2}{n - p - 1}} \quad (11)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_{i,w} - \lg N_{i,w}^-)^2}{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg N_{i,w}^-)^2} \quad (12)$$

Die Werte für $\lg s$ und B werden in nachfolgender Tabelle 11 angegeben.

Maß	$\lg s$	B
Wert	0,1050	0,8441

Tabelle 11: Logarithmische Standardabweichung und Bestimmtheitsmaß zur Auswertung „Seilbruch“

¹⁷ Verhältnis des Scheibendurchmessers D zum Seildurchmesser d

¹⁸ Bsp. Versuchsergebnisse Seilkonstruktion 8x19W-IWRC 1770 sZ U

Das Bestimmtheitsmaß liegt mit 0,84 über 80% und kann als ausreichend gut bezeichnet werden. Die Standardabweichung kann ebenfalls als ausreichend gut bezeichnet werden.

Faktoren in Bezug auf Ablegereife

Für die vorliegende Versuchsreihe sind die Ergebnisse der Regression in Bezug auf die Ablegereife in Tabelle 12 zusammengefasst.

Konstante	b0(A)	b1(A)	b2(A)
Wert	0,8018	-1,7440	-9,4568

Tabelle 12: Konstanten des Polynoms für Seile Typ 6x19S-FC zZ in Bezug auf die Ablegereife

Die Werte für lg s und B werden in nachfolgender Tabelle 13 angegeben.

Maß	lg s	B
Wert	0,2124	0,9505

Tabelle 13: Logarithmische Standardabweichung und Bestimmtheitsmaß zur Auswertung „Ablegereife“

Das Bestimmtheitsmaß liegt mit 0,95 weit über 80% und kann als sehr gut bezeichnet werden. Die Standardabweichung liegt wie schon bei Weber in einem erhöhten Bereich. Da dieses Phänomen im experimentellen Umfeld von Stahlseilen üblich ist, kann das Ergebnis der Auswertung durch Regression als gültig betrachtet werden.

Festlegung der Seilbiegelänge bei der Untersuchung von Seilbahnen

Feyrer beschreibt einen Einfluss der Biegelänge auf die erwartbare Biegewechselfestigkeit eines Seils und weist diese im Experiment nach, so dass nach heutigem Stand der Berechnungsmethode ein Reduktionsfaktor für die Seilbiegelänge zu berücksichtigen ist (Feyrer 2000). Begründet werden kann dieser Effekt durch ein mit der zu betrachtenden Seillänge statistisch wachsendes Risiko von Material- und Herstellungsschwankungen, die sich in Form von beschleunigtem Verschleiß und lokal rascher Drahtbruchentwicklung auswirken können. Zu beachten ist jedoch, dass diese Faktoren mit Dauerbiegemaschinen ermittelt wurden, die nur Verfahrenswege und somit Biegelängen von ca. 4,0 m realisieren können. Für größere Seilbiegelängen stehen somit nur extrapolierte Kennwerte zur Verfügung. Da Seilbahnen in Realität Biegelängen von hunderten Metern bis zu mehreren Kilometern realisieren, führt jener Umstand in der Fachwelt bei Lebensdauerabschätzungen oft zu kontroversen Diskussionen, da Seile bei großen Biegelängen in der Berechnung geringere Lebensdauerwerte erzielen als die Erfahrungswerte mit bestehenden Seilbahnanlagen zeigen. Es gilt, eine sinnvolle theoretische Biegelänge für Seilbahnseile zu bestimmen. Daher wird im Folgenden der Lebensdauerabfall über die Biegelänge für drei realistische Seildurchmesser und –Konstruktionen bei system-üblicher Belastung dargestellt. Die verwendeten Berechnungsdaten lauten wie folgend in Tabelle 14 angegeben:

Parameter	Wert		
Seilnennndurchmesser [mm]	20	30	45
Seilkonstruktion	6x19S	6x19S	6x36WS
	FC 1960 zZ		
Sicherheitsfaktor (Nennbetrieb)	5,0		
D/d-Verhältnis nach DIN EN 12927-2	80		

Tabelle 14: Berechnungsdaten zur Festlegung der Seilbiegelänge

Aus den Ergebnissen wurden Ausgleichskurven der Seillebensdauern mit Hilfe des in Kapitel 6.2 ermittelten Schlaglängenfaktors auf Vielfache der Seilschlaglängen als Biegelänge bezogen, um eine allgemeingültigere Aussage über die Biegelänge für die Lebensdauerberechnung von Seilbahnseilen treffen zu können (vgl. Abbildung 42). In Bezug auf die Schädigung und das Tragkraftverhalten hat die Seilschlaglänge einen besonderen Einfluss, da an schadhafte Stellen gebrochene Drähte über den Seilschlag und die aus der Verwindung entstehenden Reibkräfte wieder tragen können. Bei bewegten

Gleichschlagseilen werden nach (Meebold 1959) sechs Schlaglängen angenommen, bis ein unter Gleitreibung beanspruchtes gebrochenes Drahtende wieder vollständig trägt.

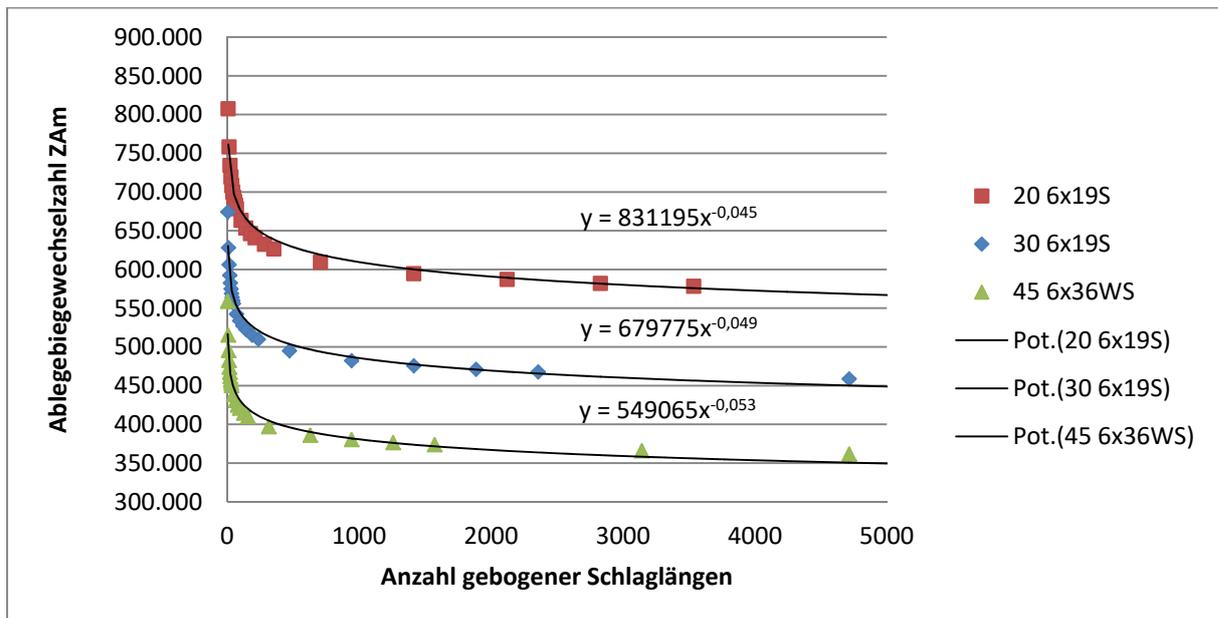


Abbildung 42: Theoretische Ablegiebewechselzahlen ausgewählter Seilbahn-Seile über der Anzahl der gebogenen Schlaglängen

Wie die Diagramme zeigen, tendiert der Lebensdauerabfall über die Biegelänge asymptotisch gegen Null. Die nun vorliegenden Ausgleichskurven über der Seilschlaglänge werden abschließend abgeleitet, und als Grenzsteigung für eine sinnvolle Lebensdauerabschätzung jene Anzahl Schlaglängen gewählt, zu der gegenüber der maximal erreichbaren Seillebensdauer bei 1 m Biegelänge die Steigung des Lebensdauerabfalls unter 1 ‰ fällt. Als ganzzahlige Grenze, die diesen Anspruch erfüllt, wird folgend eine Biegelänge $L_{b,1‰}$ von

$$L_{b,1‰} = 45 \cdot L_L = 45 \cdot (7,07 \cdot d) \approx 320 \cdot d \quad (13)$$

festgelegt und für die Weiterführung der mathematischen Betrachtungen verwendet.

Mit der angepassten Feyrer'schen Lebensdauerrechnung für verdrehte Gleichschlagseile können nun bei Kenntnis des sich einstellenden Verdrehwinkels bzw. Messung der verbleibenden Schlaglänge die Lebensdauern von Zug- und Förderseilen im Seilbahnbereich prognostiziert werden. Übertragen auf die Biegeverhältnisse von $D/d=100$ und betrieblichen Sicherheitsfaktoren von Seilbahnanlagen in der Größenordnung 5 bis 6 werden im vorliegenden neuen Rechenmodell gegenüber den verschärften Versuchen im aufgedrehten Zustand bei $-1080^\circ/100d$ Lebensdauerreduktionen im Labor in der Größenordnung von 30% gegenüber dem unverdrehten Zustand ausgegeben.

In der vorliegenden Abhandlung wird die Lebensdauerrechnung jedoch in den nachfolgenden Kapiteln kombiniert in einem Gesamtmodell zur Beurteilung eines Seilbahnseils herangezogen.

5 Erweitertes theoretisches Modell der Seildrehung

Wie bereits in Kapitel 3.1 in der Analyse bestehender Literatur festgestellt wurde, können die existierenden Forschungsergebnisse und Rechenansätze zur theoretischen Seildrehung alleine das Seilverhalten in der Praxis nicht abbilden. Die Erfahrungen aus der Prototypenentwicklung des digitalen Drehsensors bestätigen dies. Im Folgenden werden methodisch Parameter herausgearbeitet und soweit möglich auf Basis der bestehenden Modelle z.B. nach (Engel 1966; Feyrer 2000; Kollros 1974; Wehking und Weber 2012; Weber 2013) mathematisch weiterentwickelt. Der daraus entstehende Formelbaukasten erlaubt die Abbildung der mechanischen Komponenten einer Seilbahn, so dass anlagenabhängig Drehmomentverursacher berechnet und somit Rückschlüsse auf die erwartbare Drehung gezogen werden können. Durch spätere Einbeziehung des Sensors zur Messung von Seildrehung kann das umfangliche theoretische Modell in den darauffolgenden Kapiteln überprüft beziehungsweise ergänzt werden.

Wichtige Anforderung an diesen Punkt ist, dass die Seilkraft,- Moment- und Drehungsermittlung so nah wie möglich der Seilbahnauslegung nach geltenden Ingenieurwissenschaften folgt, jedoch durch Dritte anwendbar ist. Daher sollen die Berechnungsschritte bereits mit wenigen Kenngrößen der Anlage auskommen können. Zu diesen Kenngrößen gehören:

- **Seil:** Nenndurchmesser, Konstruktion, Schlagrichtung und Mindestbruchkraft
- **Fahrzeug:** Fassungsvermögen
- **Mechanische Einrichtungen:** Lage von Antrieb- und Spannstation sowie Umschlingungswinkel am Antrieb
- **Seillinie,** beziehungsweise Feldgeometrie: Gesamthöhenunterschied sowie x- und y-Koordinaten der Stationen und Stützen

Entsprechend dieser Forderung kann eine bestehende Anlage gleichwie ein sich noch in der Planung befindliches System bei Kenntnis weniger Daten und des Längenprofils¹⁹ wie in Abbildung 43 gezeigt bereits analysiert und beurteilt werden.

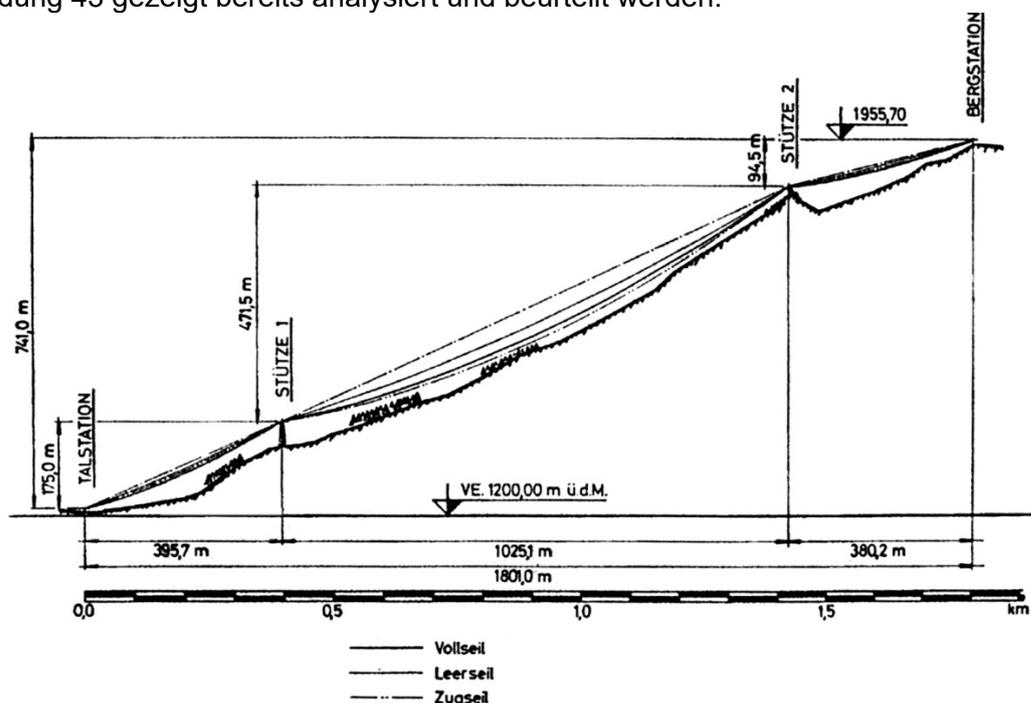


Abbildung 43: Beispielhaftes Längenprofil einer Pendelbahn (Bachl et al. 1968)

¹⁹ Plan der Anlagenverhältnisse einer Seilbahn, der Stationen, Stützen, die Linien der Seile im unbelasteten und belasteten Zustand sowie das darunterliegende Gelände zeigt.

5.1 FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse der Einflussparameter

Wie bereits in Abbildung 9, Kapitel 2.2 erkenntlich wurde, existieren in einer Seilbahnanlage vielfältige Einflussfaktoren für Seildrehung, die in der bestehenden Literatur nur fallweise bzw. intuitiv herausgegriffen und behandelt werden. Um die Gesamtheit der Einflussfaktoren nun wissenschaftlich systematisch zu erfassen, zu strukturieren und auf ihre Schwere der Auswirkung hin zu analysieren bedarf es einer probaten Methodik.

Als geeignetes Mittel wird dazu die FMEA²⁰ herangezogen, da diese eine weit verbreitete industrielle Analyse-Methode darstellt und auch bei sicherheitskritischen Problemstellungen genutzt wird. Die FMEA findet vorrangig als Präventivmaßnahme zur Qualitätssicherung z.B. in der Automobilindustrie Anwendung, um das Risiko von konstruktiven Fehlern in komplexen Strukturen bereits während der Entwicklung systematisch zu minimieren. Das Ziel ist, sämtliche möglichen Fehler eines Bauteils noch vor der Prototypenphase zu erfassen und mögliche Entdeckungs- oder Vermeidungsmaßnahmen als Optimierung für das spätere Produkt abzuleiten (Werdich 2013).

Jeder Fehler erhält dabei eine Gewichtung in Form der Risikoprioritätszahl, kurz RPZ, die sich aus der Schwere der Auswirkung, der Auftretens- und der Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers zusammensetzt (Norm DIN EN 60812). Durch neu zu entwickelnde Entdeckungs- oder Vermeidungsmaßnahmen kann die RPZ eines konkreten Fehlers nachhaltig reduziert werden, wodurch im selben Schritt die Produktsicherheit erhöht wird. Die Dokumentation einer Produkt-FMEA schafft zudem Transparenz in Bezug auf den Entwicklungsprozess und kann auch bei geforderter Produkthaftung zum Nachweis der Sorgfaltspflicht herangezogen werden (Muchow 2016).

Neben den benötigten Strukturen und Bewertungsprinzipien für die Modellbildung wie im vorliegenden Fall zur theoretischen Seildrehung, wird auch das Fachwissen eines Teams während eines Kreativteils in der Durchführung der FMEA eingebunden. Da im Seilbahnbereich verstärkt nicht dokumentiertes Erfahrungswissen z.B. aus der Prüftätigkeit des IFT, aber auch bei Betreibern und Herstellern existiert, ist die FMEA ideal geeignet um diese Experten-Kompetenzen als weiche Faktoren zu nutzen.

Es existieren je nach Einsatzfall unterschiedliche, angepasste Varianten der FMEA, von denen hier die System- oder Produkt-FMEA als Basis herangezogen wird (Eberhardt 2013). Nach (Tietjen et al. 2011) setzt sich die FMEA auf Produktebene grundlegend aus folgenden Schritten zusammen:

- Schritt 1: Strukturanalyse
- Schritt 2: Funktionsanalyse / Fehleranalyse
- Schritt 3: Risikobewertung / Gewichtung nach VDI 2225
- Schritt 4: Maßnahmen optimieren

Für die Erweiterung des Seildrehungsmodells und Quantifizierung der Anteile ist der 4. Schritt der Optimierung vorerst nicht notwendig, jedoch stellt die Ableitung von Konstruktions- und Handlungsempfehlungen in Kapitel 8.4 eine Anlehnung an dieses Vorgehen dar.

Die Funktionsanalyse wird hier in einer eigenständigen Variante mit vorgegebener Fehlerthematik durchgeführt, da nicht die Gesamtfunktion einer Seilbahn allgemein für mögliche Fehleranfälligkeit untersucht werden soll, sondern die mechanischen Komponenten auf ihre Neigung zur Drallimplikation in das Seilsystem. Zur FMEA wurde ein Team aus Seilbahn- und FMEA-Experten gebildet und die Struktur- und Funktionsanalyse einer

²⁰ im Englischen „failure mode and effect analysis“, im Deutschen „Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“ oder „Fehlzustandsart- und -Auswirkungsanalyse“ genannt

Seilbahn unter der Problemstellung des Seildralls diskutiert.²¹ Wie bei Teamsitzungen im FMEA-Prozess üblich, standen den Teilnehmern zur Anregung, aber auch zur faktischen Unterstützung bei der Modellbildung Übersichtszeichnungen und Fotos klassischer Pendelbahn-Konstruktionselemente zur Verfügung. Es wurden vereinfachte Seil-Handmodelle aus Bergsportseilen zur haptischen Unterstützung der Diskussion angefertigt und an die Teilnehmer ausgeteilt, so dass Effekte der Verdrehung und die Auswirkung bestimmter mechanischer Elemente anschaulich nachgestellt werden konnten, vgl. Abbildung 44. Zudem wurden die gültigen nationalen und internationalen Regelwerke bereitgestellt, um benötigte Auslegungsanforderungen, Materialkennwerte und Sicherheitsfaktoren als Merkmale in die Funktionsanalyse einbinden zu können.



Abbildung 44: Seil-Handmodell der FMEA und Veranschaulichung verschiedener Verdrehzustände

Das Ergebnis und die weiteren Analyseprozesse werden im Folgenden entlang der Schritte nach Tietjen dargestellt (Tietjen et al. 2011). Für die Umsetzung der FMEA wurde in vorliegender Arbeit eine Hochschulversion des Softwaretools IQ-RM PRO, Version 6.5-0111 von Februar 2016 der APIS Informationstechnologien GmbH verwendet, welches in der kommerziellen Variante in vielen Industriekonzernen verwendet wird, beispielsweise bei der Daimler AG, Mahle GmbH oder Robert Bosch GmbH.²²

Schritt 1: Strukturanalyse

Die Strukturanalyse der Seilbahn des Systems „Pendelbahn“ orientiert sich in der ersten Ebene an den sich makroskopisch abgrenzenden Elementen Station, Stütze, Fahrzeug und Seil. Als systemtypisches Element kommt der Seilreiter oder Zwischenaufhänger hinzu, der bei Zweiseilbahnen mit Doppeltragseilen zur Reduktion des Zugseildurchhangs und zur allgemeinen Stabilisierung der mehrseiligen Fahrbahn eingesetzt wird. In Ebene 2 wird die Struktur nun nach allen Komponenten untergliedert, die mechanisch mit dem Seil in Kontakt stehen und somit Kräfte auf selbiges ausüben. Das Seil selbst hingegen wird in seine mechanischen Bestandteile zerlegt. Dies stellt eine erste fallspezifische Abweichung von der konventionell breit aufgestellten Methodik der FMEA dar, denn durch die Fokussierung auf rein seilgebundene Elemente wird der Analyseprozess gefiltert und somit beeinflusst. Da das gewünschte zu behandelnde Problem nicht die allgemeine Fehlfunktion der Seilbahn, sondern die Entstehung von Seildrall ist, kann die FMEA hier durch geringfügige Manipulation der Aufgabenstellung effizient durchgeführt werden, ohne für die vorliegende Abhandlung nicht benötigte Nebenergebnisse zu produzieren.

Die Ebenen 4 und 5 sind abschließend dem Detaillierungsgrad der strukturellen Zerlegung der Komponenten geschuldet, da selbst ein trivial erscheinendes Bauteil wie z.B. eine Seilrolle vollkommen unterschiedliche Funktionen ausübt, je nachdem ob das Seil zentral im Rollenfutter gestützt wird oder ob es sich betrieblich bedingt am Rollenbord zur Führung abwälzen muss. Abbildung 45 führt skizzenhaft Ansichten der makroskopischen Elemente

²¹ FMEA Team-Sitzungen am 08.09.2015, 09.02.2016 und 29.03.2016; Auszug mitwirkender Teilnehmer der FMEA: W. Beck, R. Galm, K. Kühner, D. Moll, H. Muchow, S. Traub, M. Wehr, S. Winter

²² abgerufen am 24.04.2016 unter <https://www.apis.de/de/Referenzen>

der Ebene 1 an. Abbildung 46 zeigt die zugehörige Bearbeitungsoberfläche der FMEA Software Apis IQ-RM Pro mit dem Strukturbaum als Übersicht und der Listendarstellung aller Strukturelemente in geschachtelter Form, die unter anderem die Funktion, Merkmale und Fehlerereignisse den Strukturelementen zuordnet. In Abbildung 47 wird schließlich die fertiggestellte Strukturanalyse nach Ebenen untergliedert von dem übergeordneten Element „Seilbahn“ bis zum Beispiel herab zu einzelnen Bauelementen der Seilführungsrollen dargestellt.

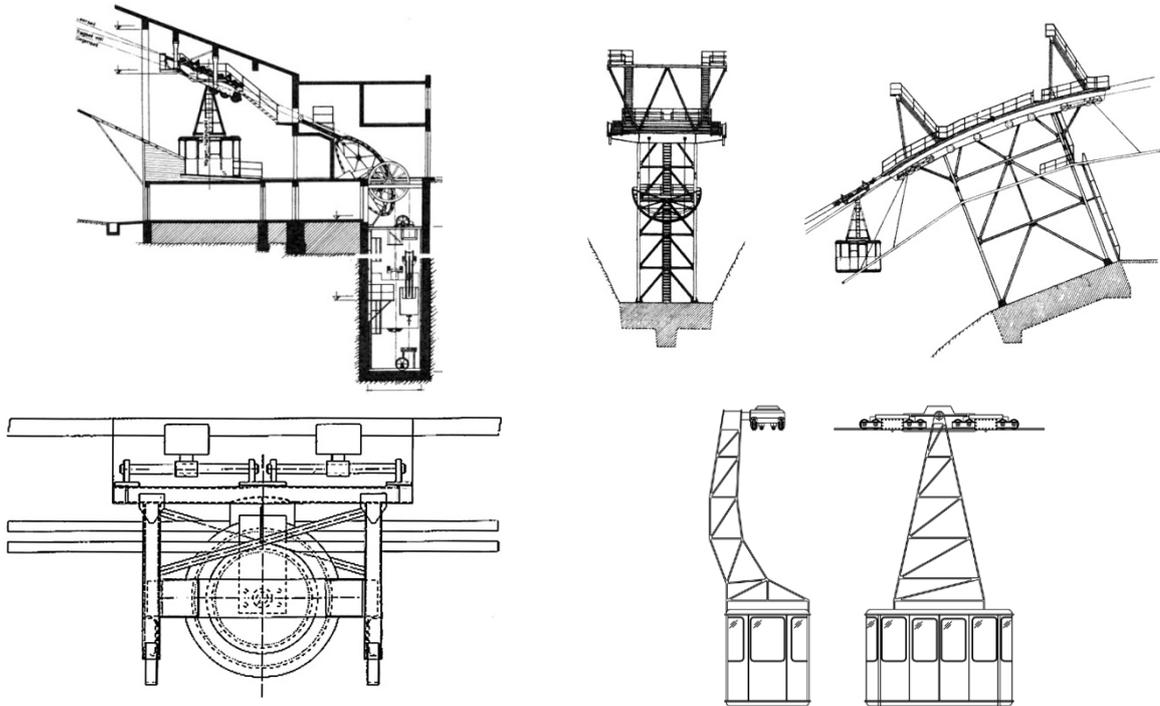


Abbildung 45: Unterstützende Skizzen zu den makroskopischen Strukturelementen Station, Stütze, Seilreiter und Fahrzeug (v.l.n.r.) (Quelle: Archiv IFT)

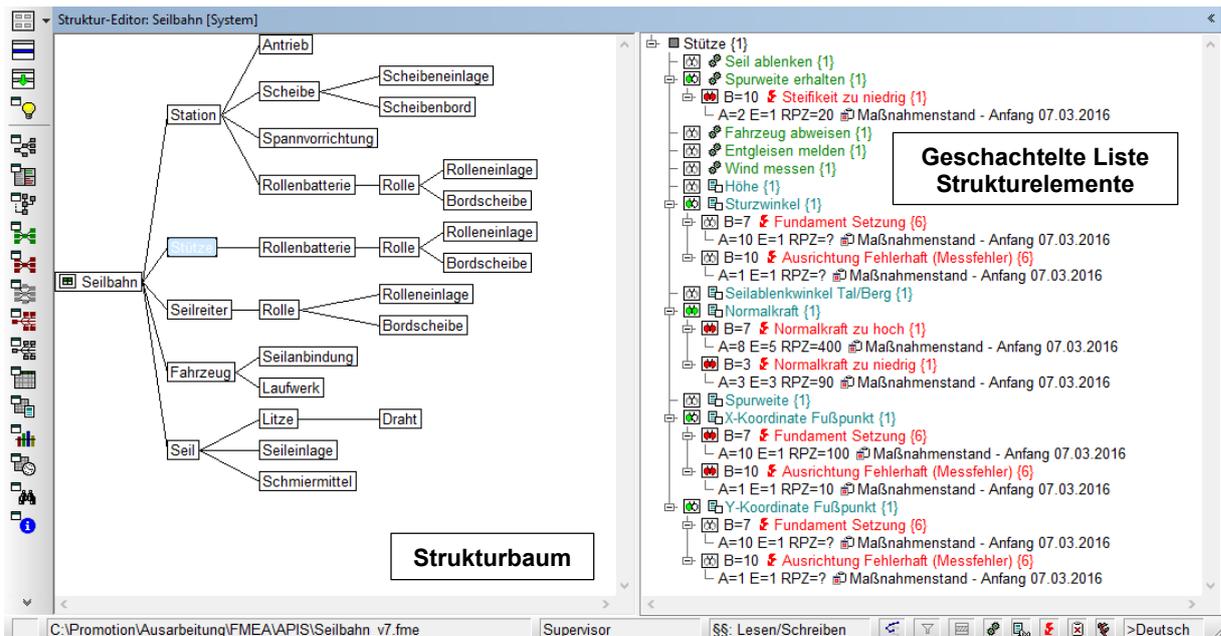


Abbildung 46: Ansicht der Bearbeitungsoberfläche in Apis IQ-RM PRO (links: Übersicht Strukturbaum, rechts: geschichtete Liste der Strukturelemente, u.a. mit Funktion (grün), Merkmalen (blau) und zugehörigen Fehlerereignissen (rot))

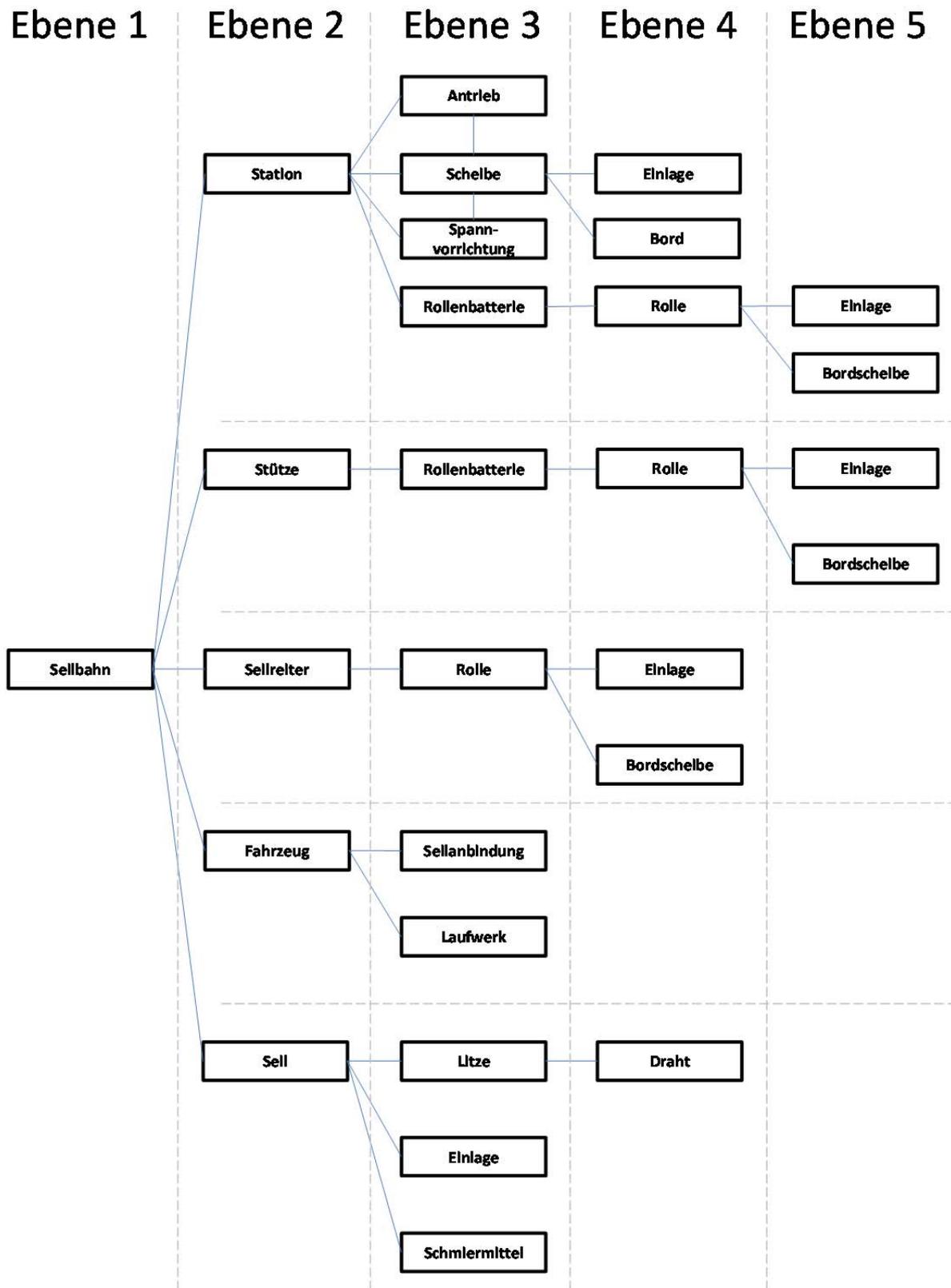


Abbildung 47: Ergebnis der Strukturanalyse der Pendelbahn

Schritt 2: Funktionsanalyse / Fehleranalyse

In der Funktionsanalyse werden den einzelnen Komponenten nun Funktionen und Eigenschaften zugewiesen, bevor den jeweiligen Funktionen wiederum der entsprechende Ausfall in Form von Fehlern zugeschrieben wird. Daraus entsteht ein Funktionsbaum, der möglichst grundlegende, rein mechanisch-physikalische Ausprägungen enthält. Bei Bedarf werden Eigenschaften bzw. Kennwerte aus den geltenden Regelwerken und der Literatur hinterlegt. Abbildung 48 zeigt einen Ausschnitt des Funktionsbaums am Beispiel des Seils.



Abbildung 48: Ausschnitt des Funktionsbaums am Beispiel des Seils

Mit dem nun zu erstellenden Fehlerbaum wird die Strukturierung der FMEA abgeschlossen. Erneut wirkt an dieser Stelle die Modifikation der Methode durch Konkretisierung der Aufgabenstellung, denn anstatt nun umfassende Fehlermöglichkeiten zu erarbeiten wird der Zustand des drehenden Seils als Fehlerfall definiert. Zur Erleichterung der Übersicht werden zwei abstrakte Fehlerebenen definiert, welche die in vielzählige Einzelpfade detaillierte Baumstruktur zusammenführen. Die erhöhte Frequenz an Wartungen bzw. Seilwechseln aus Vibrationen und erhöhtem Verschleiß im Seilbahnbetrieb stellt den zentralen Fehler des Gesamtsystems dar, der nun unter den Gesichtspunkten des Seildralls in zwei grundlegende Ursachen unterteilt wird:

- Das **Seil dreht durch Kraftänderung** im Bahnsystem z.B. aus aufgeprägten dynamischen Antriebskräften oder aus gewichtsbehafteten Kraftänderungen z.B. durch das beladene Fahrzeug oder das Seileigengewicht.
- Das **Seil dreht durch Walkarbeit** bzw. Materialkontakt beim Lauf über Scheiben, Rollen oder andere (Not-)Führungselemente.

Die Verkettung der Fehler zu Baupfaden erfolgt in kausalem Zusammenhang, das heißt die Auswirkung des kleinsten Fehlers am Ende eines Pfades wirkt sich auf noch nicht quantifizierte Art auf den Fehler des nachfolgenden Elements aus bis der Pfad sich an einem Knoten- oder dem Zentralfehler mit anderweitigen Fehlerursachen sammelt. Insgesamt weist die Struktur exklusive der sortierenden abstrahierten Fehler 159 relevante Fehlerbaumelemente auf, die ursächlich für Seildrehung im Betrieb einer Seilbahn sein können. Bei den nachfolgenden Analysen, die sich teilweise auf prozentuale Anteile der Gesamtheit aller Fehler beziehen, ist zu beachten, dass einige Strukturelemente und somit deren zugeordnete Fehler wiederholt in mehreren der makroskopischen Ebenen vorkommen, so findet sich zum Beispiel eine Seilrolle sowohl in den Stationen als auch auf Stützen oder in den Zwischenaufhängern von Pendelbahnanlagen.

Die Strukturarbeit ist mit diesem Schritt beendet, somit ist die Gesamtheit aller drallverursachenden (Fehl-) Funktionen einer Pendelbahnanlage nach den Grundsätzen der FMEA nun rein inhaltlich vollständig erschlossen. Die zugehörigen Baumstrukturen der sortierenden Fehlerkategorien „Kraftänderung“ und „Walkarbeit“ sind im Anhang grafisch dargestellt.

Nachfolgend wird nun die Risikobewertung aller Fehlerereignisse durchgeführt, um eine Hierarchie der ermittelten Fehler entlang der Fehlerbaumstrukturen bilden zu können.

Schritt 3: Risikobewertung

Es folgt nun die Einzelbewertung jedes Fehlers der vorangegangenen Systematik auf die Merkmale

- Schadens-Bedeutung bzw. -Ausmaß, abgekürzt mit dem Buchstaben (B),
- Auftretenswahrscheinlichkeit, abgekürzt mit dem Buchstaben (A) und
- Entdeckungswahrscheinlichkeit, abgekürzt mit dem Buchstaben (E).

Grundsätzlich gilt: je negativer die Bewertung ausfällt, desto höhere Punktzahlen werden vergeben. Die Bewertung erfolgt zwischen den Punktzahlen 1 bis 10, wobei für die Schadensbedeutung und die Auftretenswahrscheinlichkeit die hohe Punktzahl für eine schwere Auswirkung und eine häufiges Auftreten steht, während bei der Entdeckungswahrscheinlichkeit entsprechend bei einer geringen Chance, einen Fehler zu bemerken, die meisten Punkte vergeben werden. Zur Veranschaulichung und Dokumentation der Punktvergabe werden in Industriebetrieben üblicher Weise konfektionierte erklärende Texte den jeweiligen Punktstufen zugeordnet, um über die Analyse verschiedener Produkte durch unterschiedliche Mitarbeiter hinweg ähnliche Bewertungsgrundlagen voraussetzen zu können. Für die Drehungsentstehung innerhalb des Betriebs einer Seilbahn werden je Merkmal diese Bewertungsstufen im Folgenden in Tabelle 15 sinnvoll vereinfacht für die niedrigste, mittlere und höchste Punktstufe angegeben.

Schadensbedeutung (B)		
Punkte	Qualität	Beschreibung
1	keine Auswirkung	Drehungsinduzierende Ausprägung ist physikalisch möglich, wird jedoch durch den Stand der Technik und die Mindestanforderungen der technischen Regelwerke verhindert; Drehmechanismus ist konstruktiv nur unter Verstößen gegen bzw. nicht begründbare Abweichung von geltenden Regelwerken erzeugbar
5 - 6	mittelschwer	Drehmechanismus ist physikalisch gegeben, schwere der Auswirkung ist jedoch nicht bekannt und muss unter üblichen Randbedingungen rechnerisch ermittelt werden; Phänomen wird in Erfahrungsberichten und Literatur als drallfördernd vermutet
10	äußerst schwerwiegend	Drehmechanismus ist physikalisch gegeben und wird bereits in der Literatur behandelt, Berechnungsgrundlagen sind vorhanden; Drallwirkung ist in Erfahrungsberichten oder Schadensgutachten nachgewiesen und konnte in Einzelfällen durch konstruktive Eingriffe eindeutig behoben werden (fiktive Höchstbewertung für sortierende Fehler im Strukturbaum)
Auftretenswahrscheinlichkeit (A)		
Punkte	Qualität	Beschreibung
1	unwahrscheinlich	Seltener Material-, Konstruktions- oder Montagefehler; Fehler ist zwar bei historisch dokumentierten, aber seltenen Wetter- oder Betriebsphänomenen zu erwarten; Drehungsinduzierende Ausprägung wirkt unbedeutend kurz, so dass keine nennenswerte Verdrehung entstehen kann

5 - 6	mäßig	konstruktiv übliche Lösung oder schleichende Entwicklung z.B. durch Setzen, Materialverschleiß oder Werkstoffalterung, deren drehungsinduzierende Wirkung hingenommen wird oder erst bei starker Ausprägung erkannt wird; mehrere bekannte, aber nicht überwiegend viele historisch dokumentierte Fälle von Drallwirkung; Drehungsinduzierende Ausprägung wirkt gelegentlich bzw. unter bestimmten Abschnitten eines Betriebszyklus, so dass eine gewisse, aktuell ggf. noch nicht bezifferbare Verdrehung entstehen kann
10	sehr hoch	Physikalisch unvermeidbarer Zusammenhang, der zwangsläufig zu Seildrehung führt; konstruktiv übliche Lösung, deren drehungsinduzierende Wirkung bekannt ist, aber hingenommen wird Drehungsinduzierende Ausprägung wirkt grundsätzlich drall-induzierend während des gesamten Betriebs (fiktive Höchstbewertung für sortierende Fehler im Strukturbaum)
Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)		
Punkte	Qualität	Beschreibung
1	sehr hoch	Zustand wird unmittelbar bei kurzfristigen regelmäßigen Kontrollen oder durch einschränkende Auswirkung auf den Fahrbetrieb erkannt; Fehler führt zu Bahnstillstand, hohem technischen Verschleiß, Geräuschentwicklung und Vibration oder sogar zu unmittelbarer Gefahr für Anlage, Personal und Fahrgäste; Fehler wird durch Überwachungsmechanismen der Anlage erkannt; Fehler tritt an Orten und in Betriebszuständen auf, die unter den üblichen technischen und personellen Überwachungsstrukturen erfasst werden müssen
5 - 6	mäßig	Fehler kann bei mittel- und langfristigen Kontrollen durch fachkundiges Personal identifiziert werden; Fehler kann zu erkennbaren Ausprägungen wie Verschleiß, Geräuschentwicklung und Vibration führen oder unter Umständen durch die Überwachungssensorik der Anlage erkannt werden; Zustandsänderung bei Entstehung und Fortentwicklung für erfahrenes Personal wahrnehmbar; Fehler tritt an Orten und in Betriebszuständen auf, die unter den üblichen technischen und personellen Überwachungsstrukturen gelegentlich erfasst werden können
10	unwahrscheinlich	Fehler wurde bisher weder durch Experten noch durch die Literatur als drall-verursachend wahrgenommen; (beginnende) schleichende Entwicklung des Fehlers; Zustandsänderung bei Entstehung und Fortentwicklung nicht wahrnehmbar; Fehler äußert sich nicht in üblichen, erkennbaren Ausprägungen wie Verschleiß, Geräuschentwicklung oder Vibration; Fehler reversiert sich durch zyklischen Betrieb des Bahnsystems theoretisch / vermeintlich selbst; Fehler tritt an Orten und in Betriebszuständen auf, die unter den üblichen technischen und personellen Überwachungsstrukturen nicht erfasst werden (fiktive Höchstbewertung für sortierende Fehler im Strukturbaum)

Tabelle 15: Bewertungsstufen für Schadensbedeutung, Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit

Nachdem für alle Fehlerelemente Werte für B, A und E bestimmt wurden, kann aus den drei Faktoren als mathematisches Produkt die Risikoprioritätszahl (RPZ) für jeden Fehler errechnet werden.

$$RPZ = B \cdot A \cdot E \tag{14}$$

Der maximale Fehlerwert beträgt somit 1000 Punkte. Diese sind insbesondere bei den rein der Sortierung dienenden abstrahierten Fehlern des Baums zu beachten, da diese anhand ihrer Punktzahl bei der abschließenden Analyse, Bildung der Fehlerhierarchie und Ermittlung der wichtigsten Fehler entsprechend ausgeblendet werden sollen.

Zur Ermittlung der relevanten Fehler existieren verschiedene Strategien, von denen zwei hier behandelt werden, die als Tool im IQ-RM PRO hinterlegt sind. Die Top-10-Methode, bei der starr die ersten zehn Fehler der entwickelten Hierarchie extrahiert und zur weiteren Bearbeitung herangezogen werden, ist in der vorliegenden systematischen Erschließung der Seildrehung nicht sinnvoll und wird daher nicht angewendet. Tietjen nennt hingegen die Pareto-Analyse als klassisches Mittel im Qualitätswesen (Tietjen et al. 2011), die auch in vorliegender Abhandlung zur Anwendung kommt. Das Pareto-Prinzip stellt die besondere Form einer Verteilung dar, innerhalb der 20 % der Merkmale 80 % der Resultate verursachen, weshalb die Methode auch „80-20-Prinzip“ genannt wird. Im vorliegenden Fall werden somit jene ca. 20 % der drall-verursachenden Fehler der FMEA gesucht, die 80 % der Summe der Risikoprioritätszahlen des Gesamtsystems ausmachen. Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt das grafische Ergebnis der Paretoanalyse der Software IQ-RM PRO, bei der die gewichteten Fehler und die Summenkurve des Risikoanteils dargestellt sind. Auf Basis der Paretokurve werden nachfolgend die Fehler bis einschließlich der Identnummer 14 behandelt, somit alle Fehler größer-gleich einer RPZ von 400.

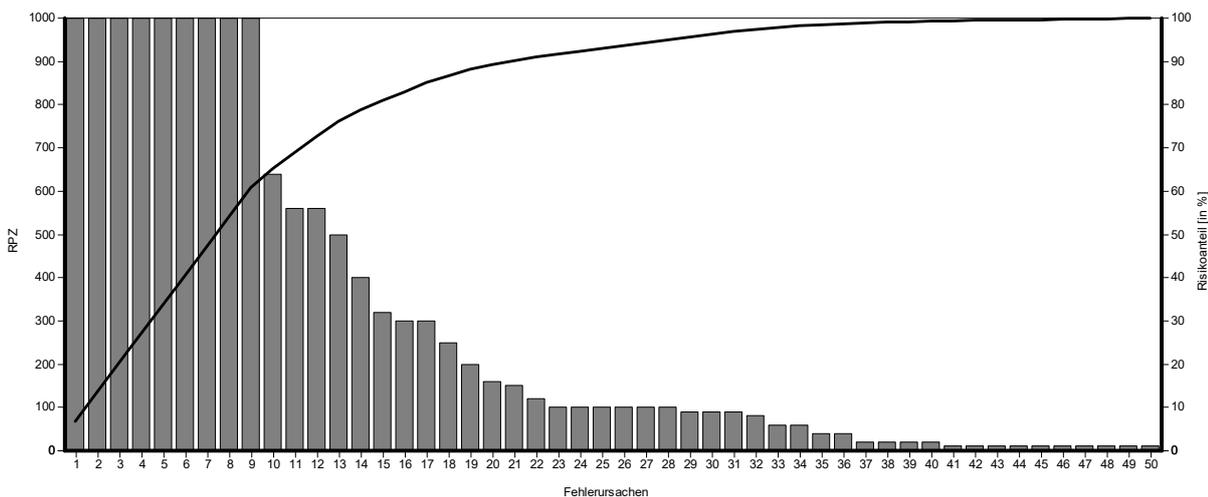


Abbildung 49: Ergebnis der Paretoanalyse der Software IQ-RM PRO

Die maßgeblichen Verursacher für den Seildrall in einer Pendelbahn sind nun qualitativ bekannt. Im nachfolgenden Kapitel 5.2 werden diese sequentiell mathematisch erfasst, um das theoretisch erwartbare Drehmoment eines Seilbahnseils an diesen Punkten prüfen zu können. Dadurch kann eine beliebige Seilbahnanlage hinsichtlich ihrer Drehmomentcharakteristik analysiert werden.

Die mit Hilfe der FMEA identifizierten relevanten Fehler werden abschließend in Tabelle 16 aufgeführt.

Nr.	Fehler-Bezeichnung	RPZ	Unmittelbar zugehöriges Strukturelement	Makroskopisches Strukturelement
01	Spannungsdifferenz durch Seileigengewicht	1000	Seil	
02	Seilkraft-Änderung bei Berg- oder Talfahrt	1000	Fahrzeug	Fahrzeug
03*	Walkarbeit	1000	Rolleneinlage	Station
04*	Walkverlust	1000	Scheibeneinlage	Station
05	Kraftänderung durch Umfangskraft	1000	Antrieb	Station
06	Kraftänderung durch Beschleunigung/Verzögerung	1000	Antrieb	Station
07*	Reibverlust an Rolle (Rollen Anzahl unzureichend)	1000	Station	
08*	Reibverlust an Rolle	1000	Rolleneinlage	Stütze
09*	Reibverlust an Rolle	1000	Rolleneinlage	Seilreiter
10	Schmierung mangelhaft	640	Seil	
11	E-Modul zu niedrig (Seil ist „weich“)	560	Seil	
12	Höhenschlag	560	Scheibe	Station
13	Drallschlaff / weich	500	Seil	
14	Normalkraft zu hoch	400	Stütze	

Tabelle 16: Identifizierte relevante Fehler bzw. Ursachen für Seildrall der FMEA auf Basis der Pareto-Analyse (* Diese Fehler werden aufgrund ihrer physikalischen Ähnlichkeit anschließend zusammengefasst behandelt.)

Schritt 4: Maßnahmen optimieren

In der klassischen FMEA-Methodik werden bei diesem Schritt zu den relevanten Fehlern Maßnahmen zur verbesserten Entdeckung bzw. zur Fehlervermeidung entwickelt und dokumentiert, die sich anschließend reduzierend auf die RPZ auswirken und somit zu einer Neuberechnung des Fehlerhistogramms führen. In der vorliegenden Arbeit ist der Zusammenhang zwischen Aufprägung der Drehung, bleibender Verdrehung und Auswirkung auf die Seilschädigung jedoch noch nicht hergestellt, da dies erst in den nachfolgenden Kapiteln, insbesondere der Zusammenführung der Pfade aus Abbildung 18, untersucht wird. Deshalb wird in Kapitel 8.4 dieser Teil der FMEA nochmals aufgegriffen, um die entsprechenden relevanten Schädigungsursachen zu benennen und sinnvolle bzw. wirtschaftliche Optimierungsmaßnahmen für Bestandsanlagen und Konstruktions-Empfehlungen für Neuplanungen aufzustellen. Eine optimierte RPZ wird jedoch nicht mehr gebildet, da dieser für die weitere Nutzung in dieser Abhandlung nicht mehr relevant ist.

5.2 Mathematische Erschließung der wirksamen Einflussfaktoren

Im Folgenden werden zu den 14 Einflussfaktoren der FMEA mathematische Zusammenhänge der Drehmomententstehung aus der Literatur weiterentwickelt, neu erschlossen oder praxisnah abgeschätzt. In der FMEA konnte vorerst nur die qualitative Beurteilung der Parameter erfolgen, ob diese mechanisch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit und geschätzten Schwere eine Seildrehung auslösen können. Zur Überprüfung werden daher Parameter auf Basis der üblichen Belastungsgrößen mathematisch quantitativ auf ihre Auswirkung überprüft.

Nr.01: Spannungsdifferenz durch Seileigengewicht (Höhenspannung entlang einer Seillinie)

Beide theoretischen Ansätze nach Engel und Feyrer aus Absatz 2.1 sind in der Fachwelt anerkannt und erlauben die mathematische Darstellung des Seildrehmomentes M_t . Feyrer bezieht diese zusätzlich auf den im Experiment ermittelten Verdrehwinkel. Im vorliegenden Fall wird zur Ermittlung einer Drehmomentkennlinie entlang des Geländeprofils einer Seilbahn davon ausgegangen, dass das Seil auf der freien Strecke frei drehen kann und somit vorerst in einem diskreten Abschnitt keine Querschnittsverdrehung des Seils angenommen wird. Diese wird erst gegen Ende eines Spannungsfeldes oder in der Nähe des festen Endes am Fahrzeug wirksam. Zur Berechnung der Drehmomentänderung unter Höhenspannung reduziert sich die Formel nach Feyrer auf denjenigen Anteil, der mit dem Faktor c_1 gebildet wird und nur durch die Hebelwirkung von Drähten und Litzen im Seil beeinflusst wird, vgl. Formel (15).

$$\Delta M_{t,Fey,SH} = c_1 \cdot d \cdot \Delta h \cdot q \quad (15)$$

mit	Δh	Höhenunterschied eines Spannungsfeldes [m]
	q	spezifisches Längengewicht des Seils [kN/m]
	d	Seildurchmesser [mm]
	c_1	geometrische Drehmoment-Konstante

Zieht man nun in Betracht, dass ein Seil nicht ideal gerade zwischen zwei Punkten verläuft sondern entlang einer Kettenlinie durchhängt (Czitary 1962; Günthner und Liedl 1999), so ist der Höhenzuwachs und ebenso die Seilspannungsänderung ebenfalls von dieser Höhenkurve abhängig. Für den Betrag des Durchhangs f in einem Seilfeld i gilt an der horizontalen Stelle x der Zusammenhang

$$f(x_i) = \frac{q^* \cdot x_i \cdot (L_i - x_i)}{2H_i} \quad (16)$$

mit	f	Durchhang [m]
	q^*	Spezifische Seilgewichtskraft in Abhängigkeit der Feldsteigung [N/m]
	x_i	Horizontale Position im Feld i [m]
	L_i	Horizontale Länge des Feldes i [m]
	H_i	Horizontale Spannkraft am Talpunkt des Feldes i [N]

Zieht man den Durchhang von der idealen Verbindungslinie des Tal- und Bergpunktes eines Seilfeldes i ab, so erhält man den realen Höhenverlauf des Seils von Tal zu Berg

$$\begin{aligned} h(x_i) &= x_i \cdot \tan \alpha_i - f(x_i) \\ &= x_i \cdot \tan \alpha_i - \frac{q^* \cdot x_i \cdot (L_i - x_i)}{2H_i} \end{aligned} \quad (17)$$

mit	α_i	Sehnenneigungswinkel des Feldes i [rad]
-----	------------	---

Zur Ermittlung der Horizontalkraft des Seils H am Talpunkt des Feldes i ist nicht nur die Grundspannung des Seils sowie die hinzugekommene Höhenspannung aus eventuell vorhandenen unteren Seilfeldern zu berücksichtigen, zudem sollten auch gemäß Norm Reibungsverluste aus Normalkräften auf den Stützen von 3 % (Norm DIN EN 12930) sowie bei Bedarf eventuelle dynamische Vorgänge während eines Fahrspiels beachtet werden, um eine möglichst realitätsnahe Kurve zu erhalten.

Durch Zusammenführen der Ausdrücke (15) und (17) erhält man abschließend zur Berechnung der physikalisch bedingten Drehmomentänderung eines Seilabschnitts während der Fahrt von Tal zu Berg

$$\Delta M_{t,FeY,SH}(x_i) = c_1 \cdot d \cdot q \cdot \left(x_i \cdot \tan \alpha_i - \frac{q^* \cdot x_i \cdot (L_i - x_i)}{2H_i} \right) \quad (18)$$

Für den praxisorientierten Anwender kann der Verlauf jedoch vereinfacht entlang der Feldsehne, der direkten linearen Verbindung der Stützpunkte, betrachtet werden. Mit

$$h(x_i) = x_i \cdot \tan \alpha_i \quad (19)$$

Vereinfacht sich der Formelausdruck zu

$$\Delta M_{t,FeY,SH}(x_i) = c_1 \cdot d \cdot q \cdot x_i \cdot \tan \alpha_i \quad (20)$$

In Teil 8 der DIN EN 12385 stehen Berechnungsfaktoren zur Berechnung des spezifischen Längengewichts von Rundlitzenseilen bei Kenntnis der Konstruktion und des Durchmessers zur Verfügung (Norm DIN EN 12385-8). Für kompaktierte Seile bietet die Norm keinen Umrechnungsfaktor. Um die Seileigengewichte vereinfacht ermitteln zu können, werden daher ergänzend aus Seilkatalogen mehrerer Hersteller Mittelwerte für das spezifische Längengewicht in Abhängigkeit des Seildurchmessers gebildet und Ausgleichskurven aufgestellt. Die Längengewichte für die Seilkonstruktionen 6x19 Seale, 6x25 Filler und 6x36 Warrington-Seale sind nahezu identisch, so dass hier eine einzige Näherungsformel für alle Konstruktionen verwendet werden kann, siehe Formel (21). Die Streuung liegt bei kleinen Seildurchmessern unter 20 mm im Bereich weniger Prozent, bei großen Seildurchmessern über 30 mm tendiert sie gegen Null. Der aus Katalogwerten ermittelte Faktor entspricht den Werten der Norm für nicht-kompaktierte Seile. Für kompaktierte Konstruktionen ist der Faktor entsprechend höher, da hier mehr Material im gleichen Seilquerschnitt zur Verfügung steht, siehe Formel (22).

Vereinfachte Näherungsgleichung zur Ermittlung des spezifischen Seileigengewichts q_{rund} in [kg/m] für nicht kompaktierte Seile mit Runddrähten:

$$q_{rund} \left[\frac{N}{m} \right] = 0,00365 \cdot \left(\frac{d}{[mm]} \right)^2 \cdot 9,81 \quad (21)$$

Vereinfachte Näherungsgleichung zur Ermittlung des spezifischen Seileigengewichts q_{komp} in [kg/m] für kompaktierte Seile:

$$q_{komp} \left[\frac{N}{m} \right] = 0,0039 \cdot \left(\frac{d}{[mm]} \right)^2 \cdot 9,81 \quad (22)$$

Mit diesen Werten kann nun die lokale bzw. maximale Höhenspannkraft und das resultierende Drehmoment ermittelt werden.

Nr.02: Seilkraftänderung bei Berg- oder Talfahrt

Durch die betriebsbedingte Richtungsumkehr von Pendelbahnen wechselt der Belastungszustand der Zugseile vor allem durch die Änderung der Wirkrichtung des Antriebs und die Reibungsverhältnisse der Anlage. Die Zugseilspannung setzt sich zusammen aus:

- Seilvorspannung
- Seileigengewicht bzw. Höhenspannung
- Fahrzeuggewicht
- Reibung aus den Stützen und Stationseinrichtungen
- Dynamikanteil aus Beschleunigung und Verzögerung

Der Formelausdruck hierzu lautet nach (Günthner und Liedl 1999):

$$S_{zug} = S_{spann} + (q \cdot g \cdot \Delta h) + S_Q + S_R + S_D \quad (23)$$

mit	S_{zug}	Seilzugkraft am Antrieb [kN]
	S_{spann}	Grundspannung des Seils [m]
	q	spezifisches Seileigengewicht [kg/m]
	g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
	Δh	Höhenunterschied zwischen Spannvorrichtung und betrachtetem Punkt in [m]
	S_Q	Seilzusatzkraft aus dem Gewicht des Fahrzeugs [kN]
	S_R	Seilzusatzkraft aus der Reibung der Strecke [kN]
	S_D	Seilzusatzkraft aus dynamischen Vorgängen [kN]

Grund- und Höhenspannung wurden in Nr. 01 bereits behandelt. Bei der Fahrzeugbeladung kann davon ausgegangen werden, dass diese durch die durchschnittliche Auslastung der Anlage wieder ausgeglichen wird und kein nennenswerter Einfluss auf die bleibende Verdrehung im Seil genommen wird.

Bei Richtungsumkehr fließen daher maßgeblich die Seilreibung und der Dynamikanteil durch die Wirkung des Antriebs entsprechend in die Seilspannung mit ein. Die entstehende Spannungsdifferenz der beiden Seilstränge am Antrieb wird als Umfangskraft bezeichnet und ist über die maximale Treibfähigkeit des reibschlüssigen Seilbahnantriebs begrenzt. Die Umfangskraft wird in Nr. 05 separat behandelt. Zudem wirken die dynamischen Anteile der Seilkraft nur für einen kurzen Zeitraum, so dass sich eventuelle Drehmomentauswirkungen größtenteils über die großen freien Seillängen im Beharrungszustand der Anlage wieder zurückstellen können.

Daher wird hier vereinfachend nur der Reibanteil der Zugseilspannkraft bei Richtungsumkehr berücksichtigt. Dieser wird durch die Rollen von Stützen und Seilreitern sowie die Scheiben der Station geprägt, wobei letzteren aufgrund ihrer Lagerung und Fütterung keine nennenswerte Reibleistung zugeschrieben werden. Der Einfluss der Reibarbeit an einzelnen Stützpunkten auf den Seildrall wird in den folgenden Herleitungen der zusammengefassten Fehler Nr. 03, 04, 07, 08 und 09 detailliert behandelt. Da es hier um eine überschlägige Betrachtung des Lastwechsels bei Richtungsumkehr der Gesamtanlage geht, wurden aus den Berechnungen der in Kapitel 5.5 untersuchten Pendelbahnanlagen Mittelwerte für die Seilreibungen aus Stützen und Seilreitern gebildet. Zur einfachen Erfassung der Reibintensität einer Anlage soll daher eine Summe der mittleren Stützen- und Seilreiterreibungen gebildet werden. Zu beachten ist dabei, dass beide Fahrbahnen zu berücksichtigen sind und somit die Anzahl der Stützen und Seilreiter verdoppelt werden muss:

$$S_R = \sum F_{R,St} + \sum F_{R,Sr} = (N_{St} \cdot \bar{F}_{R,St} + N_{Sr} \cdot \bar{F}_{R,Sr}) \quad (24)$$

Die mittleren Reibungen aus Stützen und Seilreitern betragen dabei mit zugehörigen Standardabweichungen gemäß Tabelle 17:

Element	Mittlere Reibung \bar{F}_R [kN]	Standardabweichung [kN]	Standardabweichung [%]
Stütze	0,55	0,29	53%
Seilreiter	0,25	0,14	56%

Tabelle 17: Mittlere Reibkräfte von Stützen und Seilreitern

Das Drehmoment aus der Änderung der Fahrtrichtung kann nun wie gehabt ermittelt werden:

$$\Delta M_{t,FeY,SR} = c_1 \cdot d \cdot S_R \quad (25)$$

Die hohen Standardabweichungen in Tabelle 17 zeigen jedoch, dass z.B. abhängig von Seileigengewichten, Stützenknickwinkeln und Feldlängen stark unterschiedliche Reibkräfte verursacht werden können. Bei Anlagen mit entsprechend extremen Geometriedaten empfiehlt es sich daher, die Reibwirkung detailliert mit den im nächsten Absatz angegebenen Formeln zu ermitteln.

Zusammengefasste Fehler

Nr.03: Walkarbeit, Rolleneinlage

Nr.04: Walkverlust, Scheibeneinlage

Nr.07: Reibverlust an Rolle (Rollen Anzahl unzureichend), Station

Nr.08: Reibverlust an Rolle, Stütze

Nr.09: Reibverlust an Rolle, Seilreiter

Aufgrund ihrer physikalischen Ähnlichkeit wird die mathematische Erschließung dieser Fehler hier zusammengefasst behandelt.

Laufende Seile, die über eine Scheibe, Rolle oder Stütze abgelenkt werden, erfahren auf den mit Gummi gefütterten Stützelementen Reibverluste und erzeugen Walkarbeit. Dieser Anteil ist in den geltenden Regelwerken wie folgt definiert (Norm DIN EN 12930):

„§ 7.2.3: Für die Längenschnitts- und Seilberechnung sind nachstehende Reibungskräfte als Prozentsätze der jeweiligen Auflagerkräfte anzunehmen, wobei in den Reibungswiderständen allenfalls Biegegewiderstände der Seile enthalten sind:

- *gummigefütterte Seilrollen 3,0 %;*
- *Seilscheiben mit Wälzlagern 0,3 %;“*

Wie gehabt werden Seilscheiben im Folgenden aufgrund ihres geringen Anteils an der Reibleistung nicht weiter behandelt. Zur Veranschaulichung wird vorerst eine Seilbahnstütze herangezogen, an der sich die Zugseilkraft z.B. bei einer bergwärts fahrenden Kabine erhöht, vgl. Abbildung 50. Aus den zunächst statisch an der Stütze angreifenden, winklig ablaufenden Seilkräften S resultiert bei Bewegung die Normalkraft („Auflagerkraft“) N , die letztlich die Reibkraft $\mu \cdot N$ verursacht. Betrachtet man nun das Abbild der Kontaktfläche zwischen Seil und zum Beispiel einer Rollen- oder Scheibeneinlage, so sieht man, dass das Seil nicht als zylindrische Fläche aufliegt, sondern periodischen Linienkontakt entlang der Litzenstruktur bildet, ähnlich einer Schrägverzahnung eines Innenzahnrads mit Ritzel (Wittel et al. 2013). Ausgediente Prüfscheiben aus Dauerbiegeversuchen des IFT zeigen wie in Abbildung 51 dargestellt dieses Abbild vergleichsweise deutlich, auf den Einlagerungen von Seilbahnscheiben und Rollen lassen sich bei genauem Hinsehen gewöhnlich ähnliche Spuren im elastischen Futtermaterial finden. Da schrägverzahnnte Stirnzahnräder als nachteiligen Effekt eine Axialkraft hervorrufen, muss ein ähnlicher Effekt hier zwangsläufig

ebenfalls auftreten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Seil im Gegensatz zum Innenzahnrad kein festes Gegenlager darstellt. Engel beschreibt Beobachtungen dieses Effekts in einer Abhandlung über den Laufwiderstand gefütterter Seilrollen (Engel 1977), greift die Betrachtung jedoch in seinen Überlegungen zum Seildrall nicht mehr auf.

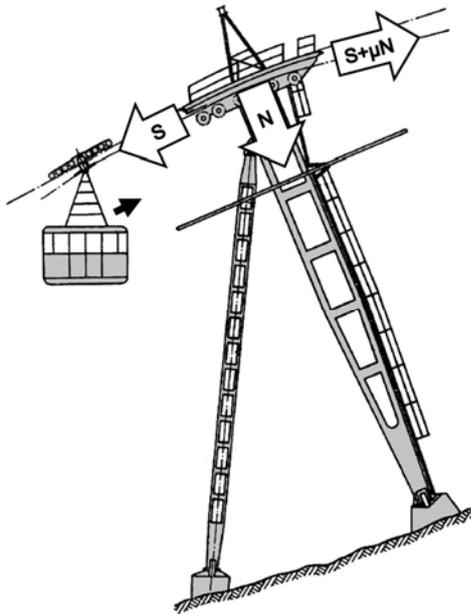


Abbildung 50: Kraftverhältnisse an einer Stütze bei Bergfahrt mit Seilkraft S , Normalkraft N und Reibbeiwert μ (Grafik in Anlehnung an (Schneigert 1966))



Abbildung 51: Abdruck eines Seils in der Scheibe eines Dauerbiegeversuchs am IFT

Da die Kontaktlinien dem Schlagwinkel des Seils folgen, teilt sich die Reibkraft in zwei Komponenten auf: eine in Normalenrichtung zum Seilschlagwinkel und eine weitere Komponente entlang der Schlagrichtung, die eine Art Dreh-Gleitkraft darstellt. In Verbindung mit dem Seilradius verursacht diese Gleitkraft letztlich ein Drehmoment bei Rollenkontakt unter Reibung, das sich rechnerisch anhand nachfolgender Herleitung erfassen lässt.

Für die Gleitkraft F_{gleit} entlang der Litze an der Kontaktfläche zwischen Seil und Rolle gilt die in Abbildung 52 dargestellte Vektor-Beziehung.

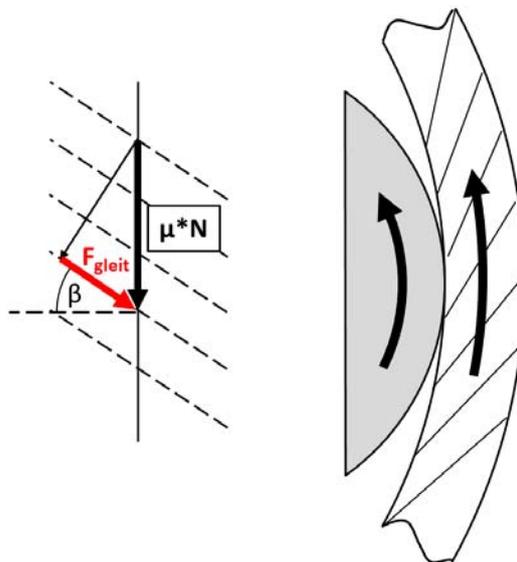


Abbildung 52: Drehende Axialkraft in der Kontaktzone Seil - Rolle

Durch Projektion des Anteils von F_{gleit} quer zu Seilachse kann über den Seilradius r letztlich ein Drehmoment M_{Dreh} in Abhängigkeit der Seilkraft S und des Ablenkwinkels α formuliert werden. Der Effekt tritt theoretisch mehr oder weniger prägnant an Rollen in den Stationen, auf den Stützen und an Seilreitern auf. Der Reibbeiwert μ kann nach Norm als konstant angenommen werden²³, genauso wird der Wert des seileigenen Schlagwinkels β hier als konstant angenommen.

Da die Feineinstellung der Seilgeometrie nicht öffentlich zugängliches Wissen der produzierenden Fachfirmen ist, wurden im Archiv des IFT herstellerübergreifend alle Abnahmeprotokolle nach (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg 11-2004) von realen Seilbahnseilen der letzten 20 Jahre gesichtet und Mittelwerte der Schlagwinkel für nennenswerte Seilbahn-Seilkonstruktionen gebildet. Diese sind in nachfolgender Tabelle 18 mit Bezug auf die Stichprobengröße und deren Standardabweichung angegeben.

Seilkonstruktion	Schlagwinkel β	Stichprobengröße	Standardabweichung
6x19 Seale	16,60°	41	0,614°
6x36 Warrington-Seale	18,15°	19	0,711°
6x25 Filler	16,88°	13	0,384°

Tabelle 18: Durchschnittliche Schlagwinkel β üblicher Seilbahnseilkonstruktionen (Archiv IFT)

Dieser Zusammenhang wird zudem durch ein typisches Phänomen bei Pendelbahnen bewiesen, die oft fahrtrichtungsabhängig eingelaufene Rolleneinlagen vorweisen. Im Ausgangszustand ist herstellerseitig eine zentrische Rille in den Einlagering der Rolle eingebracht worden, vgl. Abbildung 53, Position 1. Durch Verschleiß bildet die Einlage je nach Fahrtrichtung des Seils eine eigene Spur 2a und 2b aus, so dass eine Doppelrille entsteht. In der genannten, folgenden Abbildung sind diese Doppelrille als Skizze und in Realität sowie und die asymmetrische Seillage erkennbar. Das Lageverhalten des Seils in Abhängigkeit der Fahrtrichtung wurde zusätzlich in einem Film festgehalten. In Abbildung 54 sind Momentaufnahmen dieses Films mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen der Seilbahnanlage (Pfeile) zu sehen, die den Lagewechsel des Seils und somit die Existenz der Gleitkraft und des rolleninduzierten Drehmoments abschließend beweisen.



Abbildung 53: Prinzip-Darstellung und Foto einer durch Verschleiß entstandenen Doppelrille in der Zugseilrolle einer Pendelbahn (Position 1: Ausgangslage; Positionen 2a und 2b: Doppelrille aus Fahrtrichtungswechseln)

²³ Da der europäische Markt von nur wenigen Herstellern für Rolleneinlagen mit nahezu ähnlichen Materialkennwerten beherrscht wird, wird dieser Einflussfaktor als nicht weiter relevant betrachtet.

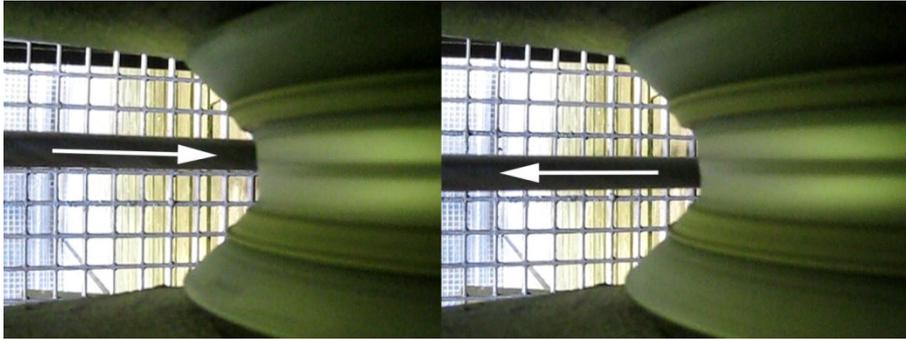


Abbildung 54: Ausschnitte aus Filmaufnahmen während eines Fahrtrichtungswechsels einer Pendelbahn mit unterschiedlichen Seillagen (Pfeil zeigt die Fahrtrichtung der Anlage an)

Stütze

Aus dem zuvor beispielhaft in Abbildung 50 gezeigten Seilkraftverhältnis an der Stütze ergeben sich gemäß Abbildung 55 nun folgende Vektorbeziehungen für die Normalkraft:

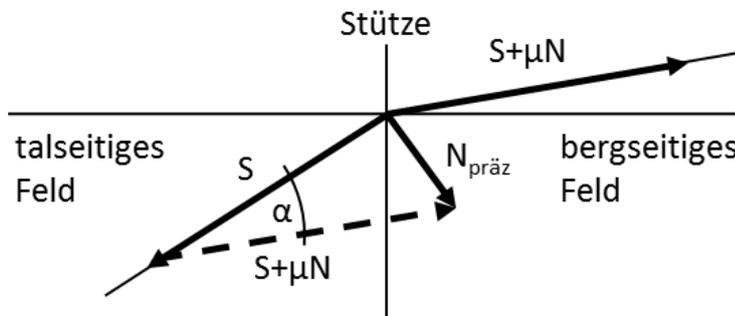


Abbildung 55: Vektorbeziehung am Stützenkopf mit Reibung

Für die präzise Berechnung der Normalkraft entsteht daher folgender, nicht trivial zu lösender Formelzusammenhang gemäß der Winkelfunktionen am allgemeinen Dreieck (Engelmann et al. 1999):

$$N_{präz} = \sqrt{S^2 + (S + \mu N)^2 - 2 \cdot S \cdot (S + \mu N) \cos \alpha} \quad (26)$$

Die Berechnungsmethode soll jedoch bei ausreichender Genauigkeit möglichst leicht und verständlich anwendbar sein. Vernachlässigt man nur zur Bestimmung der Normalkraft die Reibung, vereinfacht sich das Vektor-Dreieck zu einer symmetrischen Form:

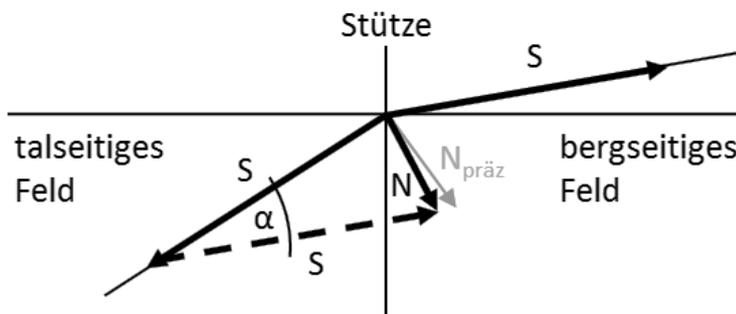


Abbildung 56: Vektorbeziehung am Stützenkopf bei vernachlässigter Reibung

Dadurch vereinfacht sich der FormelAusdruck merklich zu

$$N_{einf} = 2 \cdot S \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (27)$$

Der dadurch entstehende Fehler steigt mit dem Stützenknickwinkel α , da die Normalkraft mit der Auflagerkraft wächst. Nachfolgend wird eine angenäherte Fehlerbetrachtung durchgeführt, indem der vereinfachte Ausdruck N_{einf} für die Normalkraft in die Präzise Formel eingesetzt und verglichen wird. Erst ab 37° Ablenkwinkel wird der Fehler größer 1%, wie das Diagramm in Abbildung 57 verdeutlicht. Da die Winkeländerung an Pendelbahn- und Umlaufbahnstützen erfahrungsgemäß deutlich unter dieser Grenze liegt, kann diese Vereinfachung hier und für die späteren Übertragungsansätze herangezogen werden.

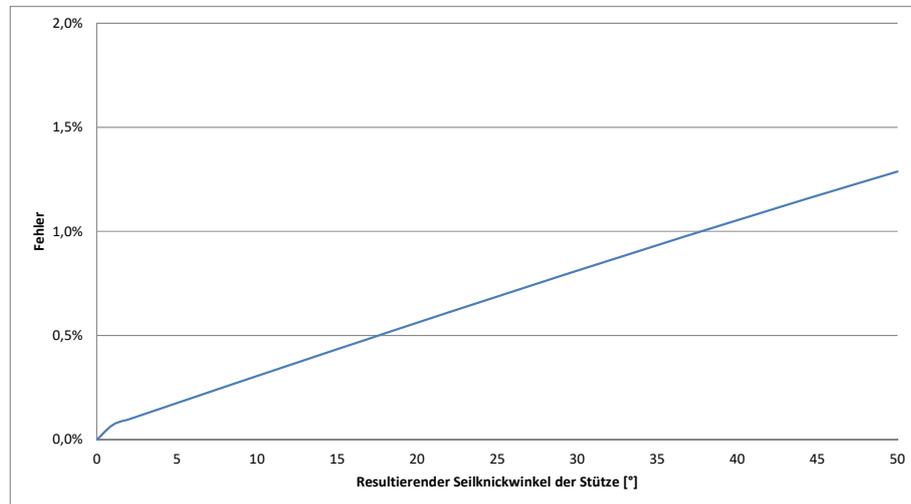


Abbildung 57: Fehler in der Normalkraftberechnung bei Vernachlässigung der Stützenreibung

Nun sind alle Werte bekannt, um das stützen- bzw. rolleninduzierte Drehmoment anhand der Anlagengeometrie zu berechnen. Grundsätzlich gilt:

$$M_{Dreh,St} = F_{gleit} \cdot \cos \beta \cdot r = \mu \cdot N_{einf} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \frac{d}{2} \quad (28)$$

Durch Einsetzen von (27) in (28) ergibt sich schließlich:

$$M_{Dreh,St} = \mu \cdot S \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot d \quad (29)$$

Zur überschlägigen Berechnung der **Seilkraft an der Stütze** können diverse vereinfachende Annahmen getroffen werden. Mit den Sicherheitsfaktoren nach (Norm DIN EN 12927-2)²⁴ kann somit aus der Mindestbruchkraft des Seils als Katalogwert die Seilspannung an der Stütze abzüglich der Höhenspannung und Ausnutzungsfaktoren vereinfacht berechnet werden, vgl. dazu die Herleitungen aus „Lage von Antrieb und Spannelementen“ ab Seite 56.

Sollte keine detaillierte Seillinienberechnung der Anlage, sondern z.B. nur ein Höhenprofil vorliegen, können die **Seilwinkel an den Stützen** für eine erste Näherung wie folgt bestimmt werden. Der Seildurchhang in einem Spannfeld und somit die Ablenkwinkel an den Stützen sind nahezu unabhängig vom Seildurchmesser und der Seilkonstruktion. Die Ähnlichkeit von Metergewichten und Mindestbruchkräften der drei Seilbahnseilkonstruktionen Seale, Filler und Warrington-Seale werden auch an anderen Stellen dieser Abhandlung vereinfachend genutzt. Nimmt man nun eine durchschnittliche Seilspannung unter Sicherheitsfaktor 6 in Abhängigkeit der Mindestbruchkraft an, können verallgemeinerte talseitige und bergseitige Seilfeldwinkel berechnet werden. Die Winkel werden dabei durch Ableitung von Formel (17) aus der Steigung der jeweiligen Durchhangkurve im Gelände ermittelt und berechnen sich tal- und bergseitig am Rand eines Seilfeldes wie folgt:

²⁴ Der geforderte Sicherheitsfaktor für das Zugseil einer Pendelbahn ohne Tragseilbremse beträgt 4,50, für eine Pendelbahn mit Tragseilbremse 3,80.

$$\beta_{talseitig} = \arctan\left(\frac{h}{L} - \frac{L \cdot q^*}{2 \cdot H}\right) \quad (30)$$

$$\beta_{bergseitig} = \arctan\left(\frac{h}{L} + \frac{L \cdot q^*}{2 \cdot H}\right) \quad (31)$$

Tabelle 19 zeigt die mit den Formeln (30) und (31) berechneten Ablenkwinkel α in Grad an Stützen für diskrete Steigungen und Feldlängen, daraus können bei Bedarf Zwischenwerte interpoliert werden.

Feld- neigung [%]	Feldlänge [m]													
	50		100		250		500		750		1000		1500	
	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B
0	-0,4	0,4	-0,9	0,9	-2,2	2,2	-4,4	4,4	-6,6	6,6	-8,8	8,8	-13,1	13,1
5	2,4	3,3	2,0	3,7	0,6	5,1	-1,6	7,3	-3,8	9,4	-6,0	11,6	-10,3	15,7
10	5,3	6,1	4,8	6,6	3,5	7,9	1,3	10,1	-0,9	12,2	-3,1	14,3	-7,5	18,4
20	10,9	11,7	10,5	12,2	9,2	13,4	7,0	15,5	4,8	17,5	2,6	19,5	-1,8	23,4
30	16,3	17,1	15,9	17,5	14,6	18,7	12,6	20,7	10,4	22,6	8,3	24,5	3,9	28,0
50	26,2	26,9	25,9	27,3	24,8	28,3	22,9	30,0	21,0	31,6	19,1	33,2	15,0	36,2
75	36,6	37,2	36,3	37,4	35,4	38,3	33,9	39,6	32,4	40,9	30,8	42,1	27,4	44,5
100	44,8	45,2	44,6	45,4	43,9	46,1	42,7	47,1	41,5	48,1	40,2	49,1	37,5	50,9

Tabelle 19: mittlere Seilwinkel α in [°] talseitig (T) und bergseitig (B) eines Seilfeldes in Abhängigkeit der Feldlänge und der Feldneigung

Die oben angegebene Formel (27) für die Normalkraft an einer Stütze kann somit für die jeweiligen Seilwinkel an einer Stütze wie folgt angegeben werden:

$$N_{einf} = 2 \cdot S \sin\left(\frac{\alpha_{Berg, Feld i} - \alpha_{Tal, Feld i+1}}{2}\right) \quad (32)$$

Dass die Normalkraft in Realität eventuell größer ausfallen kann, sollte jedoch bei der Ergebnisbetrachtung fallweise kritisch berücksichtigt werden.

Abschließend sei im nachfolgenden Diagramm in Abbildung 58 ein Beispiel gegeben, in welchen Größenordnungen sich das stützeninduzierte Drehmoment bei einem Seil Typ 6x19 Seale, Durchmesser 30mm mit einer Mindestbruchkraft von 631 kN bei 120 kN Seilspannkraft abhängig vom Stützenknickwinkel bewegt. Das mittlere Drehmoment aus Höhenspannung $M_{t,Fey,frei}$ der in Kapitel 5.5 untersuchten Seilbahnanlagen beträgt 70,1 Nm. Bei beispielhaften Seilablenkwinkeln von 10° bis 25° liegt das induzierte Drehmoment einer Stütze somit im Bereich von 10% bis 35% des erwartbaren Drehmoments aus Höhenspannung.

Ein Gleichschlagseil entwickelt folglich der oben entwickelten Gesetzmäßigkeit auf einer Stütze ein Drehmoment, das während der Fahrt zu Berg dem Drehmoment aus der Höhenspannung entgegenwirkt. Mit jeder weiteren Stütze addieren sich diese aufdrehenden Momente, so dass bei großer Stützenszahl eine Gegendrehung des Seils feststellbar werden könnte. Als praktischen Beweis für diese theoretischen Annahmen sei folgende bereits veröffentlichte Drehsensormessung der II. Sektion der Umlaufbahn am Jenner in Berchtesgaden gezeigt, die über die Vielzahl der Streckenstützen genau jenen postulierten Effekt erfährt (Wehking et al. 2013): das Seil dreht während der Fahrt anfänglich mit der Höhenspannung auf, wechselt jedoch bis zur Ankunft an der Bergstation seinen Drehsinn, vgl. Abbildung 59.

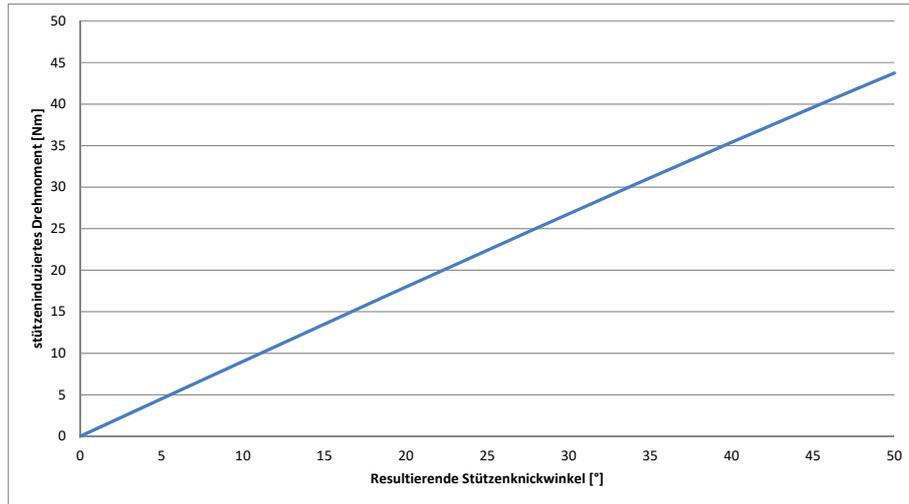


Abbildung 58: Stützeninduziertes Drehmoment für ein 30mm-Seil 6x19S unter 120kN Zugspannung in Abhängigkeit des Stützenneigungswinkels

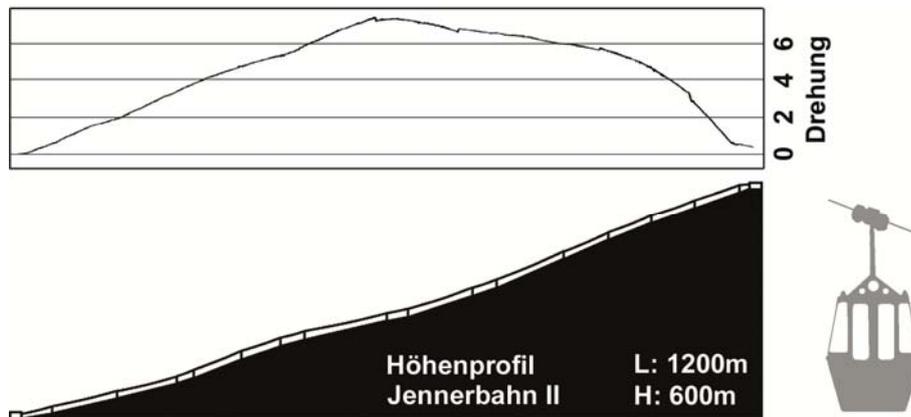


Abbildung 59: Drehungsmessung mit stützeninduzierter Drehrichtungsumkehr des Seils

Seilreiter

Seilreiter oder Zwischenaufhänger kommen nahezu ausschließlich bei Seilbahnanlagen mit Doppeltragseilen vor. In seltenen Fällen sieht man Seilreiter auch bei Materialseilbahnen im alpinen Gelände mit nur einem Tragseil. Hier wird der Seildurchhang meist mit nur einer Rolle abgefangen, so dass die Situation für die vorliegende Betrachtung von Bedeutung sein kann. Der mathematische Zusammenhang zur Ermittlung der Normalkraft und des drall-induzierenden Verlustanteils ist identisch mit dem der Stützenaufgabe (siehe Abbildung 60), jedoch können aufgrund der standardisierten Abstände von Seilreitern vereinfachte Verhältnisse angenommen werden. Zur konservativen Betrachtung wird, wie in Abbildung 60 gezeigt, die Sehne des Seilfeldes als ideal horizontal angenommen (Feldneigung 0%) und das Zugseil bei unterschiedlichen Seilreiterabständen unter Sicherheitsfaktor 6 belastet. Daraus ergeben sich in Anlehnung an Tabelle 19 die in nachfolgender Tabelle 20 angegebenen Seilablenkwinkel für Seilreiter. Fallweise kann die konservative Betrachtung des ideal flachen Feldes durch Einführung der realen Feldneigung der Anlage für die Analyse optimiert werden. Die Normalkraft reduziert sich dann entsprechend in Abhängigkeit der Feldneigung.

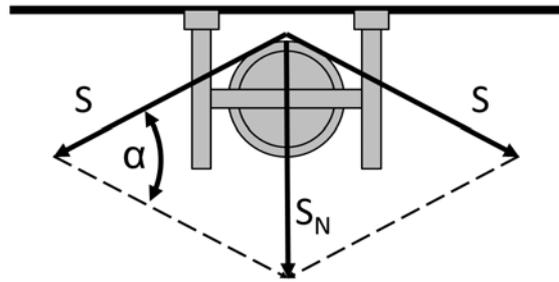


Abbildung 60: Schematische Darstellung der Normalkraft des Zugseils auf die Stützrolle eines Seilreiters

Abstand Seilreiter e [m]	100	150	200	250	300
Ablenkwinkel α_{sr} [°]	1,8	2,6	3,6	4,4	5,4

Tabelle 20: Näherung für Seilablenkwinkel an Seilreitern in Abhängigkeit des Abstands

Äquivalent zur Formel (29) ergibt sich somit für das Drehmoment aus Seilreitern:

$$M_{Dreh,Sr} = \mu \cdot S \cdot \sin \frac{\alpha_{sr}}{2} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot d \quad (33)$$

Station

In Stationen von Pendelbahnen werden gelegentlich Rollen zur Abstützung und Schwingungsreduktion des Zugseils bei bestimmten Lastzuständen eingesetzt. In seltenen Fällen kann eine Rollenbatterie sogar eine Ablenkscheibe ersetzen. Wenn Seilrollen oder Batterien in der Station nennenswerte Ablenkwinkel bzw. Auflagerdrücke erzeugen, so können diese Fälle mit der für Stützen hergeleiteten Situation abgebildet werden.

Nr.05: Kraftänderung durch Umfangskraft (Lage von Antrieb und Spannelementen)

Die Seilkräfte von Pendel- und Umlaufbahnen hängen nicht nur von der Stützenverteilung und Profilgeometrie ab, sondern werden auch durch die Anordnung von Antriebs- und Spannstation geprägt. Die Konfiguration aus Spannstation im Tal und Antriebstation am Berg ist technisch gesehen die ideale Lösung, da am Antrieb die größte Grundspannung und somit bestmöglich Traktion herrscht und am Spanngewicht die kleinsten Kräfte aufgebracht werden müssen. Jedoch ist technisch gesehen jede Kombination lösbar und so werden diese je nach geologischer und technischer Infrastruktur auch frei realisiert. In Abbildung 61 werden die vier Kombinationsmöglichkeiten aus Antriebsanlage und Spannvorrichtung in eine abstrahierte Darstellung überführt. In diesen sind zudem die für die Rechnung bekannten bzw. abgeschätzten Ausgangsgrößen der Grundspannung an der „Spannvorrichtung“ und die „maximale Seilkraft“ eingetragen, von denen aus anschließend eine überschlägige Lastermittlung entlang der Anlage erfolgen kann. Im Folgenden werden Annahmen zur überschlägigen Seilkraftberechnung getroffen und in Formeln umgesetzt.

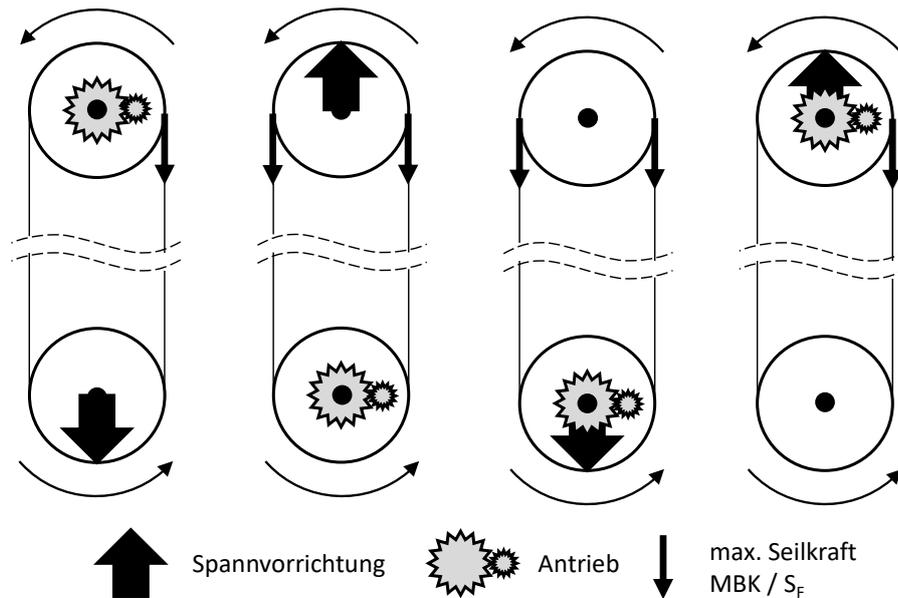


Abbildung 61: Lagekonfigurationen von Spannvorrichtung und Antrieb mit den zugehörigen Seilkraftverteilungen

Seilbahnseile werden aus wirtschaftlichen Gründen stets nahe den in den geltenden Regelwerken geforderten Mindestwerten ausgelegt, da sich übermäßig konservativ gerechnete Reserven am Seil über das spezifische Eigengewicht und den Seildurchmesser direkt auf den Seildurchhang und die Dimensionierung der restlichen Anlagenkomponenten auswirken. Stützen, Scheiben, Antrieb, Stationen und Fundamente würden unnötig vergrößert und verteuert. Zur vereinfachten Berechnung der jeweiligen Seilkräfte anhand der Anlagenkonfiguration darf daher vorausgesetzt werden, dass das Seil für den Punkt der höchsten Spannung ideal ausgelegt wurde. Das bedeutet, an dieser Stelle wirkt für ein oberes Zugseil näherungsweise die maximale Seilkraft S_{max}

$$S_{max} = \frac{F_{min}}{TSF} \cdot \eta \quad (34)$$

mit S_{max} maximale mittlere Seilkraft [kN]
 F_{min} Katalogwert der Mindestbruchkraft des Seils (auch MBK) [kN]
 TSF Zugsicherheitsfaktor nach (Norm DIN EN 12927-2) [-]
 η Ausnutzungsgrad des Seils im Normalbetrieb, Größenordnung geschätzt 70%.

An nahezu gleicher Position gilt auf der anderen Seite der Kabine für das Gegenseil ein ähnlicher Ausdruck, jedoch abzüglich der durch das Fahrzeug eingeleiteten Seilkraft. Als Seilneigung kann hier näherungsweise die Neigung des Seilfeldes oder die für die Seilbahn angegebene mittlere Neigung $\bar{\alpha}$ verwendet werden.

$$S_{max,-Q} = \frac{F_{min}}{TSF} \cdot \eta - Q \cdot \cos \bar{\alpha} \quad (35)$$

mit $S_{max,-Q}$ maximale mittlere Seilkraft abzüglich der Kabinengewichtskraft [kN]
 η Ausnutzungsgrad des Seils bei Normalbetrieb
 Q Kabinengewichtskraft [kN]
 $\bar{\alpha}$ mittlere Neigung der Seilbahn / des Seilfeldes [rad]

Da besonders in der Planungsphase das Fahrzeuggewicht noch nicht zwingend festgelegt ist, kann folgendes Diagramm aus einer Parameterstudie mit 30 Seilbahnanlagen für Leer- und Vollgewichte von Pendelbahnkabinen in Abhängigkeit des Fassungsvermögens aus (Kühner 2009) verwendet werden:

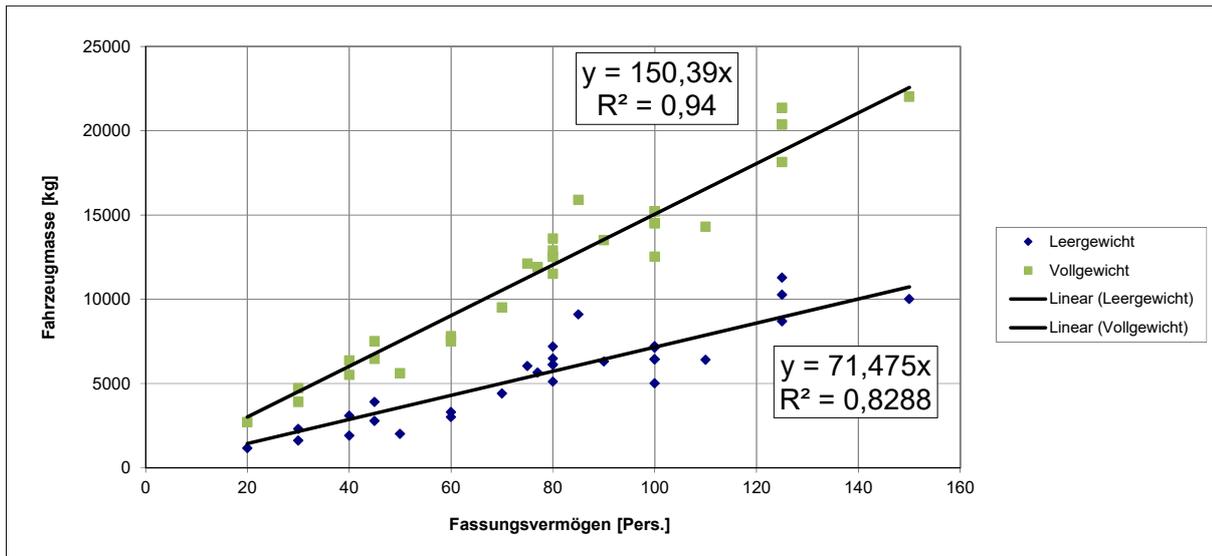


Abbildung 62: Fahrzeugmasse einer Pendelbahn in Abhängigkeit des Fassungsvermögens

Für gängige Kabinengrößen können daher folgende Gewichtskräfte Q angenommen werden:

Fassungsvermögen [Pers.]	Leergewichtskraft [kN]	Vollgewichtskraft [kN]
35	24,5	51,6
60	42,1	88,5
80	56,1	118,0
90	63,1	132,8
100	70,1	147,5
110	77,1	162,3
125	87,6	184,4

Tabelle 21: Leer- und Vollgewichtskräfte für gängige Fahrzeuggrößen

Diese Fahrzeuglasten Q können nun vereinfacht auf die Seilneigung umgerechnet werden, indem der Sehnenneigungswinkel α_i des Feldes i verwendet wird:

$$\Delta S_Q = \pm Q \cdot \sin \alpha_i \quad (36)$$

An den Stützen beziehungsweise der talwärtigen Gegenstation verringert sich die Seilkraft um den entsprechenden Anteil der Höhenspannung, somit um den Ausdruck

$$S_h = \Delta h_i \cdot q \quad (37)$$

Bei Bedarf können die durchschnittlichen Reibkräfte der Stützen und Seilreiter aus Nr. 02 ebenfalls in diese Rechnung einbezogen werden.

Nun sind statisch gesehen bereits alle Seilkräfte näherungsweise bestimmt. Es gilt nun noch, die Kräfte am Antrieb zu ermitteln. Geht man davon aus, dass die Kraft auf der einziehenden Seite direkt über die bisher angegebenen Formeln ausgehend von der höchsten Seilkraft im System berechnet werden kann, muss für die Abtriebsseite die benötigte Umfangskraft des Antriebs subtrahiert werden. Auch hier gilt die Annahme, dass das System aus wirtschaftlichen Gründen nahe den Mindestwerten ausgelegt wurde. Den physikalisch-mathematischen Hintergrund zur maximal wirkenden Traktion des Antriebs drückt die Euler-Eytelwein'sche Gleichung aus (Czitary 1962; Günthner und Liedl 1999), die das Verhältnis der am Antrieb wirkenden Seilkräfte S_{zug} zu S_{ab} kleiner-gleich einer e-Funktion setzt, deren

Exponent aus dem Produkt aus Reibbeiwert μ zwischen Seil und Scheibeneinlage sowie dem Umschlingungswinkel α der Scheibe besteht, vgl. auch Kräfteplan in Abbildung 63:

$$\frac{S_{zug}}{S_{ab}} = \frac{S_{ab} + S_U}{S_{ab}} \leq e^{\mu\alpha} \quad (38)$$

mit	S_{zug}	Seilzugkraft am Antrieb [kN]
	S_{ab}	Seilkraft am ablaufenden Strang des Antriebs [kN]
	α	Umschlingungswinkel des Antriebs [rad]
	μ	Reibbeiwerte zwischen Seil und Scheibeneinlage [-]
	S_U	durch den Antrieb zu übertragende Umfangskraft [kN]

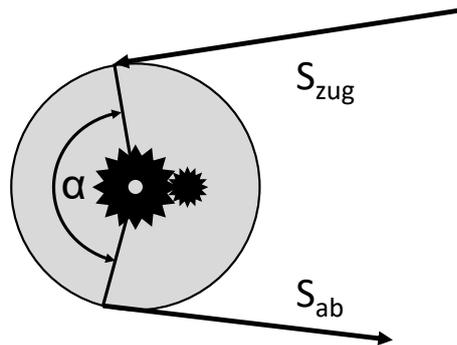


Abbildung 63: Kräfteplan und Umschlingungswinkel am Seilbahnantrieb

Während bei Pionieranlagen im Personen-Pendelbahnbau die Antriebsscheiben meist geneigt bis horizontal liegend in der Station eingebaut waren, werden heute grundsätzlich vertikal stehende Antriebe ausgeführt (vgl. Abbildung 64).



Liegender Pendelbahnantrieb mit einfacher Umschlingung



Stehender Pendelbahnantrieb mit einfacher Umschlingung



Stehender Pendelbahnantrieb mit doppelter Umschlingung

Abbildung 64: Typische Anordnungen von Treibscheiben in Seilbahnantrieben

Nimmt man den Reibbeiwert materialbedingt als gegeben bzw. unveränderlich an, so lässt sich die Treibfähigkeit ausschließlich in bedingtem Maße über die Seilvorspannung, maßgeblich jedoch über den Umschlingungswinkel am Antrieb einstellen. Man unterscheidet die doppelte Umschlingung gegenüber der einfachen, wenn das Zugseil über eine Gengenscheibe zweifach um den Antrieb geführt wird.

Der Reibwert μ darf für Gummieinlagen nach (Norm DIN EN 12930) mit mindestens 0,3 angenommen werden, für Treibscheibeneinlagen mit dem üblich verwendeten Material Becorit® gilt ebenfalls dieser Mindestwert (Schweri 2008), jedoch ist nach Norm bei dynamischen Einwirkungen der Reibwert auf 2/3 zu reduzieren. Je nach Umschlingungswinkel α der Anlage und angenommenen Reibwert μ erreicht der Formelausdruck $e^{\mu\alpha}$ somit folgende Werte:

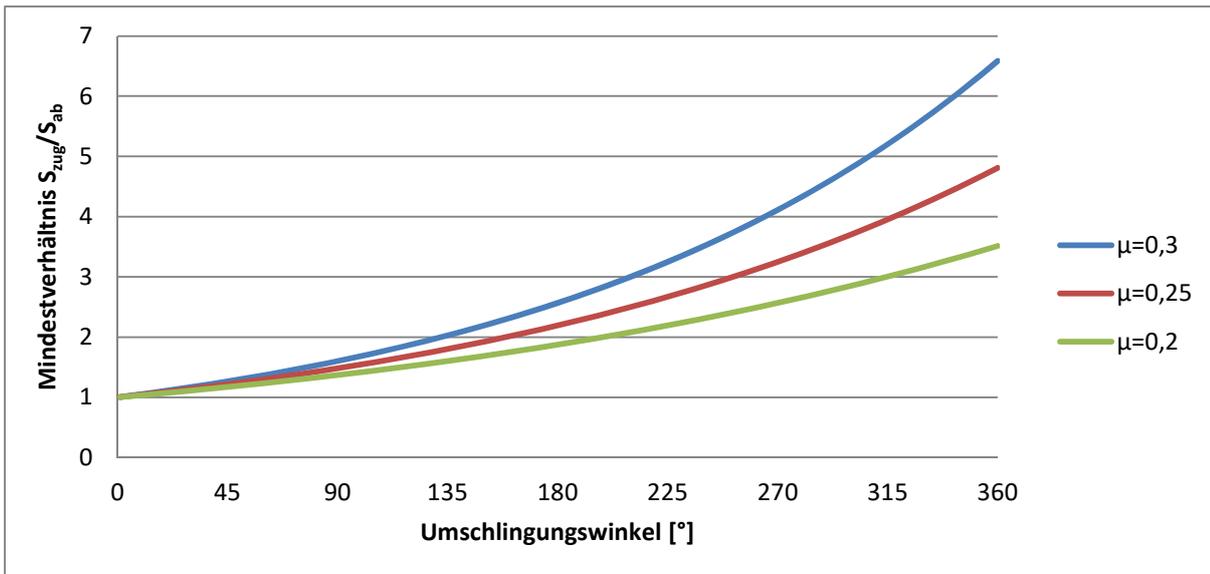


Abbildung 65: Kraftverhältnis am Antrieb in Abhängigkeit des Reibwertes und des Umschlingungswinkels

Für gängige Umschlingungswinkel können daher folgende Kraftverhältnisse nach Tabelle 22 verwendet werden. Da es sich um maximale Werte handelt, sollten hier erneut Ausnutzungsfaktoren für die real erwartbare Seilspannung berücksichtigt werden.

Umschlingungswinkel α [°]	Max(S_{zug} / S_{ab}) $\mu=0,3$	Max(S_{zug} / S_{ab}) $\mu=0,25$	Max(S_{zug} / S_{ab}) $\mu=0,2$
180	2,6	2,2	1,9
270	4,1	3,2	2,6
360	6,6	4,8	3,5

Tabelle 22: Maximale Kraftverhältnisse am Antrieb bei gegebenem Umschlingungswinkel

Für die Seilverdrehung ist die Umfangskraft S_U , die über die Euler-Eytelwein'sche Reibbeziehung durch den Antrieb zu übertragen ist, deshalb von Bedeutung, da das Seil während des Umlaufs durch den Antrieb eine Entspannung erfährt, während es durch die hohe Anpresskraft und die Reibung im Antriebsscheibenfutter gegen nennenswerte rotatorische Bewegungen weitestgehend blockiert wird. Dass das Seil im Antriebsscheibenfutter nicht makroskopisch drehen kann, zeigen letztlich auch die klaren Draht- und Litzenabdrücke des Seils im Futter, vgl. ähnlichen beispielhaften Seilabdruck in einer Versuchsscheibe aus Abbildung 51, Seite 50. Gegenüber der ziehenden Seite wird das Seil somit auf der ablaufenden Seite des Antriebs in einem entspannten Zustand aus dem Scheibenfutter freigegeben. Dadurch muss das Seil am Ablaufpunkt von der Antriebsscheibe zudrehen wollen. Da der Kontakt zum Futter der Scheibe wie beschrieben ein festes Ende darstellt, muss diese Drehung aus dem freien Feld genommen werden. Das Seil dreht in den Praxismessungen mit dem Drehsensor in Kapitel 5.5 in Antriebsnähe in die hier vorhergesagte Richtung.

Die Drehmomentänderung aus der Umfangskraft beträgt somit analog zu Formel (15):

$$\Delta M_{t,FeY,SU} = c_1 \cdot d \cdot (S_{zug} - S_{ab}) = c_1 \cdot d \cdot S_U \quad (39)$$

Mit den oben angegebenen Formeln können die Seilkraftverhältnisse einer Anlage in Abhängigkeit der Bahnkonfiguration näherungsweise bestimmt werden. Die Seilkräfte an den antriebslosen Umlenkscheiben können gleich groß gesetzt werden. Tabelle 23 fasst die zur

Berechnung der Kräfte am Tal- oder Bergantrieb benötigten Formeln der jeweiligen Kombination abschließend zusammen.

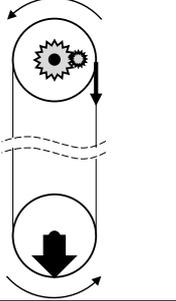
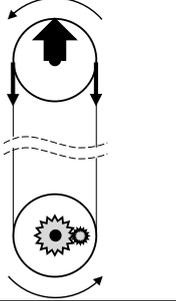
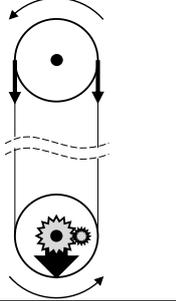
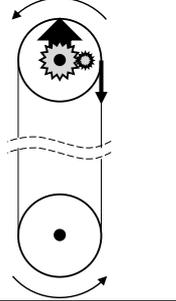
Position	Anlagenkonfiguration (für Zugseil oberhalb des Fahrzeugs)			
				
Tal ab	$S_{\max}(1+1/e^{\mu\alpha})/2-S_h$	$(S_{\max}-S_h)/e^{\mu\alpha}$	$(S_{\max}-S_h)/e^{\mu\alpha}$	$S_{\max}(1+1/e^{\mu\alpha})/2-S_h$
Berg zug	S_{\max}	S_{\max}	S_{\max}	S_{\max}
Berg ab	$S_{\max}/e^{\mu\alpha}$	S_{\max}	S_{\max}	$S_{\max}/e^{\mu\alpha}$
Tal zug	$S_{\max}(1+1/e^{\mu\alpha})/2-S_h$	$S_{\max}-S_h$	$S_{\max}-S_h$	$S_{\max}(1+1/e^{\mu\alpha})/2-S_h$

Tabelle 23: Seilkräfte an den Stationen in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration

Nr.06: Kraftänderung durch Beschleunigung / Verzögerung

Nach DIN EN 13223 gelten für Pendelbahnen im Nennbetrieb folgende Grenzwerte für die Beschleunigung und Verzögerung (Norm DIN EN 13223):

- $a_{\text{beschl,max}} = 0,5 \text{ m/s}^2$
- $a_{\text{verz,max}} = 0,5 \text{ m/s}^2$

Aus konservativer Sicht sollen diese Werte im Folgenden für die Betrachtung des Nennbetriebs verwendet werden, da davon auszugehen ist, dass die Anlagen in Bezug auf ihre größtmögliche Förderleistung nahe an diesen Werten betrieben werden. Die Kraftänderungen wirken ausschließlich beim Ein- und Ausfahren im Stationsbereich und bei der betrieblich üblichen verlangsamten Überfahrt von Stützen. Für die freie Zugseillänge sind diese Faktoren somit nur Abschnittsweise zu berücksichtigen.

Da bei der Stützenüberfahrt üblicherweise nur von der Maximalgeschwindigkeit auf einen ca. 20% niedrigeren Wert heruntergeregelt wird, z.B. von 10 m/s auf 8 m/s, somit nur eine kurze, zudem während des Fahrspiels reversible Einwirkung vorliegt, soll dieser Fall nicht weiter betrachtet werden.

Zur Stationsein- und -ausfahrt jedoch wirken die Kraftänderungen länger, zudem lokal nur unidirektional und könnten durch das Zusammenspiel aus der Seilumlenkung am nahen Antrieb und dem ebenfalls nahen Fahrzeug mit seiner Seilendbefestigung als Drallknebel aus Sicht der Seildrehung eine Rolle spielen.

In die dynamischen Kraftanteile wirken folgende Faktoren ein:

- das Kabinenleergewicht und der Beladungszustand
- das spezifische Seilgewicht und die im System verbaute Summe aller Seil-Bogenlängen (diese wird hier vereinfacht aus der schrägen Länge des Bahnprofils und einem erfahrungsbasiert geschätzten Längenzuschlag für die Stationen in Abhängigkeit des Seildurchmessers gebildet)
- dem Trägheitsmoment der im System verbauten Seilscheiben

In Anlehnung an (Günthner und Liedl 1999) entsteht somit für den zu berücksichtigenden Dynamikanteil folgender Formelausdruck:

$$S_D = \pm \sum m_i \cdot a = \pm \left[Q + 2 \cdot q \cdot \left(L_{\text{schräg}} + d \cdot \frac{2000 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) + \frac{Z}{2} \cdot m_{\text{Scheibe}} \cdot \frac{2}{3} \right] \cdot a \quad (40)$$

mit	S_D	Dynamischer Seilkraftanteil am Antrieb [kN]
	Q	Kabinengewicht [kg]
	q	spezifisches Gewicht des Zugseils [kg/m]
	$L_{\text{schräg}}$	Schräge Länge der Seilbahnstrecke
	d	Seilnennendurchmesser [mm]
	Z	Anzahl der Seilscheiben im System
	m	Masse einer Seilscheibe [kg], kann überschlägig mit $m=2000\text{kg} \cdot (d^2 / 900)$ angenommen werden ²⁵

Die Drehmomentänderung aus Beschleunigung/ Verzögerung beträgt analog zu Formel (15):

$$\Delta M_{t,\text{Fey},SD} = c_1 \cdot d \cdot S_D \quad (41)$$

Um die Wirkung zu überprüfen, wird beispielhaft eine Rechnung vorgenommen:

Seildurchmesser d :	25 mm
Spez. Seilgewicht q :	2,3 kg/m
Kabinenmasse Q (60 Pers):	9000 kg
Scheibenmasse M_{Scheibe} :	1390 kg
Anzahl Scheiben Z :	7 Stück
Schräge Länge $L_{\text{schräg}}$:	2000 m
Beschleunigung a :	0,5 m/s ²

Die Seilkraft aus Beschleunigung beträgt im Beispiel 10,6 kN. Bei einem Seale-Seil der Nennfestigkeit 1960 N/mm² und einer Mindestbruchkraft von $F_{\text{min}}=440$ kN unter Sicherheitsfaktor 6 entspricht dies einem Anteil von 14,5 % der Seilvorspannung.

Nr.07 bis Nr.09: siehe Nr.03 „Zusammengefasste Fehler“

Nr.10: Schmierung mangelhaft

Die Torsionsfedereigenschaften eines Seiles wurden bisher unter rein elastischen Gesichtspunkten betrachtet. Dabei wird dem Seil und seinen Drähten ein gewisser Schmierungszustand unterstellt, der bei Biegung und Dehnung das Gleiten der Drähte und Litzen gegeneinander erlaubt (Möller und Jamil 2002).

Mit Blick auf die Verdrehung, somit Drall-Speicherung hat ein Mangel an Schmierung einen Einfluss, denn das lokal beeinträchtigte Seil wird durch die erhöhte innere Reibung daran gehindert, sich wieder in seinen Ausgangszustand zurück zu drehen. Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen Beispiele von mangelhaft geschmierten Seilen und Litzen, die an den Litzen- und Drahtberührungspunkten Korrosion ausbildeten und somit innere Reibung, Verschleiß und Drahtbrüche begünstigen. Der hier zu betrachtende schädigende Mechanismus, nämlich dass das verdrehte Seil unter erhöhten sekundären Drahtzugspannungen durch die innere Reibung in den Stationen nun Biegewechseln ausgesetzt wird, wird somit durch mangelnde Schmierung begünstigt.

²⁵ Auf Basis von vorliegenden Scheibengewichten wurde eine einfache Beziehung gebildet, die mittels des vorgegebenen D/d -Verhältnisses vom Quadrat des Seildurchmessers d abhängig ist und somit den Materialzuwachs bei steigendem Durchmesser berücksichtigt.



Abbildung 66: Korrosion in der Litzengasse eines Seilbahnförderseils durch mangelnde Schmierung



Abbildung 67: Korrosion in der 2. Drahtlage einer Litze desselben Seils

Über die Quantität dieses Effekts stehen nach heutigem Stand der Technik keine Kennwerte zur Verfügung, diese wären jedoch durch systematische Drehmomentversuche unter verschiedenen Schmier- und Korrosionsgraden anhand der Hysterese des Seildrehmoments unter wiederholten Belastungszyklen ermittelbar. Da Drehmomentversuche mit künstlich korrodierten Seilen nicht mit einfachen Mitteln im Rahmen dieser Arbeit durchführbar sind, sei vorerst auf die fördernde Wirkung der mangelnden Schmierung bzw. Korrosion auf die Drallspeicherung hingewiesen.

Eine Nachschmierung und somit die Herabsetzung der inneren Reibung von Seilen sind zudem jederzeit betrieblich möglich. Daher wird diese Maßnahme den potentiellen Verbesserungsmaßnahmen bei Drallerscheinungen zugeschrieben und entsprechend bei der theoretischen Betrachtung eine fachgerechte Schmierung vorausgesetzt.

Nr.11: E-Modul zu niedrig (Seil ist „weich“)

Mechanisch betrachtet nehmen hauptsächlich folgende Parameter Einfluss auf den Elastizitätsmodul und letztlich auf die Ist-Schlaglänge eines Seilbahnseils unter Belastung im Betrieb:

- Seileinlage – Material (geflochtenes oder geschlagenes Faserseil oder Massivpolymer), Querstabilität und Durchmesser
- Produktions-Schlaglänge, Durchmesser und Sperrung
- Vorformung von Drähten und Litzen

Alle genannten Parameter unterliegen einer gewissen Toleranz, so dass bei ungünstigem Zusammenfallen der unteren Toleranzgrenzen ein merkliches, „weiches“ Seil mit vergleichsweise niedrigem Elastizitätsmodul entstehen kann. Regelwerke wie die technischen Lieferbedingungen für Seile der BOSeil (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie 11-2004) aber auch interne Qualitätsvorschriften der Hersteller fordern eine Überprüfung und Einhaltung der geforderten Mindestwerte, so dass bis auf den seltenen Fall von nicht erkannten Mängeln ein unzureichender E-Modul weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Bei begründetem Verdacht auf einen Mangel kann dies quantitativ durch regelmäßige Messung von Durchmesser und Schlaglänge sowie qualitativ im Betrieb am Dehnungsverlauf bzw. Spannungsbewegungen sowie dem Vibrationsverhalten des Seils festgestellt werden. Maßnahmen zur Verbesserung können hier nicht durchgeführt werden.

Nr.12: Höenschlag (Seilscheibe)

Seilscheiben können sich fertigungsbedingt, aber auch durch betriebliche Ereignisse und Belastungen verformen (Kuczera 2012) und dabei z.B. einen sogenannten Höenschlag ausbilden. Da die Antriebs- und Umlenkscheiben von laufenden Seilbahnseilen bei einem geforderten Mindestdurchmesser von 80 x Seilnenndurchmesser (Norm DIN EN 12927-2)

üblicher Weise Dimensionen zwischen 2,0 und 5,0 m Durchmesser vorweisen, ist allein durch Fertigungstoleranzen und Elastizitäten von einem gewissen Höhengschlag auszugehen. Durch das Auf- und Abwandern des Seils in der Frequenz der Scheibenumdrehung werden Radialkräfte und Rollbewegungen durch den Flankenkontakt zwischen Seil und Gummirille begünstigt, vgl. Abbildung 68: das Seil läuft je nach Höhenabweichung der Scheibe am oberen oder unteren Rand des Futters an und rollt unter Schrägzug in Richtung des Rillengrunds zurück.

Steinbach liefert zwar theoretische Zusammenhänge zur Abschätzung der erwartbaren Drehung bei konstruktiv erforderlichem Schrägzug für z.B. Krananwendungen (Steinbach 2007), jedoch ist dieser Zustand von Schrägzug durch Höhengschlag für Seilbahnen nicht tragbar, da die Seilachse insbesondere in der Station exakt verlaufen muss, um Vibrationen zu minimieren und Kollisionen mit seilnahen Überwachungseinrichtungen der Steuerung²⁶ zu verhindern. Daher muss ein vorliegender Höhengschlag durch fachgerechtes Ausdrehen des Rillenfutters vor Ort zu einer kontinuierlichen Höhenlinie instandgesetzt werden und soll daher in den theoretischen Betrachtungen nicht weiter behandelt werden.

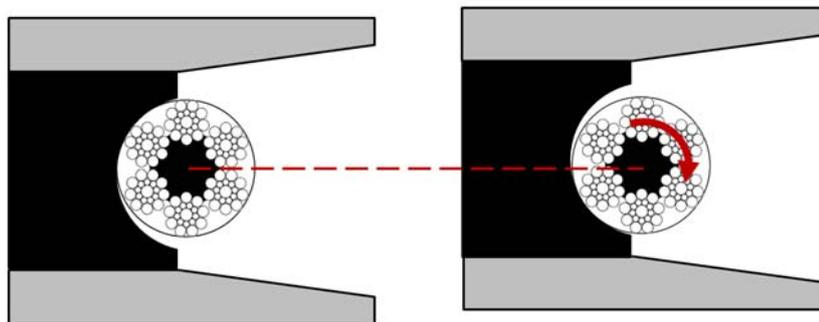


Abbildung 68: Drallwirkung durch Radialkräfte bei Höhengschlag

Bei nennenswerten Drallerscheinungen auf bereits in Betrieb genommenen Seilbahnanlagen wird empfohlen, die einzelnen Seilscheiben auf Höhengschlag zu prüfen und geeignete Ersatzmaßnahmen zu treffen, neben dem Ausdrehen des Futters kann dies ein Nachjustieren der Scheibenlagerung oder eine Versteifung des Stahlbaus beinhalten.

Nr.13: Drallschlaffheit / Weichheit

Der qualitative Begriff der Drallschlaffheit oder Weichheit eines Seiles lässt sich primär auf drei Einflussfaktoren zurückführen:

- die Qualität der Herstellung
- die verwendete Seilkonstruktion
- den Schmierungsstatus des Seiles (vgl. Nr. 10 „Schmierung mangelhaft“)

Im praktischen Einsatz von Seilbahnseilen wurden von Betreibern, gegebenenfalls auch von Anwohnern nach Seilwechseln Unterschiede im Fahr- und Geräuschverhalten festgestellt, obwohl faktisch ein Ersatzseil mit gleichen konstruktiven Eigenschaften eingesetzt wurde, vgl. z.B. (Inäbnit 2005). Dies ist unter anderem ein Hinweis darauf, dass Drahtseile und besonders Seilbahnseile als Einzelanfertigung **produktionstechnischen Schwankungen** unterworfen sind, die von vielfältigen Erfahrungen und dem firmeninternen Wissen des Herstellers abhängen (Bucher 1958). Nicht nur die Aufmerksamkeit des Bedieners der Verseilmaschine sondern auch die fallweise gewählten Einstellparameter der Maschine wie zum Beispiel die eingestellten Drahtspannungen oder der Vorformungsgrad der Drähte und Litzen beeinflussen die Steifigkeit und letztlich die Drallschlaffheit bzw. Weichheit eines Drahtseils. Diese Faktoren können jedoch nicht sinnvoll in ein allgemeingültiges

²⁶ z.B. Zugseilkondensator zur Signalübertragung bei Pendelbahnen oder Blendenschalter in der Station von kuppelbaren Umlaufbahnen

Beurteilungsmodell zur Seildrehung und -verdrehung eingebunden werden. Da ein unzureichend verseiltes Seilbahn-Drahtseil grundsätzlich wie beim Elastizitätsmodul durch Qualitätsmanagement-Prozesse eines erfahrenen Herstellers vermieden werden sollte, wird dieser Fehlerpfad aus der Herstellung hier nicht weiter verfolgt. Im Falle einer im Feld beobachteten Drallschlaffheit wird empfohlen, mit eventuell vorhandenen Reparaturstücken oder Rückhaltemustern des Herstellers einen Drehmomentversuch zu fahren und korrigierte Drehmomentkonstanten c_i zu ermitteln. Da sich drallschlaffe Seile zudem leichter durch äußere Einflüsse verdrehen lassen, ist besonders genau auf eine exakte Spurung der Strecke und auf guten Zustand der Gummifütterungen von Scheiben und Rollen und fachgerechte Passform der Rillen zu achten.

Die **Verdichtung oder Kompaktierung** einer Litze macht ein Seil grundsätzlich gegenüber den konventionellen Runddrahtlitzen steifer, da die Hohlräume zwischen den Runddrähten bei reduzierter Elastizität der Litze durch plastische Verformung stärker ausgefüllt werden (vgl. auch Kapitel 1.1). Da die Auswirkung der Verdichtung auf die Drehsteifigkeit und qualitativ feststellbare Flexibilität eines Drahtseils in der Literatur kaum behandelt wird, werden vergleichende Drehmomentkennlinien mit kompaktierten Gleichschlagseilen vom Typ 6xK19-FC mit unterschiedlichem Durchmesser experimentell ermittelt, um eine Aussage über das Ausmaß der Verbesserung treffen zu können. Es wurden die gleichen Maschinenparameter wie in der Untersuchung des Testseils für die Dauerbiegeversuche angewandt, vgl. Kapitel 4.1. Als Versuchseile konnten Rückhaltemuster aus dem Lager eines Seilherstellers verwendet werden, so dass jeweils kompaktierte und nicht-kompaktierte Seile im Durchmesserbereich 15-16 mm sowie 24 mm vorlagen. Die Auswirkung der Verdichtung lässt sich anhand Abbildung 69 erkennen.

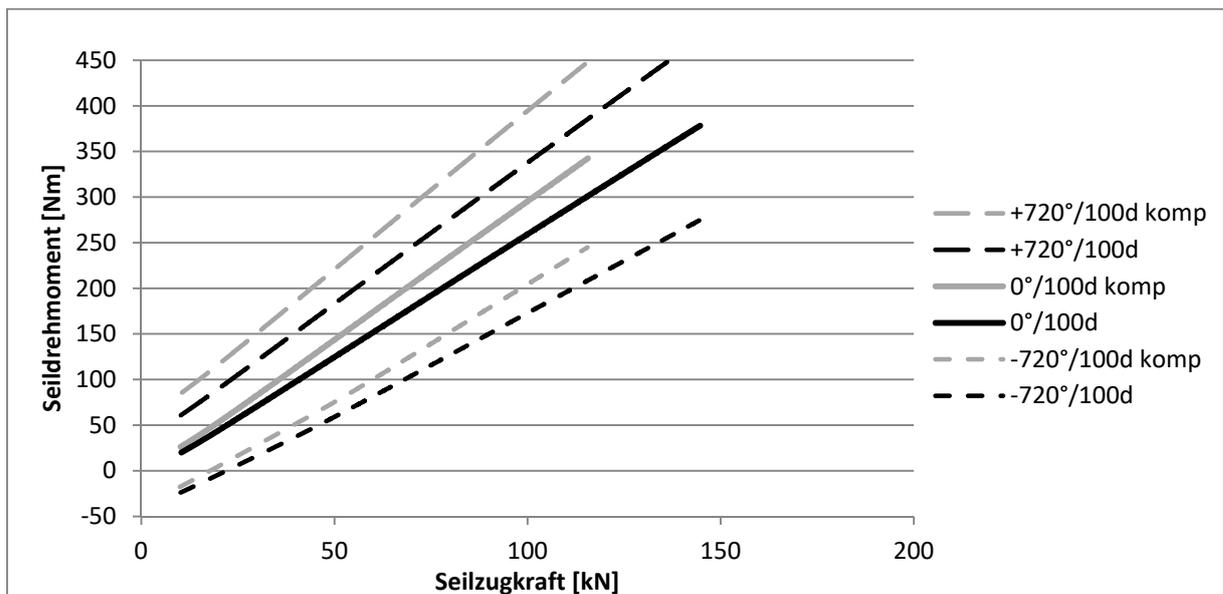


Abbildung 69: Vergleich ausgewählter Drehmomentkurven der Seile 24 6x19S-FC und 24 6xK19S-FC (Abkürzung „komp“ steht für Kompaktierung bzw. Verdichtung)

Wie erwartet zeigen die kompaktierten Seile steilere Drehmomentkurven als die Seile mit Runddrahtlitzen. Die in den zusätzlichen Versuchen ermittelten Drehmomentkonstanten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Drehmoment-konstante	15 6x19S-FC 1960 B zZ	16 6xK17S-FC 1960 B zZ	24 6x19S-FC 1570 B zZ	24 6xK19S-FC 1370 B zZ
c_1	0,106	0,116	0,108	0,123
c_2	0,127	0,124	0,140	0,160
$c_3 \cdot 10^3$	0,269	0,697	0,606	0,717

Tabelle 24: ermittelte Drehmomentkonstanten kompaktierter und nicht-kompaktierter Seile

Aus diesen Daten lassen sich gemäß Tabelle 25 gemittelte Drehmomentkonstanten bilden, die für rechnerische Abschätzungen bei Seilbahnseilen mit großen erwarteten Verdrehwinkeln verwendet werden können.

Drehmomentkonstante	Seale 6-litzig mit Faserseinlage	
	nicht-kompaktiert	kompaktiert
c_1	0,107	0,120
c_2	0,134	0,142
$c_3 \cdot 10^3$	0,438	0,707

Tabelle 25: gemittelte Drehmomentkonstanten für 6-litzige Seilbahnseile in Seale-Konstruktion mit Fasereinlage

Prinzipiell entsteht bei der rechnerischen Drallbewertung eine konservative Betrachtungslage, wenn die Kompaktierung der Litzen vernachlässigt wird. Die Versuche decken jedoch noch nicht den Durchmesserbereich und die Konstruktionen moderner Umlaufbahnen und sehr großer Pendelbahnen ab. Bei großen Seilennendurchmessern oder vieldräftigen Litzenkonstruktionen wie z.B. 6x36 Warrington-Seale, wird empfohlen, weitere Drehmomentversuche zu fahren.

Die Versuche zeigen auch, dass die kompaktierten Litzen gegenüber denjenigen aus Runddrähten eine höhere innere Reibung zu überwinden haben. Während sich Seile mit Runddraht-Litzen über die wiederholten Belastungszyklen im Drehmomentversuch asymptotisch nahezu einer einzigen gemeinsamen Kennlinie zur Belastung und Entlastung annähern, arbeiten die kompaktierten Litzen auch bei wiederholter Belastung in Form einer Hysterese-Kurve, vgl. Abbildung 70. Selbst bei einer wiederholten Anzahl Belastungszyklen bleibt die Hysterese erhalten, dieser Effekt ist im zugedrehten Zustand besonders ausgeprägt.

Zusammenfassend lässt sich dies so interpretieren, dass Seile mit kompaktierten Litzen gegenüber solchen mit Runddrahtlitzen durch die steilere Drehmomentkennlinie nicht nur ein erhöhtes Moment bei gleicher Zugkraft aufbauen, sondern zum Abbau des Drehmoments Energie in Form von Reibung umsetzen müssen. Übertragen bedeutet dies, dass ein Seil mit kompaktierten Litzen in einem gewissen Maße Verdrehung besser zu speichern vermag als Seile mit Runddrahtlitzen. Über die Quantität dieses Effekts kann im Rahmen dieser Abhandlung jedoch nicht weiter eingegangen werden.

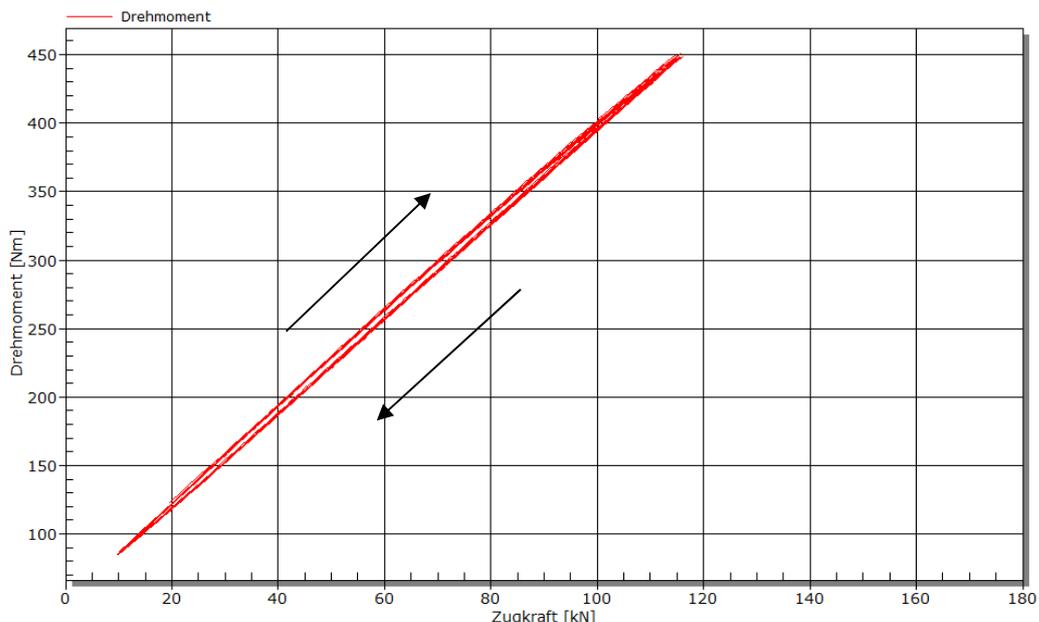


Abbildung 70: Bleibende Hysterese über 10 Belastungszyklen beim Prüfling 24 6xK19S, um 720°/100d zugedreht

Die innere Reibung zwischen den Drähten oder sogar der Korrosionszustand haben ebenfalls Auswirkungen auf die Drallschlaffheit eines Seiles, die sich durch den **Schmiermittelzustand** bedingt einstellen lassen, vgl. dazu Nr. 10 „Schmierung mangelhaft“. Zwar zeigt sich ein Seil mit mangelhafter Schmierung oder Korrosion durch den hohen Reibwert der Drähte in der Handhabung steifer, dies hat jedoch erneut fördernde Auswirkung auf die Fähigkeit eines Seils, Verdrehung zu speichern. Zudem begünstigt ein hoher Reibwert zwischen Seil und Rolle oder Scheibe das „Anhaften“ an der Rollenflanke und Abrollen des Seils in den Rillengrund z.B. bei nicht idealer Spur, Seitenwind oder dynamischen Betriebseinflüssen (vgl. Zusatz: Schrägzug-Einfluss). Neben den positiven Lebensdauereigenschaften von ausreichend geschmierten Seilen wird daher weiterhin, auch aus Sicht der Drallschlaffheit eines Drahtseils, eine fachgerechte Schmierung als unerlässlich gesehen und bei den theoretischen Betrachtungen vorausgesetzt.

Nr.14: Normalkraft zu hoch

Die Pressung zwischen Seil und mit Gummi gefütterter Seilrolle kann durch lange Spannfelder, hohe Seileigengewichte und eine zu klein definierte Rollenanzahl bzw. bei ungleich tragenden Rollen einer Batterie sehr hoch werden. Dies kann zu einer erhöhten Normalkraft und letztlich zu einem nennenswerten rolleninduzierten Drehmoment führen. Die Überbeanspruchung zeigt sich auch betrieblich im Verschleiß des Rollengummis, der unter erhöhter Walkarbeit thermisch versagt (Malota 1958). Prinzipiell kann das resultierende Drehmoment durch die Formelzusammenhänge aus Nr. 03 berechnet werden. Da es sich bei Überbeanspruchung der Rollen jedoch um einen konstruktiven Mangel bzw. eine falsche Einstellung der Rolle handelt, wird dieser Fehler für das Modell nicht weiter erschlossen. Sollte ein erhöhter Rollendruck durch übermäßigen Rollenverschleiß festgestellt werden (vgl. Abbildung 71, wird empfohlen, die Spur der Rollenbatterie zu prüfen bzw. die Rollenkraft durch geeignete, verträgliche konstruktive oder betriebliche Maßnahmen zu reduzieren.



Abbildung 71: Rollen-Einlagegummi mit thermischem Versagensbild durch Überbelastung

Ergänzung: Schrägzug-Einfluss von Rollen und Seilspur

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass ein wichtiger Verursacher von Seildrehung und schädlicher Verdrehung der mögliche schräge Lauf eines Seils auf die Flanken von Führungsrollen ist (Verreet 1996). Dies hat insbesondere bei Förderanlagen mit vergleichsweise kurzen Abständen zwischen Umlenkrollen, Trommeln oder Hakenflaschen zum Teil bemerkenswerte Relevanz (Steinbach 2007), deren Auswirkungen auf die Seillebensdauer in der Forschungsarbeit von (Schönherr 2005) untersucht sind. Siehe dazu auch Kapitel 9.2 „Hinweise zur Übertragung auf allgemeine Seiltriebe“.

Bei Seilbahnen haben die mechanischen Führungselemente meist Abstände von mehreren hundert Metern, sodass hier kaum messbare Schrägzugwinkel entstehen. Jedoch zeigen sich an den Verschleißbildern der Führungsrolleneinlagen asymmetrische Spurbilder, wenn die Rollenbatterien an den Stützen und in den Stationen von Seilschwebbahnen nicht in der Flucht des Seils liegen (vgl. Abbildung 72). Derartige Spurfehler aus Montage oder Setzbewegungen der Bauwerke führen nachweislich zu Seildrehung (Oplatka 2004), werden jedoch üblicherweise bei den regelmäßigen Kontrollen der Anlagen erkannt und durch

Nachstellen eliminiert. Da diese Drehungsfaktoren nicht systemimmanent sind, sollen sie bei den nachfolgenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet werden.

Einzig bei Standseilbahnen kommt in Kurven durch die Führungsrollen in der Fahrbahnmitte systemimmanenter Schrägzug vor. Hier hebt das Fahrzeug während der Fahrt das Zugseil aus den Rollen und legt selbiges nach der Überfahrt wieder ab, so dass die Seilachse in Abhängigkeit vom Aufhängepunkt am Fahrzeug ihre Ausrichtung zur Rolle verlässt und somit schräg gezogen wird. Zur Optimierung dieses Verhaltens werden in Standseilbahnen oft Kunststoffführungsrollen eingesetzt, die durch ihren vergleichsweise niedrigen Reibkoeffizienten gegenüber dem Seil die Dreh- und Verdrehungserscheinungen mindern können (vgl. Abbildung 73). Standseilbahnen sollen bei den grundlegenden Untersuchungen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden, jedoch können sie durch die angestrebte zukünftige Übertragung der Erkenntnisse auf andere Seiltriebe profitieren.

Neben der Minimierung der Reibkoeffizienten von Rollenborden und Berührflächen von Seilfangelementen kann eine gute, fachgerechte Schmierung des Seils das Gleiten in den Rillengrund bei Schrägzug verbessern und somit die Drehung mindern. Dies ist bei reibschlüssigen Antrieben jedoch nicht trivial zu bewerkstelligen und bedarf einer sensiblen Beobachtung und Feineinstellung des Schmierprozesses. Eine übermäßige Reduzierung des Reibkoeffizienten μ kann die übertragbare Umfangskraft herabsetzen, so dass die Anlage im schlimmsten Fall durchrutscht. Insbesondere bei Anlagen ohne Unterseil und einer hohen Kraftverhältnis S_{zug} zu S_{ab} am Antrieb ist dies zu beachten. Bei Windenantrieben hingegen kann die Nachschmierung großzügiger erfolgen.



Abbildung 72: Rollenbatterie mit asymmetrischer Spur an einem Skilift im Spitzingsee-Gebiet



Abbildung 73: Kunststoffführungsrollen zur Minderung von Seildrehung in Lugano

5.3 Zusammenfassung theoretisches Seildrehmoment einer Pendelbahn

Im Folgenden werden alle theoretischen Komponenten zu einer Gesamtübersicht zusammengefasst, welche die erwartbare Drehmomententwicklung berechenbar macht und somit Rückschlüsse auf die Drehintensität erlaubt. Tabelle 26 gibt eine Übersicht der zuvor erschlossenen Drehmomentgleichungen und Empfehlungen bei gegebenen Anlagenkonfigurationen und individuellen Ereignissen.

Nr.	Fehlerbezeichnung → Art der Behandlung	Formel / Empfehlung
01	Spannungsdifferenz durch Seileigengewicht → Formel	$\Delta M_{t,Fey,SH} = c_1 \cdot d \cdot q \cdot x_i \cdot \tan \alpha_i$
02	Seilkraft-Änderung bei Berg- oder Talfahrt → Formel	$\Delta M_{t,Fey,SR} = c_1 \cdot d \cdot \left(\sum F_{R,St} + \sum F_{R,Sr} \right)$
03	Reibverlust / Walkarbeit → Formel	$M_{Dreh,S} = \mu \cdot S \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta \cdot d$
04	s. Nr.03	s. Nr.03
05	Kraftänderung durch Umfangskraft → Formel	$\Delta M_{t,Fey,SU} = c_1 \cdot d \cdot (S_{zug} - S_{ab})$
06	Kraftänderung durch Beschleunigung/Verzögerung → Formel	$\Delta M_{t,Fey,SD} = c_1 \cdot d \cdot \left(\pm \sum m_i \cdot a \right)$
07	s. Nr.03	s. Nr.03
08	s. Nr.03	s. Nr.03
09	s. Nr.03	s. Nr.03
10	Schmierung mangelhaft → Empfehlung	Nachschmieren
11	E-Modul zu niedrig (Seil ist „weich“) → nicht behandelbar	--
12	Höhenschlag (Seilscheibe) → Empfehlung	Rillenfutter ausdrehen; Scheibenlagerung nachjustieren; Stahlbau versteifen
13	Drallschlaffheit / Weichheit → Empfehlung	Drallsteife Seilkonstruktion wählen; Spur kontrollieren und ggf. nachjustieren; Zustand und Rillenform der Fütterungen prüfen
14	Normalkraft zu hoch (Rolle) → Formel / Empfehlung	$M_{Dreh,S} = \mu \cdot S \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta \cdot d$ Formel aus Nr. 03 mit realen Werten besetzen oder konstruktiven Mangel durch Einbau weiterer Stützrollen beheben
Ergänzung	Schrägzug → Literaturhinweis / Empfehlung	Berücksichtigung Literaturen: (Oplatka 2004; Schönherr 2005; Steinbach 2007); Reibkoeffizient von Rollenborden / Seilfangelementen minimieren; nachschröieren

Tabelle 26: Übersicht alle Formeln / Empfehlungen aus Nr. 01-14 und Zusatz

Nun kann für eine zu betrachtende Seilbahn das Formelwerk anhand des nachfolgenden Ablaufdiagramms in Abbildung 74 zusammengestellt werden. Prinzipiell ist mit den in dieser Abhandlung gemachten Angaben eine vollständige manuelle Berechnung ohne Nutzung einer speziellen Softwarelösung möglich. Vereinfacht können jedoch automatisierte Rechenhilfen wie zum Beispiel Microsoft Excel genutzt werden, um den Prozess softwareseitig zu unterstützen und parameterbasierte Berechnungsoberfläche zur Verfügung zu stellen. Dazu wird in Tabelle 27 ein Stammdatenblatt für Pendelbahnen definiert, das alle benötigten projektspezifischen Eingaben übersichtlich darstellt und dem im Hintergrund die zuvor definierten abhängigen Kennwerte angehängt werden können. Anders ausgedrückt

stellt das Stammdatenblatt eine Checkliste der benötigten Daten einer individuellen Seilbahnanlage dar, auf deren Basis die Drehmomentanalyse durchgeführt werden kann.

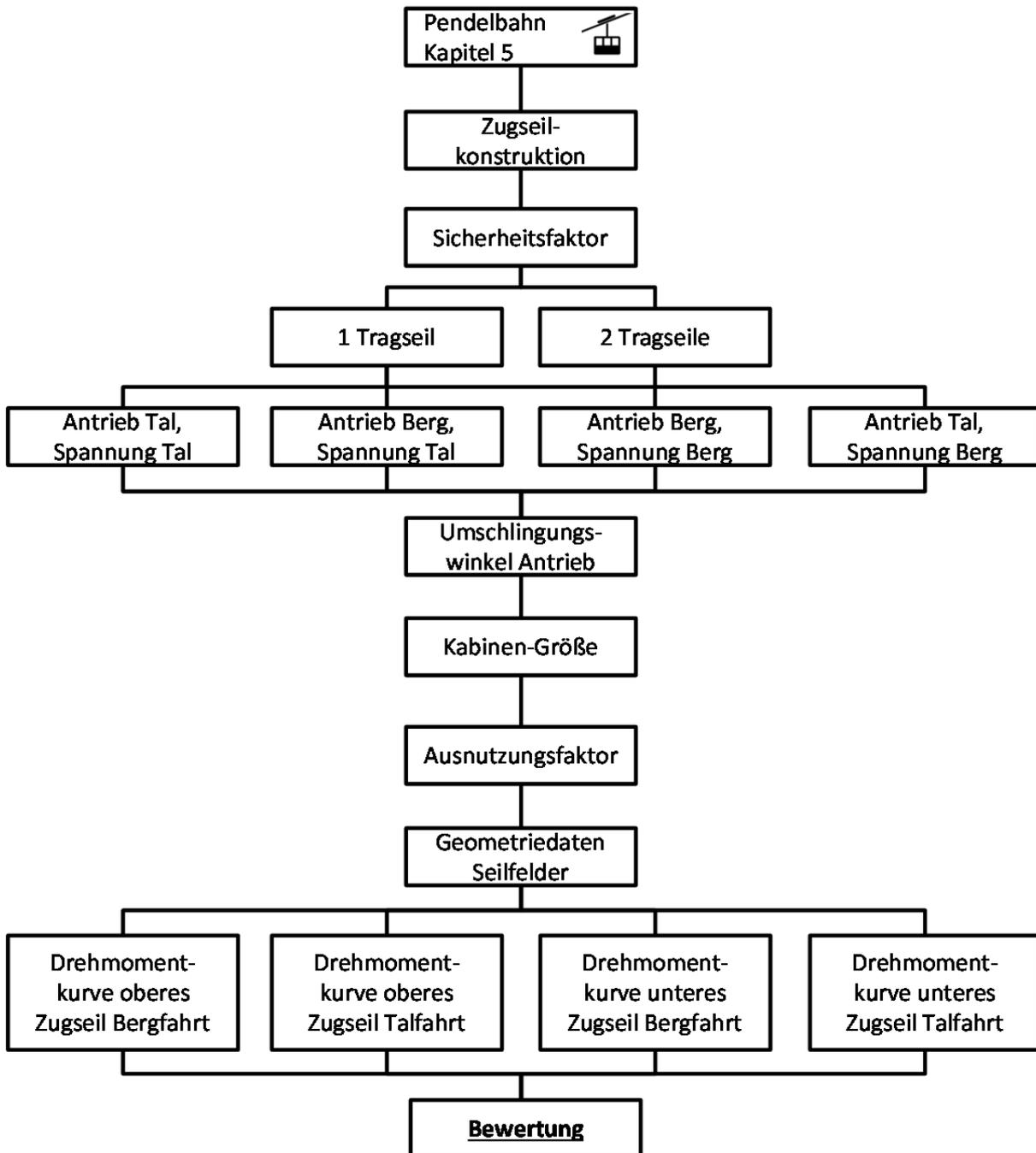


Abbildung 74: Ablaufdiagramm zur Erstellung einer Drehmomentkurve

Die festgestellten Drehmomentwerte bilden nun die theoretische Seite, somit den erwarteten SOLL-Zustand. In den nachfolgenden Kapiteln wird nun der IST-Zustand ermittelt, um abschließend ein Gesamtmodell zur Gegenüberstellung der SOLL- und IST-Seite zu entwickeln. Dies ermöglicht, bei theoretischer Betrachtung einer Seilbahnanlage den in Realität resultierenden IST-Zustand der Seilschädigung durch Drall rechnerisch abzuschätzen.

Stammdatenblatt Pendelbahnen		
Anlagenname		
Ort		
Merkmale	Wert	
Seildaten		
Seilnennendurchmesser [mm]		<ul style="list-style-type: none"> • Übernahme Radius für Drehmomentberechnung
Seilkonstruktion und Schlagrichtung		<ul style="list-style-type: none"> • Übernahme Ø Seilmetergewicht • Übernahme Ø Mindestbruchkraft (MBK) • Übernahme Schlagwinkel und Feyrer-Faktoren c_i aus hinterlegten Tabellen • Übernahme der Korrekten Vorzeichen bei auf- und Abwärtsfahrt für Drehmomente
Mechanische Einrichtungen		
Fahrzeug Fassungsvermögen [Pers.]		<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung Vollgewichtskraft
Fangbremse vorhanden?		<ul style="list-style-type: none"> • Übernahme Seilsicherheitsfaktor
Lage von Antrieb- und Spannstation		<ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung der korrekten Näherungsgleichungen für Seilkräfte
Nutzungsgrad η [-]		<ul style="list-style-type: none"> • Default Wert: 70%
Reibbeiwert μ der Antriebsscheibe [-]		<ul style="list-style-type: none"> • Default Wert: 0,3
Umschlingungswinkel α am Antrieb [°]		<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung $e^{\mu\alpha}$
Seillinie / Feldgeometrie		
Horizontale Bahnlänge [m]		<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung mittlere Neigung $\bar{\alpha}$
Höhenunterschied [m]		<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung Höhenspannung
Anzahl Stützen [Stück]		<ul style="list-style-type: none"> • Generierung ausreichender Eingabefelder
X-Koordinate Stütze i ab Talstation		<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung Feldneigung Feld i • Stützenknickwinkel Stütze i
Y-Koordinate Stütze i ab Talstation		
X-Koordinate Stütze i+1 ab Talstation		
Y-Koordinate Stütze i+1 ab Talstation		
...	...	

Tabelle 27: Stammdatenblatt für Pendelbahnen

5.4 Digitale Seildrehungsmessung

Zur systematischen Untersuchung der Seildrehung in der Bergbahnpraxis wurde im Rahmen der vorliegenden Abhandlung die Idee zu einer neuartigen digitalen messtechnischen Lösung entwickelt. Die Drehung der Seile soll beliebig auf der freien Strecke aufgezeichnet und dem Ort zugeordnet werden können, so dass die theoretischen Annahmen überprüft werden können, aber auch Anomalien der Drehung an individuellen Anlagen erkannt werden können. Im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit wurde ein Grundkonzept als Prototyp aufgebaut und nach erfolgreichem Test zu einer robusten, praxistauglichen Lösung professionell überarbeitet. Das Messsystem erhielt den Projektnamen „Drehsensor“, der im Folgenden vereinfachend verwendet wird.

Ein dreiachsiger Absolut-Beschleunigungssensor ist physikalisch in der Lage, seine Ausrichtung gegenüber der Erdanziehung zu bestimmen. Appliziert man diesen auf ein geneigtes Seil, werden insbesondere die beiden Achsen x und z , welche die Querschnittsfläche des Seils aufspannen, durch die Erdbeschleunigung beeinflusst. Die übliche Seilneigung im Einsatzgebiet von Seilbahnen verhindert diese Wirkung nicht. Die Bildung des Tangens der beiden gemessenen Vektorkomponenten a und b der Erdbeschleunigung führt direkt zur Winkelposition des Sensors auf der Seiloberfläche, vgl. Abbildung 75 in Anlehnung an (Traub 2011).

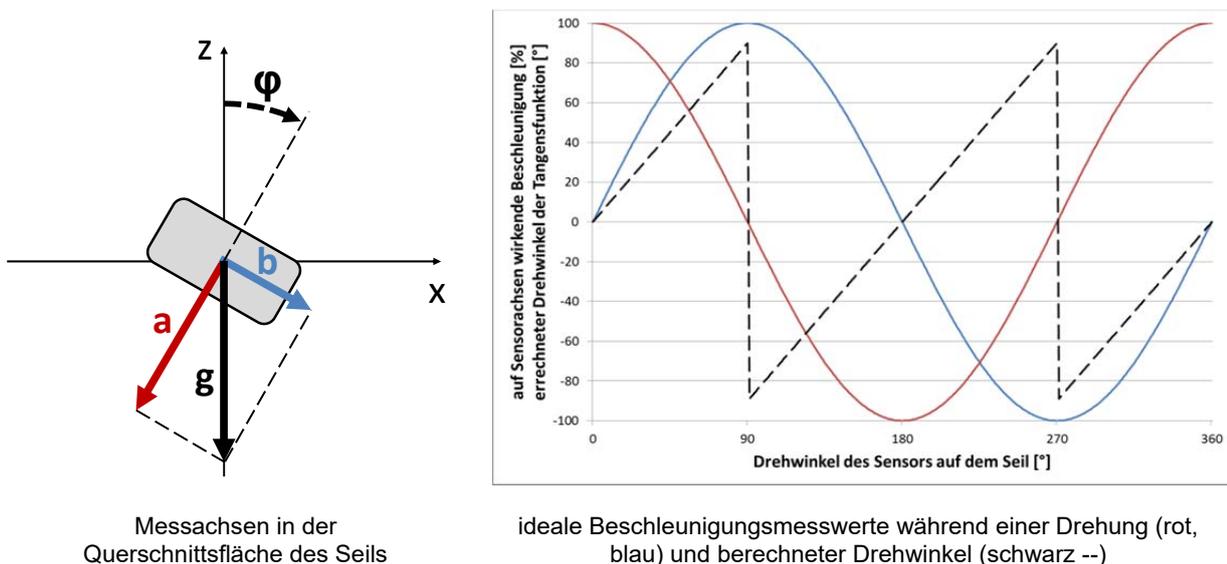


Abbildung 75: Skizze zur Drehungsmessung mit Hilfe eines dreiachsigen Beschleunigungssensors

Es existierten bis zur Entwicklung des neuartigen Drehsensors keinerlei Messsysteme, die direkt auf dem Seil angeordnet werden und mit Nennfahrgeschwindigkeit über Stützen und Seilreiter bewegt werden konnten. Das Konzept des Sensors musste daher vollkommen neu entwickelt werden. Er ist möglichst klein, robust und kostengünstig ausgeführt, so dass Inbetriebnahme- und Experimentierphasen durchgeführt werden können, ohne die Sensorhardware zu zerstören oder die Bahnanlage durch den Fremdkörper zu beschädigen.

Da moderne Mobiltelefone, Spielekonsolen oder Schrittzähler die benötigte Technik bereits als miniaturisierte Massenware nutzen, konnte die speziell angefertigte Sensorplatine kleinformatig ausgeführt werden (vgl. Abbildung 76). Der Drehsensor besteht somit hauptsächlich aus dem bereits genannten Beschleunigungsaufnehmer, einem Datenspeicher, einem Mikroprozessor zur Steuerung und einer Stromversorgung.

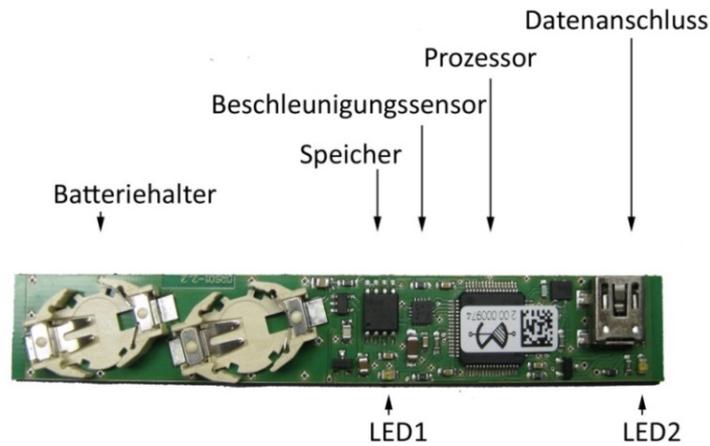


Abbildung 76: Übersicht der Drehsensorplatine

Die Messgenauigkeit des Systems kann zwischen 2-, 4- und 8-facher Erdbeschleunigung gewählt werden. Der jeweilige Messbereich wird mit 256 Schritten aufgelöst. Die Frequenz ist zwischen 1 und 1000 Hz wählbar, so dass im Zweifelsfall auch litzeninduzierte Schwingungen bei Berücksichtigung des Abtasttheorems nach Nyquist-Shannon²⁷ sicher erkannt und bei Bedarf isoliert werden können (Profos und Pfeifer 1994). Der verwendete 8 MB Flash-Speicher erlaubt bei einer Messfrequenz von 100 Hz eine Aufnahmedauer von 3,5 Stunden. Die Messelektronik wird von einem Edelstahlrohr mit rechteckigem Querschnitt geschützt, das an den Enden mit Polyamid-Anlaufzungen versehen ist, um den sanften Lauf des Systems auf Stützenrollen zu gewährleisten, wie die Zeichnung in Abbildung 77 verdeutlicht.

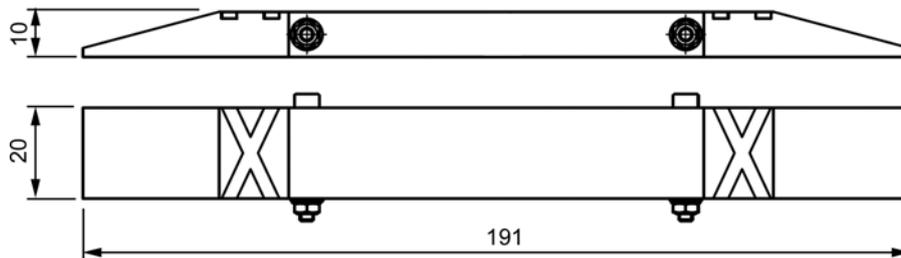


Abbildung 77: Gehäuse des Drehsensors

Die Form entstand in Anlehnung an die üblichen Ausführungen von Seilbahn-Fahrzeugklemmen, die ebenfalls dieser Anforderung genügen müssen, dabei jedoch noch deutlich größer dimensioniert sind (vgl. Abbildung 78).

²⁷ Dem Nyquist-Shannon Abtasttheorem zur Folge muss eine zu messende Frequenz mindestens mit der doppelten Abtastrate aufgenommen werden, um diese sicher in der nachfolgenden Datenanalyse identifizieren zu können.



Abbildung 78: Vorbildkonstruktion einer im Betrieb nicht lösbaren Fahrzeugklemme, System Leitner

Zur Montage wird zwischen Sensor und Seil ein EPDM-Band²⁸ gelegt, um das Seil nicht durch Querkräfte und Materialkontakt zu beschädigen, falls das Gehäuse je nach Drehungszustand zwischen Seil und Rollen gelangt. Anschließend erfolgt die Befestigung des Sensors mit weichem Abbinddraht, wie er in der Konfektionierung von Drahtseilen verwendet wird. Auch dieser beschädigt das Seil nicht, vgl. Abbildung 79 (Brenner und Kühner 2013). Der Gesamtaufbau wird abschließend zur Sicherheit vollständig mit Gewebeklebeband umwickelt. Abbildung 80 zeigt Einsätze des Systems auf Zugseilen von Pendelbahnen.

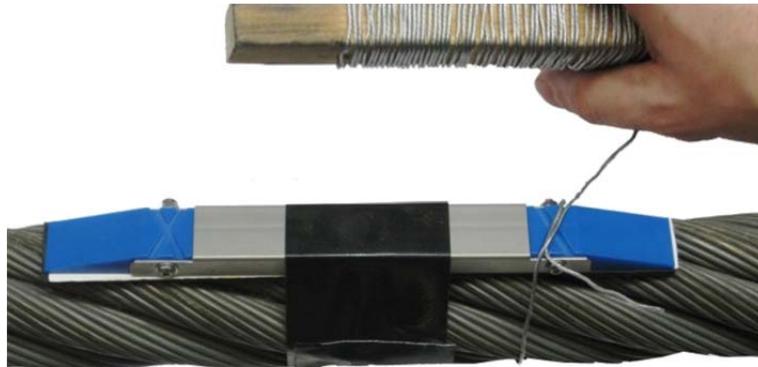


Abbildung 79: Befestigung des Sensors mit Abbinddraht

Nun ist es möglich, durch Darstellung des Verlaufs der Messungen beider Achsen in der Querschnittsfläche des Seils, hier die y- und z-Achse, den Drehwinkel und seine Richtung über der Zeit abzubilden. Durch Kenntnis der Anlagenfahrgeschwindigkeit und des Streckenprofils kann man nun erstmalig den absoluten Drehwinkel des Seils während der Fahrt auf wenige Meter genau referenzieren. Diese Information ist gänzlich neu und erschließt bisher ungenutzte Möglichkeiten der Seilanalyse und Anlagenbewertung. Durch eine rechnerische Betrachtung der wirkenden Seilkräfte lassen sich nun systemimmanente und vermeidbare Drehung voneinander trennen (vgl. auch (Kühner 2015)).

²⁸ Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk, ein synthetisch hergestelltes Gummi-Material (Röthemeyer und Sommer 2013)



Montierter Drehsensor auf Zugseil der Transportbahn in Müren (CH)



Drehsensor im Messbetrieb auf der Hochalmbahn, Garmisch-Partenkirchen

Abbildung 80: Beispielbilder des Drehsensoraufbaus bei realen Feldmessungen

Zur Weiterverarbeitung der Daten wurde eine Softwarelösung entwickelt, die neben der Konfektionierung einer Messung wie zum Beispiel das Ausblenden von Auf- und Abbaueiten im Messsignal oder das Verschieben der Nullpunkte in der Diagrammdarstellung auch die Winkeladdition zwischen den einzelnen Drehungen, die fallweise Glättung mit unterschiedlichen Methoden und Intensitäten, sowie die Exportmöglichkeit der nachberechneten Daten in übergreifende Formate zur Weiterverwendung zur Verfügung stellt (Härtel 2014). Eine Übersicht der Verarbeitungsschritte gibt nachfolgende Abbildung 81. Aus den Rohdaten der drei Sensorachsen werden die beiden für die Drehung relevanten Achsen isoliert und über die Tangensbeziehung die Winkelberechnung durchgeführt. Hier ist die charakteristische Unstetigkeit der Tangensfunktion gut erkennbar. Anschließend wird die Kurve einer Glättung unterzogen. Anhand der Steigung und des Vorzeichenwechsels an der Unstetigkeit können die Abschnitte der Drehung per Winkeladdition zu einer durchgehenden Gesamtkurve zusammengesetzt werden. Schließlich erlaubt die Software den Zuschnitt, Editierung der Darstellung und Export, z.B. in Formate wie pdf, jpg oder csv.

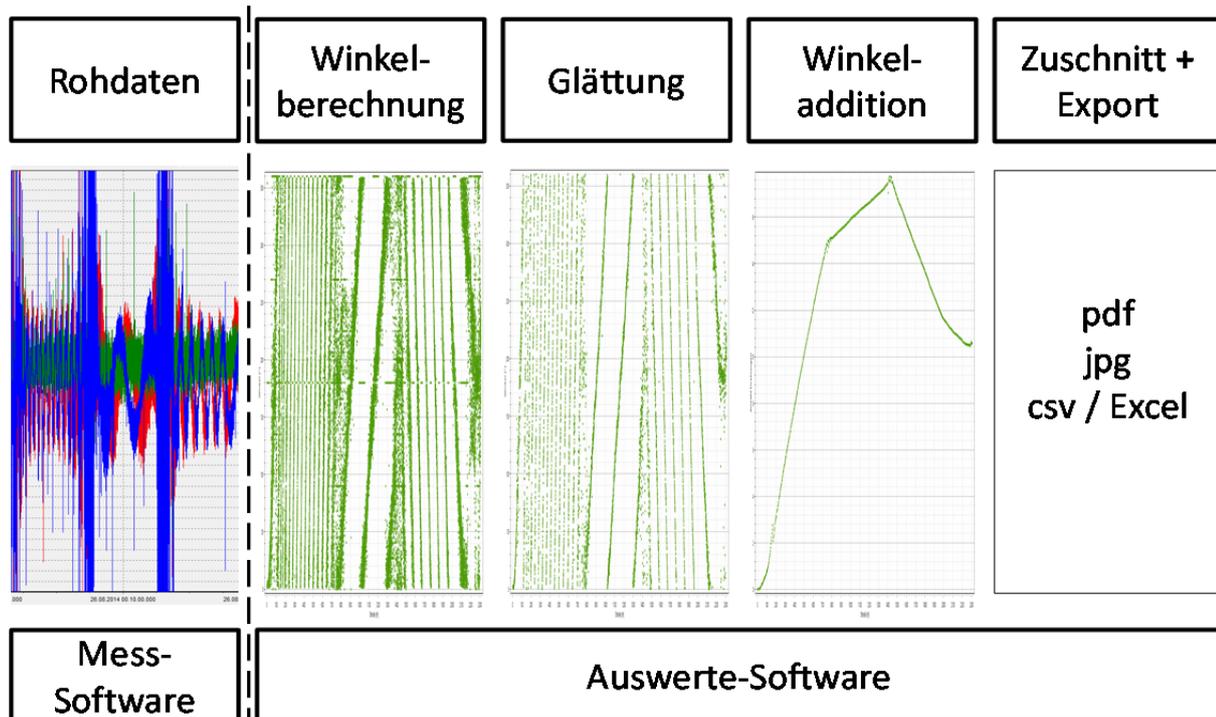


Abbildung 81: Weiterverarbeitung der Messdaten mit Auswerte-Software

Im Folgenden werden gezielte Messungen auf Bahnanlagen mit Bezug auf ihre konstruktiven Eigenschaften untereinander verglichen und drehungsspezifische Merkmale herausgearbeitet.

5.5 Messungen ausgewählter Anlagen

Es wurden die oberen und unteren Zugseile von über 25 Pendelbahnanlagen auf ihre freie Seildrehung auf der Strecke hin vermessen. Kriterium zur Auswahl war vorrangig die Verfügbarkeit von technischen Anlagendaten und ausreichend magnetinduktiver Prüfdatensätze, so dass die meisten Anlagen vollumfänglich analysiert und zur Bildung des Gesamtbeurteilungsmodells verwendet werden können. Die Anlagen werden für das Gesamtmodell hier systematisch auf ihre IST-Drehungscharakteristik untersucht. Später werden diese nach den zuvor beschriebenen Parametern für die Erfassung des theoretischen SOLL-Drehmomentverlaufs analysiert. Zur Messung wurden die Sensoren in ausreichendem, jedoch nicht übermäßigem Abstand zur Fahrzeug-Endbefestigung des Zugseils montiert, um möglichst freie Drehung innerhalb der Einflusszone der Seilschädigung messen zu können. Von der anfänglichen Idee, einen Abstand in Abhängigkeit des Seildurchmessers zu wählen, wurde aufgrund der Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit von eigenen Messdiagrammen und den Daten Dritter abgesehen. Daher wurde ein grundsätzlicher Abstand von 100 m zum Fahrzeug gewählt, vgl. Abbildung 82. Bei sehr kurzen Anlagen unter 500 m Länge mit kleinen Zugseildurchmessern unter 20 mm wurde der Abstand auf 50 m reduziert. Je nach Position von Stützen und Überwachungsfenstern der Seilbahnsteuerungen musste der Messpunkt gelegentlich um wenige Meter aus dieser Zone verlegt werden.

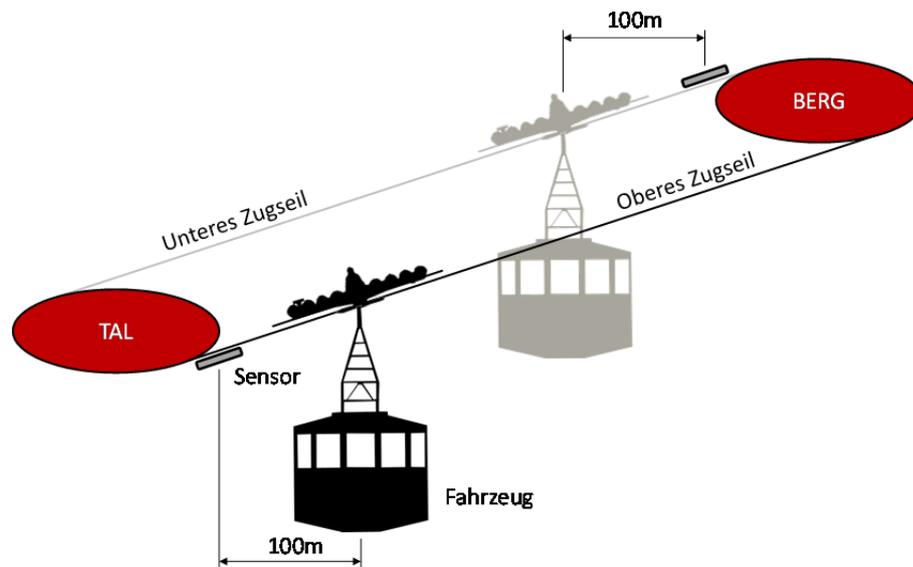


Abbildung 82: Skizze üblicher Montagepositionen der Drehsensoren an den Zugseilen von Pendelbahnen

Grundlegende Erkenntnisse

Über die Ergebnisse der digitalen Drehungsmessung sollen hier einige grundsätzliche Aussagen getroffen werden, um die Nutzbarkeit und Zuverlässigkeit der Daten zu beschreiben. Dazu werden im Folgenden drei Thesen über physikalische Voraussetzungen aufgestellt, die durch Messungen verifiziert worden sind.

1. These: „Das Drehverhalten eines Zugseils ist wiederholbar.“

Durch Mehrfachmessung wurde überprüft, ob Seile bei wiederholten Fahrten grundsätzlich eine wiederkehrende Drehcharakteristik aufweisen. Die Kurven der Drehungsmessung während zwei aufeinanderfolgenden Fahrten derselben Bahnanlage beweisen eindeutig, dass die Drehung des Seils nicht zufällig abläuft, sondern physikalischen Gesetzmäßigkeiten genügen muss, vgl. Abbildung 83.

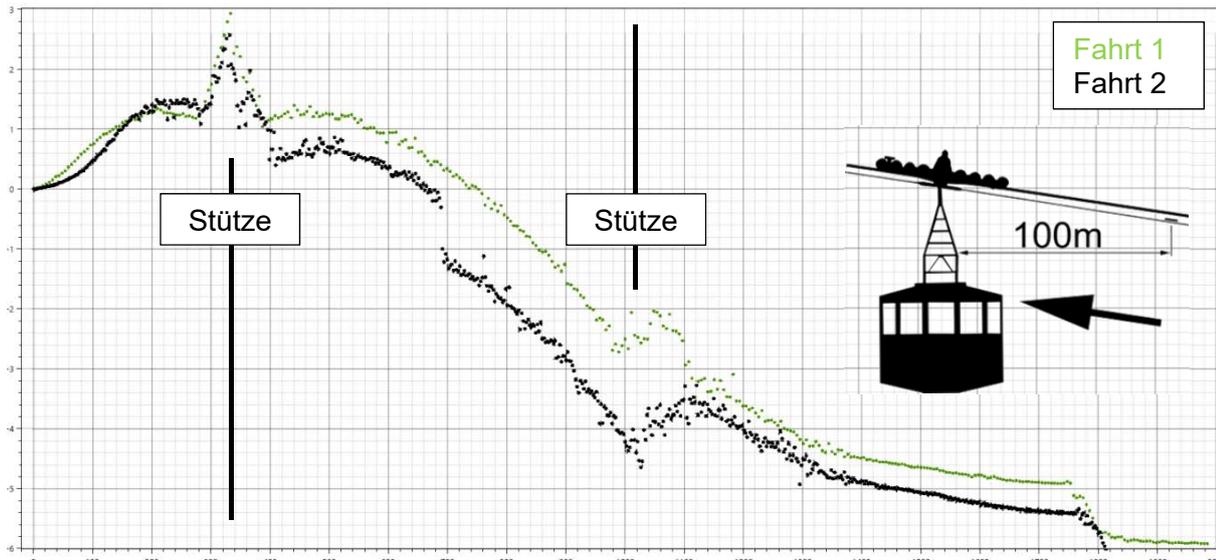


Abbildung 83: Wiederholte Messfahrt auf dem unteren Zugseil einer Pendelbahn
(x-Achse: Länge in [m], y-Achse: Umdrehungen [-])

2. These: „Ähnliche Längenprofile erzeugen ähnlich geformte Drehkurven.“

Aus der Summe an Messungen stellt sich heraus, dass bestimmte Drehkurvenformen in ihrer qualitativen Charakteristik wiederholt in ähnlicher Weise auftreten. In Abbildung 84 sind beispielhaft drei Drehkurven von unteren Zugseilen bei Bergfahrt normiert dargestellt. Es wird deutlich, dass die Drehcharakteristik ähnliche Verläufe bei ähnlichen Anlagenausführungen annimmt. Bei Fahrtbeginn löst sich die Vorspannung der letzten Fahrt und das Seil entspannt durch den Auslauf aus dem Antrieb in zudrehende Richtung. Anschließend beginnt die Höhenspannung zu wirken und das Seil dreht kontinuierlich auf.

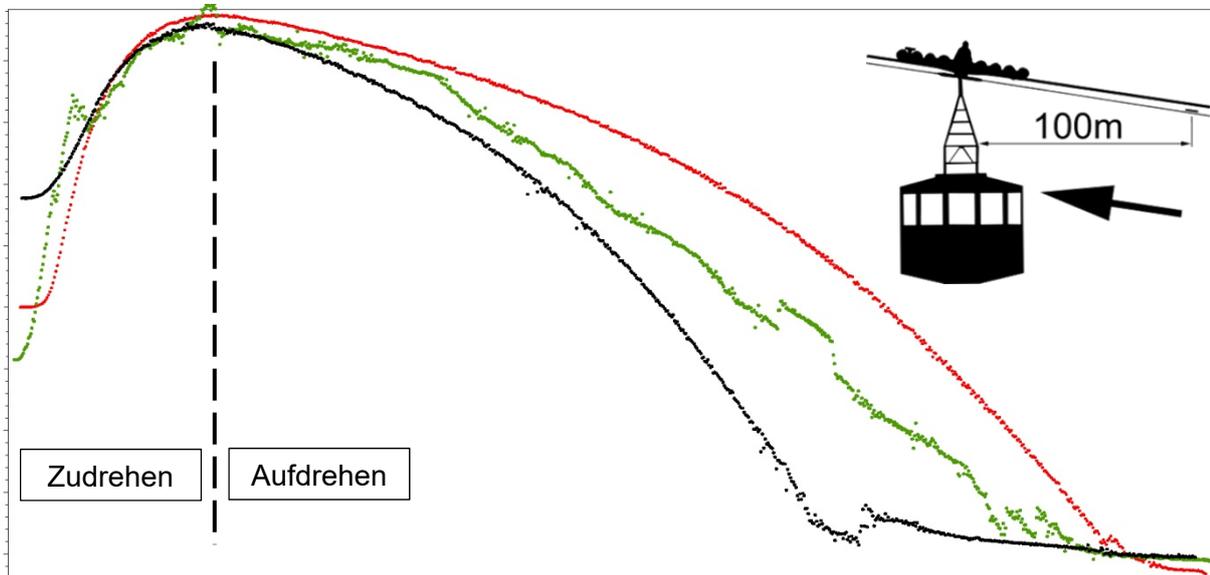


Abbildung 84: normierte Darstellung des Drehverhaltens von drei unteren Zugseilen bei Bergfahrt
(x-Achse: Länge in [m], y-Achse: Umdrehungen [-])

3. These: „Seile führen unter gleichen Bedingungen dieselben Drehungen durch.“

Einige wenige Pendelbahnsysteme weisen doppelte, parallel geführte Zugseile auf, so dass hier Drallmessungen auf zwei individuellen Seilen bei vollkommen identischem Längenprofil und gleichen Betriebsbedingungen durchgeführt werden können. Dabei wurden während einer Fahrt zwei Drehsensoren gleichzeitig auf den beiden Zugseilen im selben Abstand zur Kabine platziert, vgl. Abbildung 85. Die Kurven dieser Messung sind in Abbildung 86 übereinandergelegt. Hier wird ersichtlich, dass auch bei zwei verschiedenen Seilen bei

gleicher äußerer Belastung die Drehcharakteristik übereinstimmt. Lediglich an den Seilreitern driften die Kurven geringfügig auseinander, da hier die Sensoren durch Seilschwingungen oder ihre Momentanlage zufällig mechanisch anders geführt werden können.



Abbildung 85: Messaufbau an einer Pendelbahn mit zwei parallelen Zugseilen

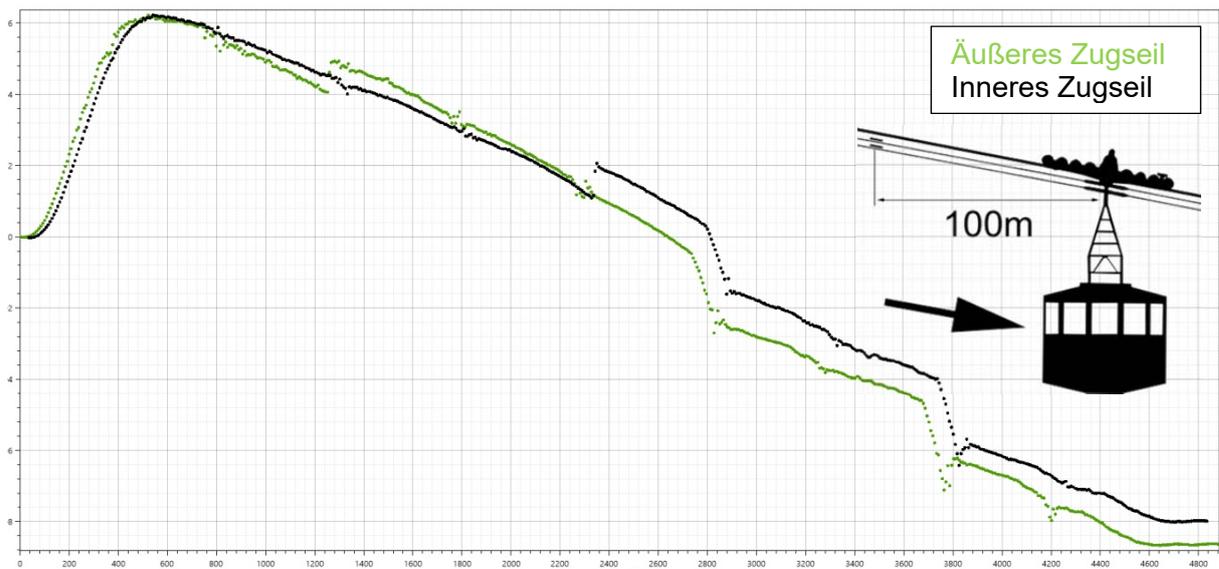


Abbildung 86: Drehungsmessung von zwei parallel verlaufenden Zugseilen
(x-Achse: Länge in [m], y-Achse: Umdrehungen [-])

Diese Messungen und ihre positive Bestätigung der Thesen sind Grundvoraussetzung dafür, dass die zur weiteren Bewertung benötigten Messungen verschiedener Anlagen als vollwertig, übertragbar, für die Anlage repräsentativ und wiederholbar betrachtet werden können.

Charakteristische Kurvenformen

Den Messungen lassen übergreifend charakteristische Kurvenformen entnehmen, die bei einer Vielzahl der Bahnanlagen wiederkehren. Diese setzen sich meist aus Anfahr- oder Lösedrehungen des vorherigen Fahrspiels zu Beginn und einer Beharrungsdrehung während der weiteren Fahrt zusammen. Im Folgenden werden die typischen Drehkurven eines oberen und eines unteren Zugseils während einer Berg- und Talfahrt im Detail erklärt.

(A) Oberes Zugseil bei Pendelbahnen mit einem Tragseil ohne Seilreiter

Das obere Zugseil besitzt aus Sicht der Drehungsmessung bergwärts ein freies Ende, aus dem sich Drehmoment-Einflüsse aus der Strecke zum talseitigen Ende hin massieren, wo es über die Seilendverbindung am Fahrzeug befestigt ist.

Bei der **Bergfahrt** dreht es anfänglich geringfügig zu, Gründe hierfür sind:

- Das Seil entspannt aufgrund der Lösung der Anlagenvorspannung aus dem Stationshalt. Am Ende eines Fahrspiels werden die Zugseile mit Hilfe des Antriebs bewusst überspannt, um ein Herausdriften der Fahrzeuge beim Be- und Entladen zu verhindern. Die Entspannung führt zu einem Zudrehen des Seils.
- Das Spannungsfeld des oberen Zugseils verkürzt sich während der Bergfahrt gegen den nächsten oberen Stützpunkt. Während die stärker gespannten Abschnitte am Berg mit der Fahrt über die Höhenspannung aufdrehen müssen, wälkt sich diese Drehung in entgegengesetzter Richtung zum unteren Ende hin. Da der untere Abschnitt bei Beginn der Fahrt meist schwächer geneigt und schwächer gespannt ist, nimmt dieser die Drehung eher auf – das Seil dreht oberhalb des Fahrzeugs anfänglich zu.

Mit Fortführung der Bergfahrt wird das Zugseil oberhalb des Fahrzeugs immer stärker gespannt, somit wird ihm nach dem anfänglichen Zudrehen eine aufdrehende Richtung überlagert, die sich in den Diagrammen deutlich zeigt.

Bei der **Talfahrt** fährt das Obere Zugseil in entspannende Richtung, die Höhenspannung sinkt und der Messpunkt liegt mit größer werdendem Abstand zum oberen Stützpunkt am unteren Ende des Spannungsfeldes, an dem grundsätzlich kurze Schlaglängen vorgefunden werden, vgl. (Ernst 2012; Weber 2013). Das Seil dreht somit wieder zu. Dadurch erfahren die oberen Zugseile überwiegend ein Zudrehen in den Randbereichen vor den Fahrzeugen.

In Tabelle 28 ist das beschriebene Verhalten der oberen Zugseile skizziert. Zur verbesserten Übersicht sind die Drehrichtungen und deren qualitative Wirkung farblich markiert: die zum Fahrzeug hin aufdrehende Richtung als lebensdauerermindernde Tendenz ist rot, die zudrehende Tendenz als prinzipiell eher wirkungslos bis geringfügig verbessernde Drehwirkung ist grün dargestellt.

	Bergfahrt oberes Seil über Fahrzeug	Talfahrt oberes Seil über Fahrzeug
Y-Achse: Drehung		
X-Achse: Fahrweg der Anlage	X-Achse: Fahrweg der Anlage	X-Achse: Fahrweg der Anlage

Tabelle 28: Charakteristische Drehungskurven eines oberen Zugseils bei Berg- und Talfahrt

(B) Unteres Zugseil bei Pendelbahnen mit einem Tragseil ohne Seilreiter

Das untere Zugseil besitzt aus Sicht der Drehungsmessung talwärts ein freies Ende, aus dem sich Drehmoment-Einflüsse aus der Strecke zum bergseitigen Ende hin massieren, wo es über die Seilendverbindung am Fahrzeug befestigt ist.

Bei der **Bergfahrt** eines unteren Zugseils beginnt die Drehkurve erneut mit einer Entlastungsbewegung – das Seil dreht zu²⁹. Anschließend folgt es dem Fahrzeug zu Berg und befindet sich mehr und mehr am oberen Ende des geneigten Spannungsfeldes. Durch die wirkende Höhenspannung dreht es somit auf.

Bei der **Talfahrt** jedoch müssen sich die weit unterhalb im Tal gelegenen Seilabschnitte zudrehen, da sie entlastet werden. Diese Drehbewegung muss am oberen Ende vor dem Fahrzeug eine Gegendrehung bewirken, somit dreht das untere Zugseil vor dem Fahrzeug auch bei Talfahrt auf, die Schlaglänge wird länger bzw. bleibt verlängert. Es kann aufgrund der Knebelwirkung des Fahrzeugs an der Messstelle kaum eine Rückdrehung des Seils bzw. Verkürzung der Seilschlaglänge stattfinden. Dadurch erfahren die unteren Zugseile überwiegend ein Aufdrehen in den Randbereichen vor den Fahrzeugen.

In Tabelle 29 ist wie zuvor das beschriebene Verhalten nun für untere Zugseile skizziert.

	Bergfahrt unteres Seil unter Fahrzeug	Talfahrt unteres Seil unter Fahrzeug
Y-Achse: Drehung		
	X-Achse: Verfahrweg der Anlage	X-Achse: Verfahrweg der Anlage

Tabelle 29: Charakteristische Drehungskurven eines unteren Zugseils bei Berg- und Talfahrt

Für Zugseile von Pendelbahnen mit einem Tragseil ohne Seilreiter werden nun in Tabelle 30 aus der Gesamtheit der Messungen Absolutwerte sowie mittlere und extreme Steigungen der Drehkurven angegeben.

1 Tragseil ohne Seilreiter	Oberes Zugseil Bergfahrt	Oberes Zugseil Talfahrt
Minimale Steigung [U/100m]	-0,36	0,08
Mittlere Steigung [U/100m]	-0,12	0,44
Maximale Steigung [U/100m]	0,20	1,08
Drehungen Absolut min [U]	-8,00	-7,00
Mittlere Drehungen Abs. [U]	-1,00	3,64
Drehungen Absolut max [U]	9,00	11,00
1 Tragseil ohne Seilreiter	Unteres Zugseil Bergfahrt	Unteres Zugseil Talfahrt
Minimale Steigung [U/100m]	-1,92	-0,31
Mittlere Steigung [U/100m]	-0,75	0,14
Maximale Steigung [U/100m]	-0,06	1,06
Drehungen Absolut min [U]	-12,00	-9,00
Mittlere Drehungen Abs. [U]	-4,92	-4,00
Drehungen Absolut max [U]	9,00	3,00

Tabelle 30: Absolutwerte und Steigungen der Drehung für Zugseile von Pendelbahnen mit einem Tragseil ohne Seilreiter (positiv: zudrehend, negativ: aufdrehend)

²⁹ Da nun unterhalb des Fahrzeugs gemessen wird, ist gedanklich in den Diagrammen ein Vorzeichenwechsel zu berücksichtigen.

Betrachtet man die Summen der mittleren Steigungen und Absolutdrehungen für eine Berg- und Talfahrt (Zeilen fett unterlegt), so wird deutlich, dass obere Zugseile im Durchschnitt im Randbereich zudrehen, während untere Zugseile im Randbereich durchschnittlich aufdrehen. Da der Drall grundsätzlich nicht aus der Anlage entweichen kann, muss sich die Differenz auf dem restlichen Seilweg von 100 m nach Demontage des Drehsensors ausgleichen.

(C) Pendelbahnanlagen mit Doppeltragseilen und Seilreitern

Anlagen mit Doppeltragseilen und Seilreitern zeichnen sich in der Drehungsmessung durch eine höherfrequente Grundvibration aus, die sich der Lageinformation des Sensors überlagert. Die Einstellung einer wirksamen Glättung ist hier aufwändiger. Trotzdem zeigen sich äquivalente Kurvenformen zu den Bahnen mit nur einem Tragseil, jedoch wird oft die Qualität einer harmonisch-kontinuierlichen Kurve nicht in diesem Maß erreicht, wie in Tabelle 31 skizziert ist. Insbesondere das Passieren der Seilreiter ist häufig durch den mechanischen Kontakt des Sensors mit der Stützrolle im Diagramm deutlich auszumachen, wie das Detail der „Überfahrt Seilreiter“ in der Tabelle zeigt.

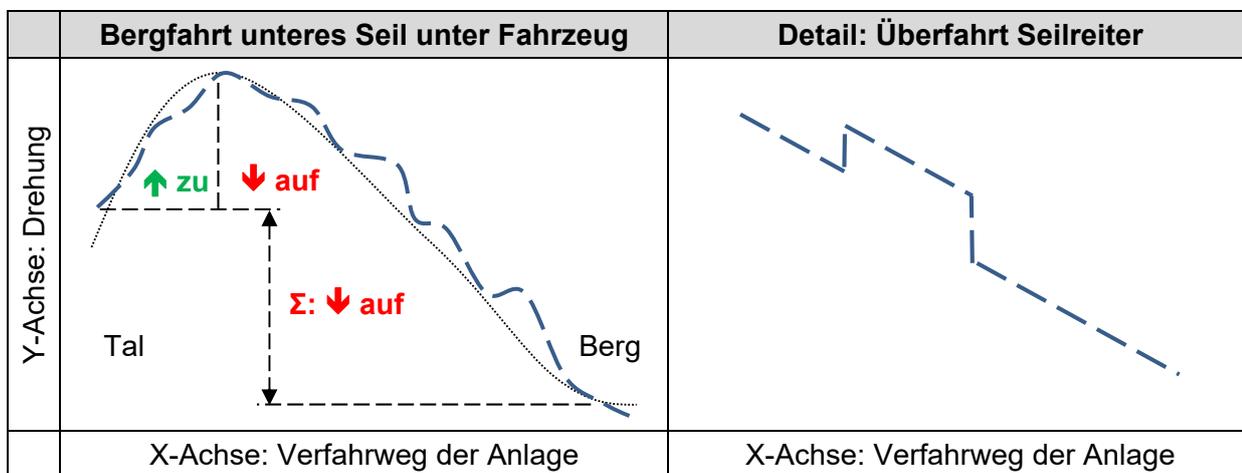


Tabelle 31: Beispiele charakteristische Drehungskurven bei Pendelbahnen mit Doppeltragseilen und Seilreitern

Für Zugseile von Pendelbahnen mit zwei Tragseilen und Seilreitern werden nun in Tabelle 32 aus der Gesamtheit der Messungen Absolutwerte sowie mittlere und extreme Steigungen der Drehkurven angegeben.

2 Tragseile mit Seilreiter	Oberes Zugseil Bergfahrt	Oberes Zugseil Talfahrt
Minimale Steigung [U/100m]	-0,58	0,00
Mittlere Steigung [U/100m]	0,07	0,37
Maximale Steigung [U/100m]	0,69	0,90
Drehungen Absolut min [U]	-6,00	2,00
Mittlere Drehungen Abs. [U]	2,56	7,44
Drehungen Absolut max [U]	9,00	14,00
2 Tragseile mit Seilreiter	Unteres Zugseil Bergfahrt	Unteres Zugseil Talfahrt
Minimale Steigung [U/100m]	-1,10	-0,56
Mittlere Steigung [U/100m]	-0,15	-0,19
Maximale Steigung [U/100m]	1,63	0,13
Drehungen Absolut min [U]	-9,00	-14,00
Mittlere Drehungen Abs. [U]	0,00	-6,88
Drehungen Absolut max [U]	12,00	2,00

Tabelle 32: Absolutwerte und Steigungen der Drehung für Zugseile von Pendelbahnen mit Doppeltragseilen und Seilreitern (positiv: zudrehend, negativ: aufdrehend)

Bei Pendelbahnen mit Doppeltragseilen und Seilreitern zeigt sich erneut mit Blick auf die Summe der Mittelwerte für ein Fahrspiel zu Berg und zurück, dass die oberen Zugseile im Randbereich durchschnittlich zudrehen, während die unteren Zugseile im Randbereich aufdrehen. Es gilt erneut der Hinweis, dass sich die Differenz nach Demontage des Sensors auf den restlichen 100 m ausgleichen muss.

Diese Differenz des zurückbleibenden Dralls am Ende der Messung von Berg- und Talfahrt soll nachfolgend als Maß dienen, um den realen Drallstau einer Seilbahnanlage zu beziffern. Daher wird dieser Wert im Gesamtmodell wieder aufgegriffen.

(D) Stützenüberfahrt

Bei der Stützenüberfahrt zeigt sich in einer Vielzahl von Messungen eine charakteristische Kurvenform. Die Drehung verlässt sprunghaft ihren kontinuierlichen Verlauf und folgt einer deutlich größeren Steigung als zuvor auf der Strecke, vgl. Beispielmessung in Abbildung 87 und Skizze in Tabelle 33.

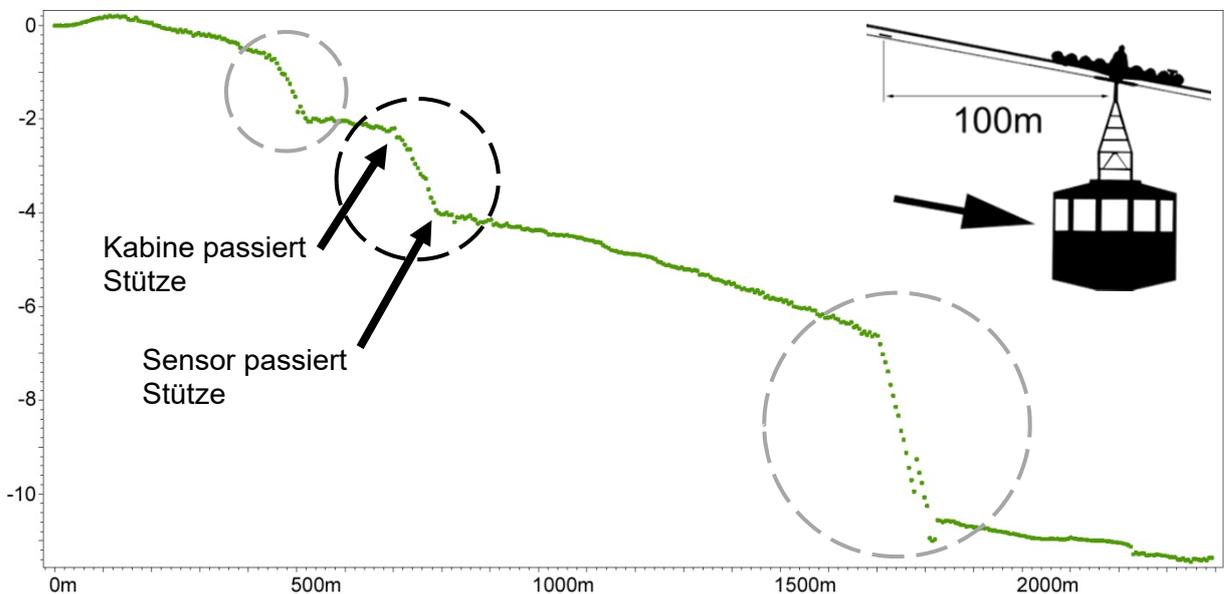


Abbildung 87: Kurvendetails bei Stützenüberfahrten während der Talfahrt eines oberen Zugseils (x-Achse: Länge in [m], y-Achse: Umdrehungen [-])

Stützenüberfahrt		
Y-Achse: Drehung		Seil dreht: ↑ zu ↓ auf
	Berg Tal	
X-Achse: Fahrweg der Anlage		

Tabelle 33: Charakteristische Drehungskurve bei Stützenüberfahrt

Die Analyse der Drehrichtung in Abhängigkeit des Seils und der Fahrtrichtung ergibt, dass es sich hier um einen Drallausgleich zwischen zwei Spannungsfeldern handelt. Ernst und Feyrer zeigen, dass ein Seil unter Höhenspannung im oberen Bereich des Spannungsfeldes aufgedreht,

um unteren Bereich jedoch zuge dreht ist (Ernst 2012; Feyrer 2000). Fährt nun ein Seilabschnitt vom unteren Bereich eines Spannungsfeldes mit zudrehender Tendenz über die drallhemmende Stütze in den oberen Bereich des folgenden Spannungsfeldes mit aufdrehender Tendenz, so findet durch den Wechsel des Spannungsfeldes ein Wechsel der sich aufprägenden Schlaglänge statt. Bergwärts fahrend wechselt der mit Hilfe des Drehsensors untersuchte Seilabschnitt vom aufgedrehten Bereich unterhalb der Stütze in den zuge drehten Bereich oberhalb der Stütze. Talwärts fahrend wechselt der Sensor vom zuge drehten Bereich oberhalb der Stützen in den aufgedrehten Bereich unterhalb der Stütze. Dadurch entsteht eine charakteristische Drehrichtung, die in nahezu allen Messungen gleich ist. In Abbildung 88 ist dieser Effekt für beide Fahrrichtungen bei einem rechtsgeschlagenen Seil skizziert.

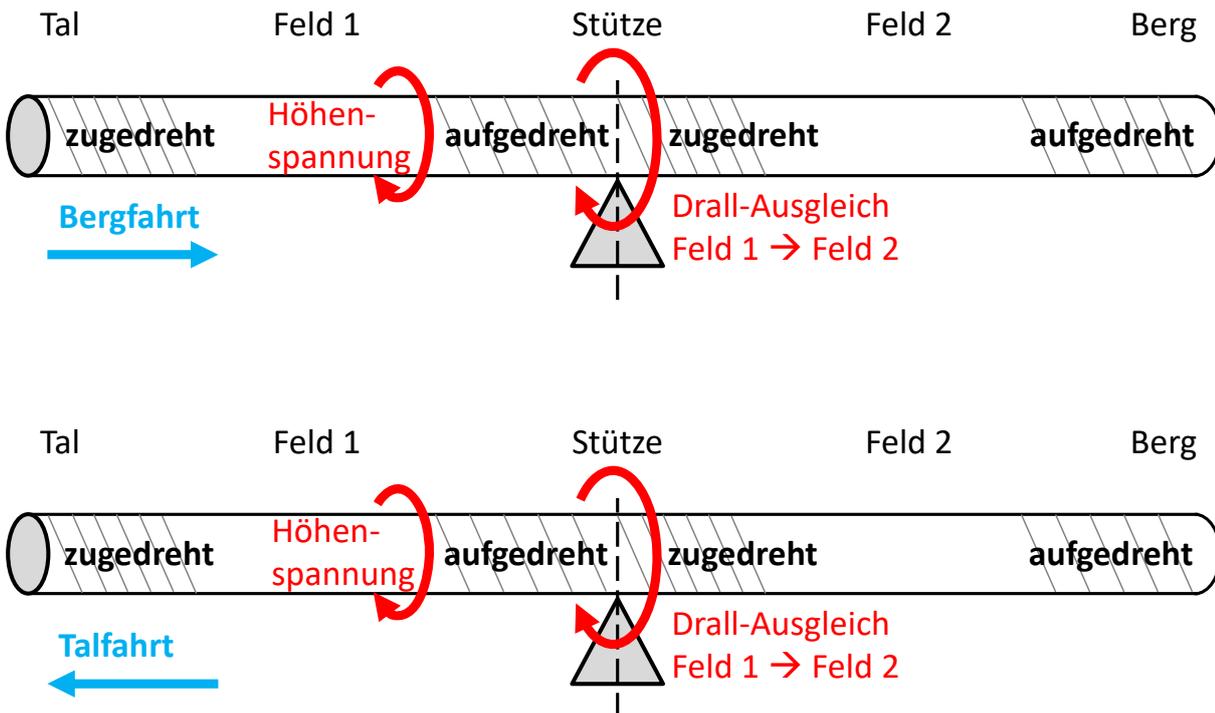


Abbildung 88: Skizze zum Drall-Ausgleich zwischen zwei Seilfeldern bei Stützenüberfahrt für ein rechtsgeschlagenes Seil

Für die Stützenüberfahrt werden abschließend in Tabelle 34 aus der Gesamtheit der Messungen mittlere und extreme Steigungen der Drehkurven angegeben.

	Stützenüberfahrt
Minimale Steigung [U/100m]	-6,10
Mittlere Steigung [U/100m]	0,44
Maximale Steigung [U/100m]	8,40

Tabelle 34: Steigungen der Drehung bei Stützenüberfahrt (positiv: zudrehend, negativ: aufdrehend)

Die Werte verdeutlichen, dass der Drallausgleich zwischen den Feldern unter hohen Vorspannungen aus Verdrehung stattfindet. Die Steigungen liegen gegenüber der Strecke um ein Vielfaches höher.

6 Analyse magnetinduktiver Prüfdaten und Schlaglängenauswertung

6.1 Ermittlung von Ablegereife und Seillebensdauer

Mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Sensortechnik wurde das Drehverhalten der untersuchten Seilbahnanlagen erfasst. Nun gilt es, die schädigende, bleibende Verdrehung der Seile zu ermitteln, um anschließend in einem Gesamtmodell eine Relation zwischen Drehung, Verdrehung und Schadensausmaß zu erkennen.

In den Archiven des IFT und der Seilbahnbetreiber stehen die magnetinduktiven Prüfdaten mindestens der letzten, mitunter der vorletzten abgelegten Zugseile zur Verfügung. Diese beinhalten die Schadensverteilung und Historie der Seile in Bezug auf die gültigen Normen und deren Kriterien der Schadensbeurteilung, insbesondere hinsichtlich der Ablegereife.

Die Ablegereife ist als Schädigungszustand des Seils zu sehen, bei dem das Seil nicht mehr sicher weiter betrieben werden kann oder, wie Weber angibt, geltende Normkriterien erreicht werden (Weber 2013). Das Ziel der Ablegereife ist, ein Seil vor dem vollständigen Versagen rechtzeitig und kontrolliert außer Betrieb zu nehmen.

Aus den vielzähligen Kriterien konzentriert sich diese Untersuchung auf das Kriterium des maximalen theoretischen Querschnittsverlusts auf einer Referenzlänge, auch Bezugslänge genannt, die in Vielfachen des Seildurchmessers angegeben wird. Da hier aufgrund der benötigten Anlagenhistorie in den wenigsten Fällen Pendelbahnen jüngerer Alters, somit nach CEN-Regularien zugelassen³⁰, untersucht werden, sind in Tabelle 35 die maximalen theoretischen Querschnittsverluste nach BOSEIL (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg 11-2004) aufgeführt. Zusätzlich wird in Tabelle 35 in Abhängigkeit der Seilkonstruktion anhand der Seilgeometriedaten aus (Feyrer 2000) die entsprechende Anzahl gebrochener Außendrähte bei gerade überschrittenem Ablegekriterium angegeben. Die Außendrähte stellen konservativ gesehen die Drähte mit größtem Querschnitt gegenüber den unteren Drahtlagen dar.

Bezugslänge (in Vielfachen des Seilnenn- durchmessers d)	Maximaler theoretischer Querschnitts- verlust	Anzahl gebrochener Außendrähte bei gerade überschrittenem Ablegekriterium (prozentualer Anteil eines Außendrahtes am Gesamtquerschnitt in Klammern)		
		6x19S (1,27 %)	6x25F (0,88 %)	6x36WS (0,60 %)
6 x d	5 %	4	6	9
40 x d	10 %	8	12	17
500 x d	25 %	20	29	42

Tabelle 35: Bezugslängen und maximale Querschnittsverluste als Ablegekriterium

Die Querschnittsanteile der Außendrähte der genannten Seilkonstruktionen Seale, Filler und Warrington-Seale lassen sich anhand nachfolgender Abbildung 89 nachvollziehen.

³⁰ Seilbahnneubauten wurden erst ab 02.05.2004 als sogenannte CEN-Anlagen entsprechend den europäischen Normen zugelassen. Davor galt die lange bewährte BOSEIL (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg 11-2004).

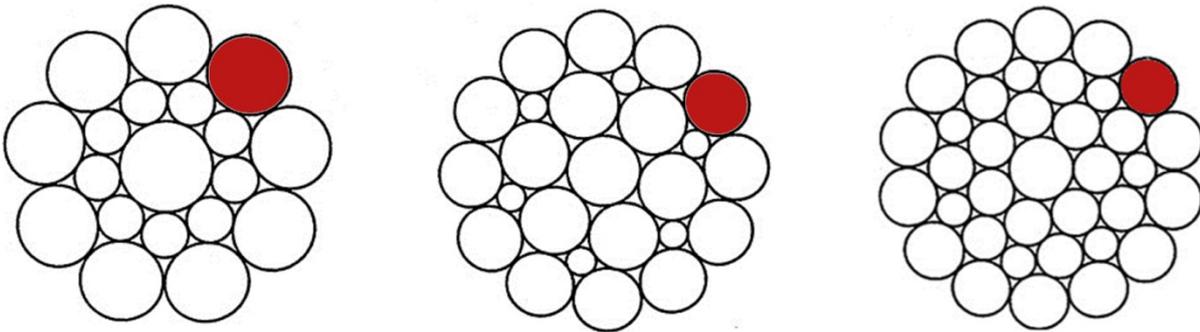


Abbildung 89: Außendrahtquerschnitte der Litzenkonstruktionen Seale (S), Filler (F) und Warrington-Seale (WS) (Grafik in Anlehnung an (VDI-Richtlinie 2358))

Der theoretische Tragkraftverlust ist insbesondere bei der großen Bezugslänge $500 \times d$ eine fiktive Zahl zur Beurteilung der Anzahl und statistischen Verteilung von Ermüdungsbrüchen im Seil (Pernot et al. 2016). Durch die Wendelung der Drähte im Seil trägt ein gebrochener Draht aufgrund von Reibung schon nach wenigen Schlaglängen wieder vollständig (Meebold 1959; OITAF 2015). Das Seil hat also mitnichten ein Viertel seiner Tragkraft bis zur Ablegereife eingebüßt, wenn auf $500 \times d$ bzw. auf 71 Schlaglängen 25% theoretischer Querschnittsverlust gezählt werden. Zeigt diese Bezugslänge die Ablegereife an, so sind jedoch derart viele Drähte in einem statistisch gesehen ähnlichen Ermüdungsstadium, dass mit schnellem Ausfall weiterer Drähte zu rechnen ist. Daher nimmt die Drahtbruchentwicklung eines Seils in Abhängigkeit der Betriebszyklen stets einen exponentiellen Verlauf an (Kühner 2014; Messmer 2008; Müller 1966).

Die Ablegereife geht mit der Außerbetriebnahme eines Seils einher. Über die konventionelle Lebensdauerberechnung nach Feyrer – ohne Berücksichtigung des Drallanteils aus Kapitel 0 – lässt sich somit eine maximal erreichbare Lebensdauer bis Ablegereife $Z_{Am_{Fey}}$ formulieren. Stellt man diese ideal erreichbare Lebensdauer den realen Betriebszyklen der Seile Z_{real} der untersuchten Anlagen gegenüber, so kann ein IST-Verlust η an nutzbarer Lebensdauer durch Verdrehung beschrieben werden.

$$\eta = \frac{Z_{real}}{Z_{Am_{Fey}}} \quad (42)$$

Mit Hilfe der in der FMEA in Kapitel 5.2 aufgestellten Gleichungen können die Seilzug- und Umfangskräfte an den Umlenkungen der Stationen berechnet werden. Da zudem Seildurchmesser, Mindestbruchkraft sowie die Anzahl der Scheiben und das grundsätzliche D/d -Verhältnis der Scheiben zum Seil von 100 bzw. 80³¹ bekannt sind, lässt sich daraus die Anzahl von Fahrten bis zur Ablegereife berechnen.

Dazu muss für jedes Seil die Biegefolge bei Durchfahrt durch die Station bestimmt werden. Dies erfolgt nach der Systematik der DIN 15020, bei der die Anzahl der Scheibenkontakte unter Berücksichtigung eventueller gegensinnigen Biegungen ermittelt wird. Für eine Anlage wird die Biegewechselzahl pro Arbeitsspiel mit w bezeichnet (Norm DIN 15020 Blatt 1). Dabei ist zu berücksichtigen, dass im vorliegenden Fall der Seilbahn nur eine Umfahrt berücksichtigt werden soll, während z.B. bei Kranen oder Aufzügen ein Arbeitsspiel grundsätzlich die Rückkehr zum Ausgangspunkt beinhaltet, somit beispielsweise das Heben und Senken der Last. In der nachfolgenden grafischen Darstellung in Abbildung 90 sind die Biegewechselzahlen w für eine Fahrt der verschiedenen Stationskonfigurationen der in dieser Arbeit herangezogenen Seilbahnanlagen zu finden. Diese Schemata können sowohl für Antriebs- als auch für Gegenstationen verwendet werden. Im Falle einer Antriebsstation

³¹ abhängig der geltenden Norm

ist dabei zu berücksichtigen, dass auf mindestens einer Scheibe ein Wechsel der Seilzugkraft in Form der übertragenen Umfangskraft des Antriebs erfolgt.

Die Aufstellung stellt keine vollständige Abbildung aller existenten Anlagenkonfigurationen dar, deckt jedoch geschätzt über 90% der bekannten Ausführungen ab. Im Falle einer anderweitigen Scheiben-Konfiguration kann somit bei Berücksichtigung der DIN 15020 ein gleichartiges Stationsschema erzeugt werden.

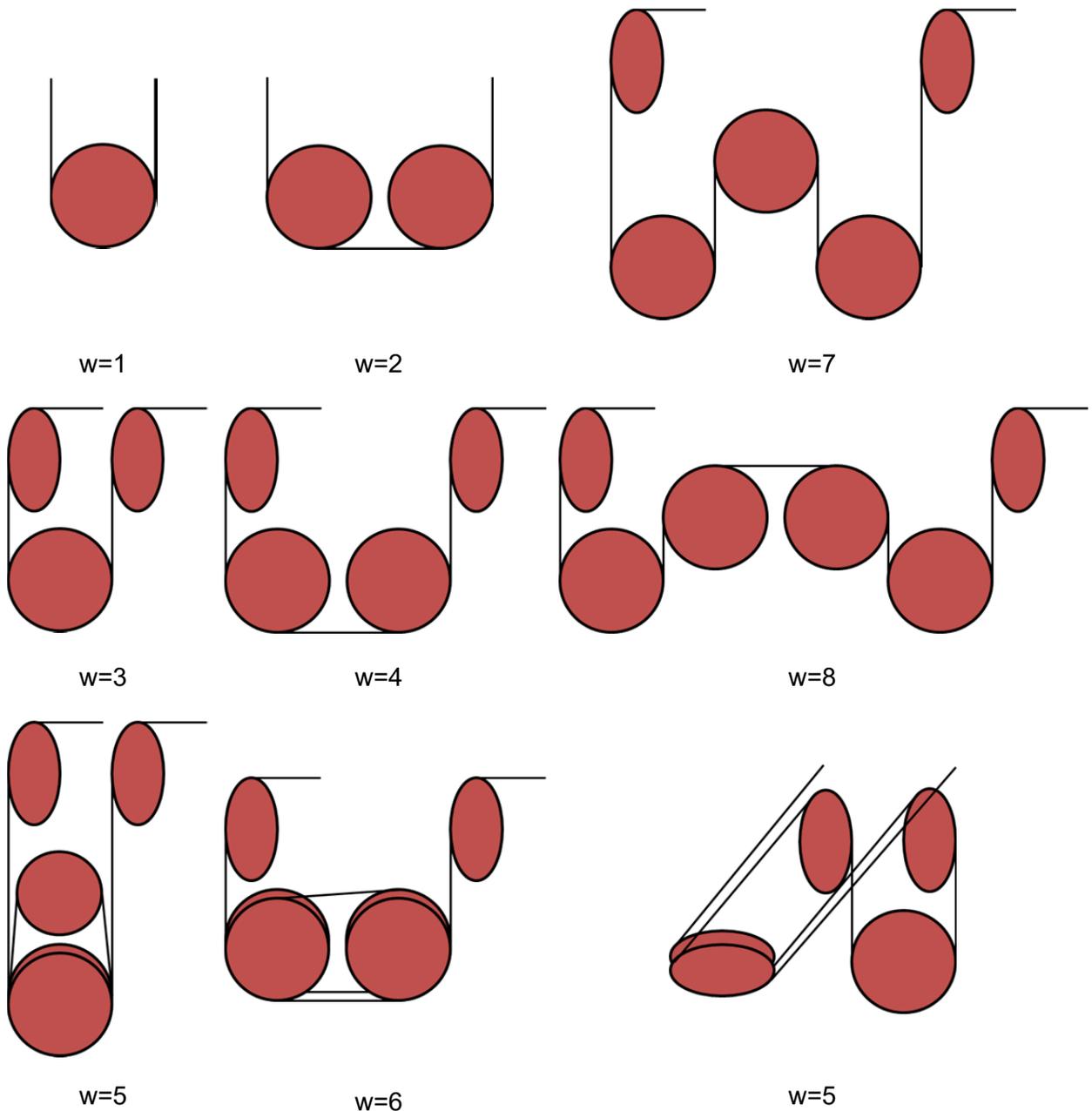


Abbildung 90: Biegewechselzahlen verschiedener Stationskonfigurationen nach DIN 15020

In den magnetinduktiven Prüfberichten wird wiederum die IST-Seileinsatzdauer aufgelöst in Jahren und Monaten verzeichnet. Mit Hilfe der Nennfahrgeschwindigkeit, der Streckenlänge und Zeit-Zuschlägen zum Beschleunigen, Verzögern oder für den Fahrgastaustausch kann somit eine maximale Fahrtenzahl pro Zeiteinheit, z.B. pro Tag berechnet werden. Berücksichtigt man nun Stillstandszeiten durch Schlechtwetter oder die halbjährliche Revision sowie durchschnittliche Auslastungsfaktoren, so kann die Nutzungsdauer der Seile letztlich in geschätzt gefahrene Fahrten Z_{real} umgerechnet werden. Alternativ zur folgend

gezeigten rechnerischen Abschätzung kann bei spezifischen Anlagen auch direkt die real geleistete Fahrtenzahl genutzt werden, wenn die Steuerung die Funktion eines Fahrtzählers bietet.

$$Z_{\text{real}} = Z_{\text{pro Jahr}} \cdot T_{\text{real}} = \mu \cdot \frac{T \cdot \frac{3600s}{h}}{t_{\text{Fahrt}}} \cdot (W_{\text{Betrieb}} \cdot 7 - N_{\text{Sturm}}) \cdot T_{\text{real}} \quad (43)$$

Mit:	$Z_{\text{pro Tag}}$	mittlere Betriebszyklen pro Jahr [-]
	T_{real}	reale Einsatzdauer des Seils [Jahre]
	μ	Auslastungsfaktor der Anlage [-] (Größenordnung 0,4 – 0,9)
	T	Betriebszeitraum pro Tag [h] (Größenordnung 8-10 h)
	T_{Fahrt}	Dauer eines Fahrzyklus [s]
	W_{Betrieb}	Betriebszeitraum der Anlage pro Jahr [Wochen]
	N_{Sturm}	geschätzter wetterbedingter Stillstand pro Jahr [Tage]

Die Dauer eines Fahrzyklus t_{Fahrt} kann dabei wie folgt berechnet werden:

$$t_{\text{Fahrt}} = \frac{L_{\text{schräg}}}{v_{\text{nenn}}} + t_a + t_U \quad (44)$$

Mit:	$L_{\text{schräg}}$	schräge Länge der Anlage [m]
	v_{nenn}	Nennfahrgeschwindigkeit der Anlage [m/s]
	t_a	überschlägiger Zeitverlust zum Beschleunigen und Verzögern [s] (Größenordnung 20 s)
	t_U	Dauer des Fahrgastaustauschs durch Umsteigen [s] (Größenordnung 60 s)

Es wird deutlich, dass dieser Rechnung ein hoher Schätzanteil beiwohnt. Auf Basis der Branchenerfahrung des IFT und des häufigen, direkten Kontakts zu den betroffenen Betreibern kann zwar von einer zuverlässigen Güte dieser Werte ausgegangen werden, jedoch wird die mögliche Unsicherheit später im Gesamtmodell mit einem Vorfaktor berücksichtigt, um Irrtümer nicht zu stark in die Analyse einfließen zu lassen.

6.2 Ermittlung des Schlaglängenverlaufs

Das scheinbar chaotisch verlaufende Grundsignal einer magnetinduktiven Prüfung, fälschlicher Weise oft abwertend „Grundrauschen“ genannt, birgt ein komplexes Frequenzspektrum, in dem unter anderem die geometrische Periodizität der metallischen Bestandteile des Seils, den Drähten und Litzen, und somit auch die Schlaglänge, verborgen sind.

Durch diskrete Fourier-Transformation einer bestimmten Blocklänge, ist es in einer studentischen Arbeit von Widmann am IFT gelungen, das lokale Frequenzspektrum von magnetinduktiv geprüften Seilen zu analysieren und die Schlaglänge über den Verlauf der Messung darzustellen (Widmann 2013). Widmann gibt die Formelbeziehung der diskreten Fourier-Transformation wie folgt an:

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-i2\pi \frac{mn}{N}} \quad (45)$$

Mit	$X[m]$	Folge der Amplituden
	m	0, 1, ..., N-1 Spektrallinien
	$x[n]$	Folge der Abtastwerte
	n	0, 1, ..., N-1 Abtastwerte

Widmann hat dabei den verfälschenden Randeffect der blockweisen Analyse einer diskreten Fourier-Transformation berücksichtigt und nutzbare Einstellfaktoren für die Schlaglängenauswertung gefunden. Der sogenannte Leck-Effekt, der durch die Unstetigkeiten der Analyse an den Übergängen der Blöcke entsteht, konnte durch eine Fensterfunktion, dem sogenannten Hamming-Fenster, unterdrückt werden, vgl. Abbildung 91. Vereinfacht erklärt wird hier eine Art Gaußkurve als Verstärkungsfaktor hinter den analysierten Block gelegt, so dass die störenden Randbereiche in ihren Auswirkungen auf das Ergebnis herabgesenkt werden. Als Blocklänge selbst wählte Widmann ungefähr die 50-fache Schlaglänge, somit in etwa den 250-fachen Seildurchmesser.

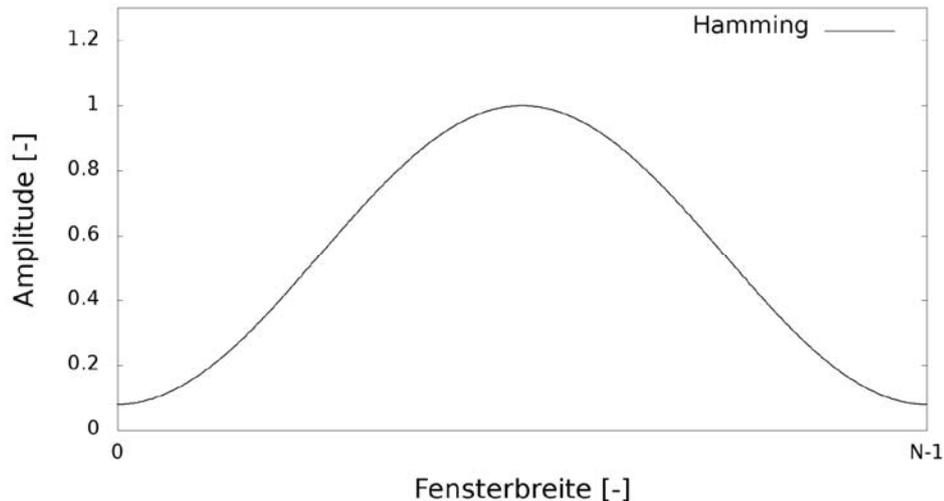


Abbildung 91: Hamming Fensterfunktion nach (Widmann 2013)

Die entwickelte Methode liefert abschließend ein lokales Frequenzspektrum, aus dem die Seilschlaglänge als automatisch identifizierbares lokales Maximum heraussticht. Da die Nennschlaglänge für ein Seil bekannt ist und der Istwert angesichts der gültigen Qualitäts- und Abnahmekriterien nicht beliebig weit davon abweichen kann (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg 11-2004), ist die Erzeugung eines Schlaglängenverlauf-Diagramms aus den einzelnen Fourier-Analysen möglich.

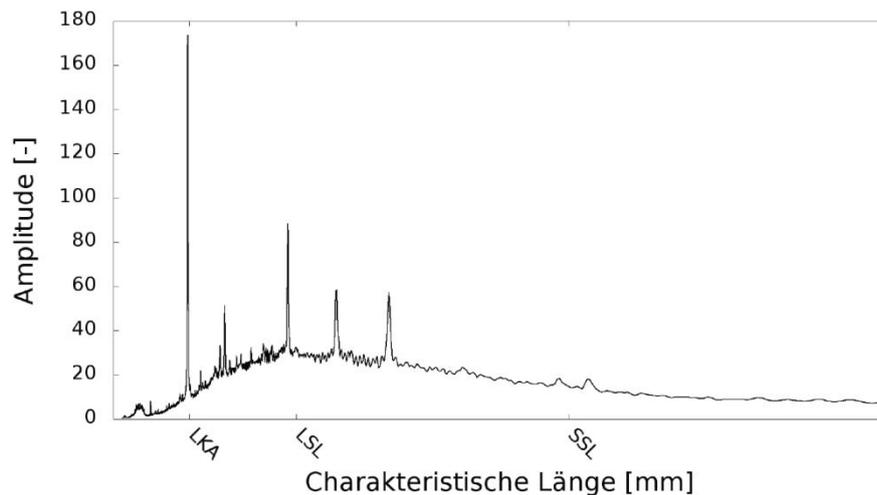


Abbildung 92: Schema Amplitudendichtespektrum eines Förderseiles nach Widmann
LKA: Litzenkuppenabstand, LSL: Litzenschlaglänge, SSL: Seilschlaglänge

Die Ergebnisse wurden durch parallele Messungen wie folgt verifiziert: an insgesamt sechs Seilbahnanlagen der Typen Umlaufbahn, Pendelbahn und Standseilbahn wurden jeweils händische Schlaglängenmessungen (vgl. Abbildung 31, Seite 25, elektronische Schlaglängenmessungen mit Näherungssensoren (vgl. Abbildung 23, Seite 18) sowie die hier beschriebene Fouriertransformation magnetinduktiver Prüfdaten durchgeführt und

Verglichen. Es konnten keine nennenswerten Abweichungen festgestellt werden, so dass die Technik in vorliegender Arbeit prinzipiell angewendet werden kann. Da jedoch zur Fourieranalyse keine für Drittnutzer verwendbare Softwarelösung aus der studentischen Arbeit vorlag, waren Programmierarbeiten zur Aufbereitung, Anpassung und Stabilisierung der ursprünglich studentischen Prototypenapplikation notwendig. Daher wurde für die vorliegende Untersuchung ein entsprechendes Tool neu aufgesetzt. Das Beispiel einer durch Fouriertransformation gebildeten Schlaglängenkurve aus magnetinduktiven Prüfdaten zeigt Abbildung 93.

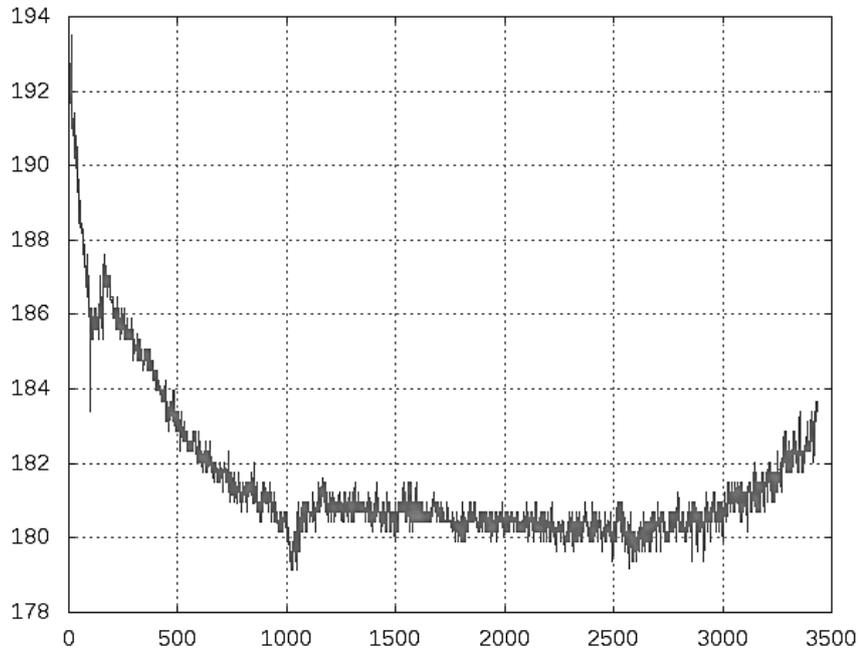


Abbildung 93: Beispiel einer durch Fouriertransformation gebildeten Schlaglängenkurve aus magnetinduktiven Prüfdaten

Aus den lokalen Schlaglängen wird nun über die folgende geometrische Beziehung direkt der längenbezogene Verdrehwinkel errechnet. Nach (Ernst 2012) beträgt die veränderte Litzenschlaglänge L_L' eines auf den Schlagwinkel β' verdrehten Seils:

$$L_L' = L_L \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta'} \quad (46)$$

Mit L_L' Schlaglänge des verdrehten Seils [mm]
 L_L Ursprüngliche (Nenn-)Schlaglänge des Seils [mm]
 β' Schlagwinkel des verdrehten Seiles [rad]
 β Ursprünglicher (Nenn-)Schlagwinkel des Seils [rad]

Als Beziehung für den Schlagwinkel β' eines um den längenbezogenen Winkel ω verdrehten Seils unter Berücksichtigung des Formelwerkes nach (Feyrer 2000) setzt Ernst:

$$\tan \beta' = \frac{\tan \beta - R\omega}{1 + \varepsilon_D} \quad (47)$$

Mit β' Schlagwinkel des verdrehten Seiles
 R Teilkreisradius der Litzen
 ω Längenbezogener Verdrehwinkel
 ε_D Drahtdehnung

Im vorliegenden Fall soll die Formel nicht wie ursprünglich von Feyrer intendiert zur Spannungsbetrachtung einer Seilgeometrie genutzt werden. Da die Drahtdehnung im 90

Promillebereich liegt und somit nur geringfügigen Einfluss auf die oben gezeigte Formel (47) hat, kann ε_D vernachlässigt werden, so dass der Nenner den Wert 1 annimmt. Diese Vereinfachung wurde in der theoretischen Überprüfung der resultierenden Schlaglängen der verdrehten Prüflinge im Versuch verwendet und somit experimentell bestätigt, vgl. Abbildung 32 auf Seite 25. Eingesetzt in Formel (46) ergibt dies

$$L'_L = L_L \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - R\omega} \quad (48)$$

und aufgelöst nach dem Verdrehwinkel ω erhält man den Gesamtausdruck zur Berechnung der Verdrehung aus der Ist-Schlaglänge eines Seils:

$$\omega = \frac{\tan \beta}{R} \cdot \left(1 - \frac{L_L}{L'_L}\right) \quad (49)$$

Um diese Beziehung direkt anwenden zu können, werden die übliche Schlaglänge L_L der untersuchten Seilkonstruktionen sowie der Teilkreisradius R der Litzen benötigt. In der bereits in Kapitel 5.2 erwähnten Archiv-Recherche wurde ebenfalls ein Schlaglängenfaktor c_L in Abhängigkeit des Seilnennendurchmessers für eine Vielzahl von Seilen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 36 dargestellt.

Seilkonstruktion	Schlaglängen-Faktor $c_{L,i}$	Stichprobengröße	Standardabweichung
6x19 Seale	7,10 * d	41	0,2543
6x36 Warrington-Seale	7,05 * d	19	0,2824
6x25 Filler	7,01 * d	13	0,1670

Tabelle 36: Durchschnittliche Schlaglängen üblicher Seilbahnseilkonstruktionen

In Anbetracht des verhältnismäßig kleinen Unterschieds der Schlaglängenfaktoren $c_{L,i}$ im Vergleich zur Standardabweichung der Stichprobe, wird im Folgenden unter Berücksichtigung der jeweiligen Stichprobengröße ein allgemeingültiger Schlaglängenfaktor $c_{L,a}$ für die drei vorliegenden Seilbahnseilkonstruktionen gebildet:

$$c_{L,a} = \frac{\sum_1^i c_{L,i} \cdot N_i}{\sum_1^i N_i} = 7,07 \quad (50)$$

Der Litzenteilkreisradius R errechnet sich durch Subtraktion des Litzendurchmessers vom Seildurchmesser, idealer Weise unter Verwendung des erwarteten Ist-Seildurchmessers. Feyrer gibt den zu erwartenden Ist-Durchmesser mit $1,025 \cdot d$ an. Als Ergebnis für die üblichen Litzendurchmesser liefert die Archiv-Recherche als Seildurchmesser bezogenen Faktor $c_{dL,i}$ für den jeweiligen Litzendurchmesser:

Seilkonstruktion	Faktor $c_{dL,i}$ für Litzendurchmesser	Stichprobengröße	Standardabweichung
6x19 Seale	0,327 * d	41	0,0099
6x36 Warrington-Seale	0,324 * d	19	0,0045
6x25 Filler	0,324 * d	13	0,0035

Tabelle 37: Durchschnittliche Litzendurchmesser üblicher Seilbahnseilkonstruktionen

Da auch hier ähnliche Zustände wie bei den Schlaglängenfaktoren vorherrschen, darf ebenfalls für alle drei Seilkonstruktionen zu einem Gesamtfaktor $c_{dL,a}$ vereinfacht werden:

$$c_{dL,a} = \frac{\sum_1^i c_{dL,i} \cdot N_i}{\sum_1^i N_i} = 0,326 \quad (51)$$

Somit ergibt sich für die Berechnung des Litzenteilkreises R

$$R = \frac{d_{Ist} - d_L}{2} = \frac{d}{2} \cdot (1,025 - 0,326) = 0,35 \cdot d \quad (52)$$

Mit diesen Werten kann nun Gleichung (49) für die drei behandelten Seilkonstruktionen um die festen Größen ergänzt werden. Der Verdrehwinkel eines Seilbahnzugseils verändert sich somit in Abhängigkeit der Schlaglänge zu:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\tan \beta}{R} \cdot \left(1 - \frac{c_{L,a} \cdot d}{L_L'}\right) = \frac{\tan \beta}{0,35 \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{7,07 \cdot d}{L_L'}\right) \\ &= \frac{\tan \beta}{0,35} \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{7,07}{L_L'}\right) \end{aligned} \quad (53)$$

Typische Schlaglängenverläufe und Beobachtungen

Nachfolgend werden beispielhafte Diagramme der Schlaglängenanalyse durch lokale Fourier-Transformation dargestellt, um typische Verläufe und Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der Drehsensormessungen zu zeigen. In den Abbildungen ist die zugehörige Nennschlaglänge durch eine horizontale gestrichelte Linie hervorgehoben.

Obere Zugseile weisen während der Fahrt durch die Bergstation meist einen wie in Abbildung 94 dargestellt konvexen Kurvenverlauf auf. Das Seil ist an den Rändern zgedreht, während es in der Mitte aufgedreht ist. **Untere Zugseile** hingegen weisen meist einen konkaven Kurvenverlauf der Schlaglänge auf. Während das Seil in der Mitte zgedreht ist, zeigt sich an den Rändern wie erwartet eine aufgedrehte Schlaglänge, welche unter anderem eine beschleunigte Drahtbruchzunahme in diesem Bereich verursacht.

Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen der Drehsensormessungen aus Kapitel 5.5, Tabelle 30 und Tabelle 32. Die Durchschnittswerte der Umdrehungen bei Berg- und Talfahrt zeigen, dass die oberen Zugseile grundsätzlich am Rand zudrehen, während die unteren Seile am Rand in Summe aufdrehen.

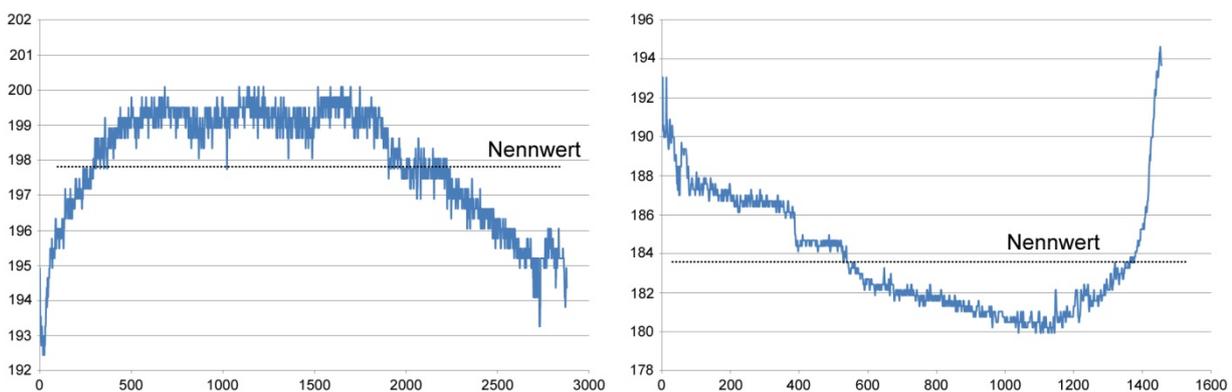


Abbildung 94: Typische Schlaglängenverläufe oberer (links) und unterer Zugseile (rechts)
(x-Achse: Fahrweg [m], y-Achse: Schlaglänge [mm])

Wie auch bei den Drehsensormessungen wurden gewisse physikalische Grundgegebenheiten überprüft, indem mit verschiedenen spezifisch ausgewählten magnetinduktiven Prüfungen vergleichende Schlaglängenanalysen durchgeführt wurden, vgl.

Abbildung 95. Die überlagert dargestellten Schlaglängendaten wiederholter Messungen beweisen, dass:

- Zugseile über Jahre hinweg einen identischen Schlaglängenverlauf halten (oben links)
- der gespeicherte Schlaglängenverlauf von der Fahrtrichtung der Anlage nahezu unabhängig ist (oben rechts)
- Zugseile verschiedener Chargen auf der gleichen Anlage identische Schlaglängenverläufe zeigen (oben rechts)
- parallel verlaufende Zugseile unter den gleichen geometrischen Bedingungen identische Schlaglängenverläufe entwickeln (unten links und rechts).

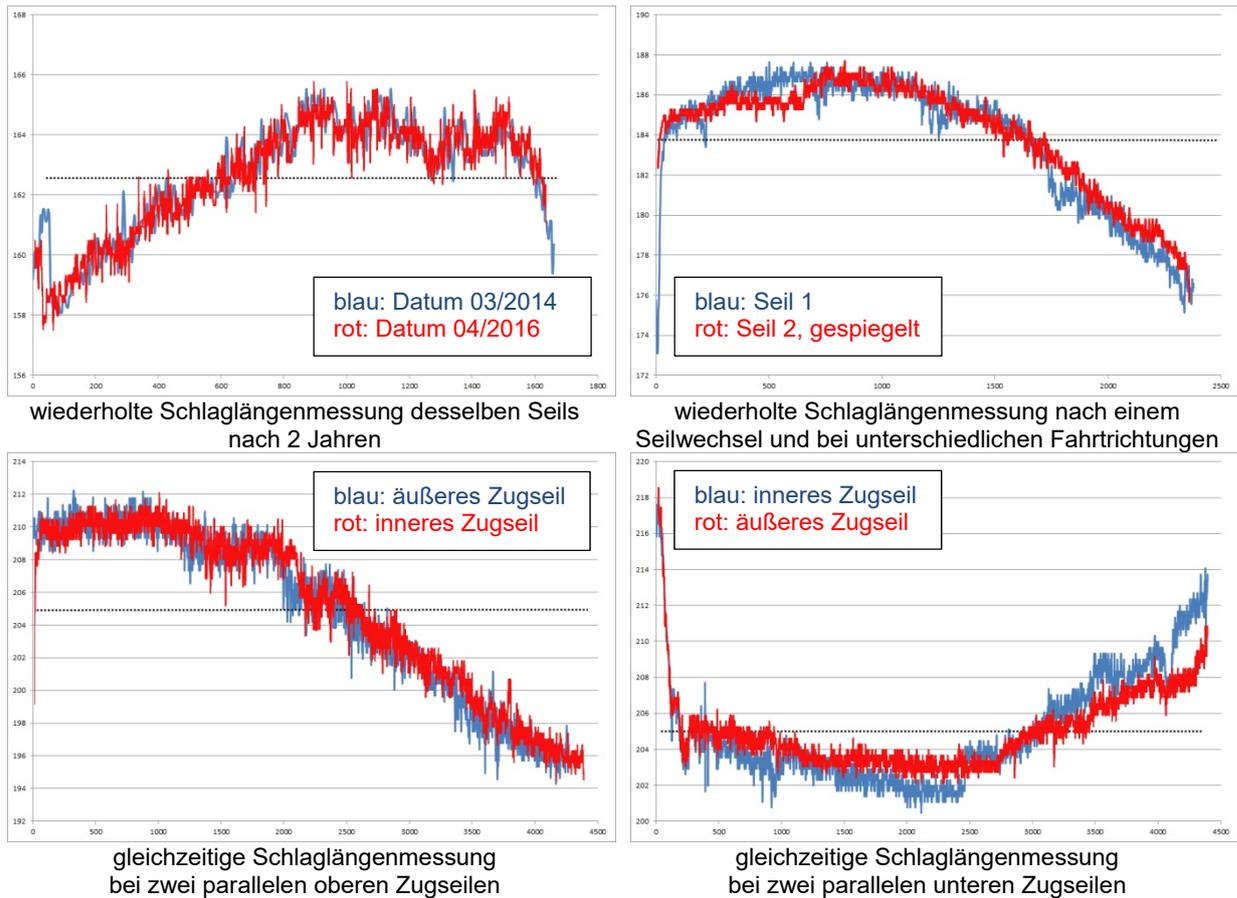


Abbildung 95: Vergleich von Schlaglängenkurven bei wiederholten oder gleichzeitigen Messungen von Zugseilen (x-Achse: Verfahrweg [m], y-Achse: Schlaglänge [mm])

Mit Formel (53) werden nun die realen Verdrehwinkel der Seile an den Rändern und in Seilmitte aus den Schlaglängen berechnet. Die nachfolgende Tabelle 38 gibt dabei einen Überblick der real vorgefundenen relevanten extremen und durchschnittlichen Verdrehwinkel der Seile.

	Obere Zugseile, Rand	Obere Zugseile, Mitte
Minimaler Verdrehwinkel [°/100d]		-162,2
Mittlerer Verdrehwinkel [°/100d]	92,9	-72,0
Maximaler Verdrehwinkel [°/100d]	312,8	
	Untere Zugseile, Rand	Untere Zugseile, Mitte
Minimaler Verdrehwinkel [°/100d]	-487,7	
Mittlerer Verdrehwinkel [°/100d]	-231,0	83,7
Maximaler Verdrehwinkel [°/100d]		151,0

Tabelle 38: relevante Verdrehwinkel an den Rändern und in der Mitte der Schlaglängenanalysen

Es liegen nun alle Daten vor, um in den nächsten Kapiteln die erwartbare Drehmomententwicklung als „SOLL“ mit der bleibenden Verdrehung und ihrer Auswirkung auf die reale Seillebensdauer als „IST“ in Beziehung zu setzen und in einem Modell zu vereinen.

7 Untersuchung von Ansätzen für Bewertungsmodelle

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die theoretisch erwartbare Drehmomententwicklung als SOLL-Seite sowie die real vorgefundenen Dreh-, Verdreh- und Lebensdauerentwicklungen als IST-Seite beschrieben und analysiert. Nun sollen beide Seiten in einem Gesamtmodell verknüpft werden. Im Folgenden werden dazu verschiedene Ansätze vorgestellt, diskutiert und bewertet, um den gesuchten Zusammenhang abschließend zu entwickeln.

7.1 Ansatz technische Bewertung

Die Einflussfaktoren auf die Seildrehung bzw. das erwartbare Drehmoment lassen sich in Anlehnung an das methodische Konstruieren nach Pahl/Beitz (Feldhusen und Grote 2013) und die Ermittlung der technischen Wertigkeit nach VDI 2225 Blatt 3 (Richtlinie VDI 2225-3) gewichten. Anstatt der technischen und der wirtschaftlichen Wertigkeit könnten alternativ die physikalische Relevanz der Einflussfaktoren einer Anlage individuell gewichtet, bewertet und auf die in den Messdaten beobachtete Ausprägung der Gesamtdrehung oder verbleibenden Schlaglänge bezogen werden. Eine Beispielmatrix zur Bewertung einer Seilbahnanlage hinsichtlich Drall nach Pahl/Beitz zeigt Tabelle 39. Die Anwendbarkeit des theoretischen Bewertungsmodells wird insofern begünstigt, als durch die direkte Bewertung ohne eine mathematische Abstraktion in Form einer Modellkurve die Komplexität in Grenzen gehalten wird. Die Plausibilität von Zwischenergebnissen bliebe hier über den gesamten Beurteilungsprozess weitestgehend erhalten.

Parameter	Wert	Erwartete Drehungen	Intensität des theoretischen Drehmoments	Beobachtete Lebensdauer-Reduktion	...	Teil-Summe
Anzahl Stützen	3	X1	Y1	Z1
Lage Antrieb	Tal	X2	Y2	...		
Lage Spannung	Berg	X3	...			
Höhenunterschied	1500m	...				
Summe						...

Tabelle 39: Beispielmatrix technische Bewertung von Einflussfaktoren in Anlehnung an Pahl/Beitz

7.2 Ansatz Lebensdauerpolynom nach Feyrer

Das Lebensdauerpolynom nach Feyrer ist eine durch Regression ermittelte Ausgleichskurve, die auf Basis einer großen Grundmenge an Versuchen unter verschiedenen Einflussfaktoren gebildet wird (Feyrer 2000). Die Versuchsparameter bilden in Kombination mit Vorfaktoren Monome der Struktur $a_i \cdot k^n$. Der Grad des Polynoms steigt unter anderem mit der Anzahl der erwarteten Einflussparameter. Das Ergebnis der Gleichung ist die statistisch erwartbare Zyklenzahl eines Seils bis zum Bruch bzw. bis zu seiner Ablegereife. Die Methode ist über einen langen Zeitraum erprobt und weltweit anerkannt. In Bezug auf die Seilschädigung aus Verdrehung könnte eine ähnliche Struktur genutzt werden, um aus den Einflussfaktoren Nr. 01 bis 14 der FMEA eine Formel zur Berechnung der verbleibenden Schlaglänge an den Seilenden oder der erwartbaren verbleibenden Umdrehungszahl zu bilden. Als Datenbasis stehen ca. 50 Drehungsmessungen und die technischen Daten der untersuchten Seilbahnanlagen zur Verfügung.

Vorausgesetzt die Formel ist für die verbleibende Schlaglänge ermittelbar, könnte alternativ die erwartbare Lebensdauer in Biegewechseln direkt als Ergebnis der Berechnung angestrebt werden. Durch Integration der Stationskonfiguration und der Betriebsdaten, z.B. Anzahl der Scheiben, Betriebsjahre, durchschnittliche Fahrten pro Jahr usw. könnten die

Biegewechsel direkt auf eine äquivalente Fahrtenzahl bzw. Betriebsdauer umgerechnet werden. Als Beispiel könnte ein Polynom der Struktur

$$L' \text{ bzw. } N_{dreh} = a_0 + a_1 \cdot k_{Id01} + a_2 \cdot k_{Id02}^2 + a_3 \cdot k_{Idxx}^3 + \dots \quad (54)$$

durch die vorhandenen Daten gelegt werden, jedoch ist die Beschränkung der Einflussfaktoren nicht trivial. Zudem ist der Weg zum Ergebnis für den Nutzer nicht sichtbar, eine Plausibilitätsprüfung ist kaum möglich. Bei einer kontinuierlichen Erweiterung der Datenbasis kann zudem die Genauigkeit des anfänglich gewählten Modells merklich sinken, so dass eine neue, komplexe Varianten-Analyse verschiedener Kurvenformen und Einflussparameter nötig würde. Der Aufwand hierfür ist vergleichsweise hoch.

7.3 Ansatz Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner

Die Palmgren-Miner Regel wurde ursprünglich zur Lebensdaueranalyse von Kugellagern unter komplexen Lastkollektiven entwickelt (Palmgren 1924). Die grundlegende Idee ist, die einzelnen Stufen eines Lastkollektivs zu analysieren und durch lineare Akkumulation zu einer Gesamtlebensdauer zusammenzufassen. Dafür müssen für jede diskrete Stufe i des Lastkollektivs die erreichbaren Zyklen N_i bis zum Versagen des Prüflings und die während der Nutzung anteilig gefahrenen Zyklen n_i bekannt sein oder sinnvoll geschätzt werden. Die Summe der Quotienten aus den anteilig gefahrenen Zyklen n_i und ihren jeweiligen erreichbaren Zyklenzahl N_i aller Laststufen muss 1 ergeben und stellt den erwartbaren Bruch des Bauteils dar, vgl. Formel (55).

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (55)$$

Mit

m Anzahl der Lastfälle

n_i Anzahl der Zyklen / Belastungen im Lastfall i

N_i Ertragbare Zyklen / Belastungen im Lastfall i

1 bei 1 bzw. 100% ist statistisch gesehen der Bruch des Bauteils zu erwarten

Die Anzahl n_i der Zyklen im Lastfall i kann auch als prozentualer Anteil w_i der Zyklenzahl Z bei Versagen des Bauteils ausgedrückt werden, vgl. Formel (56):

$$n_i = Z \cdot w_i \quad (56)$$

Eingesetzt in (55) ergibt sich der folgende Ausdruck (57), der schließlich zur erreichbaren Zyklenzahl Z des Bauteils aufgelöst werden kann, siehe abschließende Gleichung (58).

$$\sum_{i=1}^m \frac{Z \cdot w_i}{N_i} = 1 \quad (57)$$

$$Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{w_i}{N_i}} \quad (58)$$

Übertragen auf die Schadensentwicklung könnte eine resultierende, maximale Drehmomenteinwirkung äquivalent zum Bruch des Prüflings als „1“ gesetzt werden. Die Anzahl Laststufen i wird nun zu den Einflussfaktoren Stützenverlust, Antriebskraft, gewandelt und die entsprechenden maximalen Drehmomentwerte (äquivalent N_i) berechnet. Der Wirkanteil w_i wäre z.B. aus den Messungen qualitativ bestimmbar, indem man Drall-Ausprägung und Layout der Bahnanlage paarweise vergleicht und einen Gesamtanteil bestimmt. Die Zahl Z könnte abschließend als Maß für den Schädigungsgrad angesehen

werden und somit eine Bewertung zulassen oder einen Bezug auf die erwartbare verbleibende Schlaglängenänderung an den Seilenden.

Dieser Ansatz birgt eine gewisse Unsicherheit, da die Versuche keinen eindeutigen Hinweis auf eine diskret trennbare Überlagerung der Schädigungsmechanismen geben. Der Drall wirkt immer und kann möglicherweise nicht Anteilig bestimmt werden.

7.4 Ansatz Entscheidungsregeln nach Hurwicz, Laplace und Savage-Niehans

Wie schon zuvor erwähnt, ist der grundsätzliche Zusammenhang der Einflussfaktoren auf Drehung bewiesen, kann eventuell jedoch nicht quantitativ exakt benannt werden. Für diesen Fall besteht aus mathematischer Sicht die Möglichkeit, eine Entscheidung bei objektiver Unsicherheit zu treffen, die in der Wirtschaftswissenschaft angewendet wird. Dazu müssen folgende Parameter aufgestellt und ihre möglichen Ausprägungen zusammengetragen werden:

- Alternativen bzw. Konfigurationsvarianten der Seilbahn a_i
- Umweltzustände bzw. Verhaltensvarianten des festgestellten Dralls s_j
- Ergebnisse bzw. ermittelte Lebensdauern der untersuchten Seile e_{ij}

In Bezug auf die vorliegende Abhandlung könnte eine Tabelle der Alternativen und Umweltzustände für den Seildrall wie folgt strukturiert sein, vgl. Tabelle 40, und anschließend die Teilergebnisse wie in Tabelle 41 dargestellt zugeordnet werden.

Alternativen		Umweltzustände	
a_1	Antrieb Tal	s_1	Drehmomentkurve steil
a_2	Antrieb Berg	s_2	Bleibende Schlaglänge lang
a_3	...	s_3	...
a_i	...	s_i	...

Tabelle 40: Beispieltabelle der Alternativen und Umweltzustände der Entscheidungstheorie

Ergebnisse e_{ij}	s_1	s_2	s_i
a_1	60%	70%	90%
a_2	70%	80%	90%
a_i	90%	90%	...

Tabelle 41: Beispieltabelle Ergebnisse in Form von erwartbaren Lebensdauern nach Feyrer in %

Zur Entscheidung bei Unsicherheit werden im Folgenden nun komprimiert unterschiedliche Regeln vorgestellt, von denen eine geeignete weiter untersucht werden könnte. Die nun behandelten Regeln sind diejenigen nach Hurwicz, Laplace und Savage-Niehans (Bamberg et al. 2012).

Die Entscheidungsregel nach **Hurwicz** wird auch Optimismus-Pessimismus-Regel genannt. Sie ermöglicht, die Erfahrung bzw. Erwartung des Beurteilers in die Systematik mit einzubeziehen. Über den Optimismusparameter λ , der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, wird der Erwartungshorizont beeinflusst. Bei $\lambda=0$ entsteht die sogenannte Maximin-Beziehung, die eine pessimistische Erwartungshaltung repräsentiert, bei $\lambda=1$ wirkt die Maximax-Beziehung als Grundlage der Entscheidung, die eine optimistische Haltung darstellt. Liegt λ zwischen 0 und 1, so wird letztlich das günstigste Ergebnis gegenüber der ungünstigsten Konsequenz bewertet. Aus technischer Sicht erscheint das Modell Hurwicz hier nicht zielführend, da im vorliegenden Fall keine willkürliche Haltung eines Beurteilenden gefragt ist, sondern ein möglichst Realitätsnahes Ergebnis entstehen soll. Eine ingenieurmäßig konservative Haltung kann bei individuellen Annahmen berücksichtigt werden, sollte jedoch nicht als allgemeiner Vorfaktor der Ergebnisbetrachtung vorangestellt werden.

Laplace setzt in seiner Entscheidungsmethodik bei Unsicherheit die Eintrittswahrscheinlichkeiten für alle Zustände gleich. Das Gütemaß ist hier die Nutzensumme Φ , vgl. Formel (59), es wird also die Möglichkeit mit dem besten Ergebniswert gewählt.

$$\max_i \Phi_{ai} = \frac{1}{n} \sum_j^n e_{ij} \quad (59)$$

Mit Φ Nutzensumme
 e Einzelnutzen/Ergebnis der Alternative i und des Umweltzustands j
 n Gesamtanzahl der beobachteten Umweltzustände j

Auch dieser Ansatz besitzt eine übergeordnete Erwartungshaltung, die mit technischen Gesetzmäßigkeiten nicht unbedingt in Einklang zu bringen ist. Durch die pauschale Gleichmachung aller Eintrittswahrscheinlichkeiten können die an den Seilbahnen wirkenden Faktoren gegebenenfalls nicht realitätsnah abgebildet werden. Somit birgt auch diese Methode ein nicht zu vernachlässigendes Risiko der Fehleinschätzung.

Die Savage-Niehans-Regel wird auch Regel des kleinsten Bedauerns genannt und bewertet den Schaden in Bezug auf den maximal möglichen Gewinn. Letztlich wird diejenige Alternative gewählt, die den potentiellen Schaden minimiert – im weitesten Sinne kann hier eine technisch gesehen konservative Betrachtungsweise umgesetzt werden. Die Schritte zum Ergebnis lauten dabei wie folgt:

- Ermittlung des maximalen Ergebniswerts $e_{ij,max}$
- Subtraktion aller Einzelergebnisse e_{ij} vom Maximum $e_{ij,max}$ für jeden Zustand s_j und Bildung einer Opportunitäts(kosten)matrix aus den jeweiligen entgangenen Nutzen
- Identifikation des Minimums aus den individuellen Verlust-Maxima der Alternativen a_i

Mit dieser Methodik ist es immerhin möglich, unter konservativer Betrachtungsweise eine mögliche Entscheidung über das Zusammenwirken der Einflussfaktoren zu treffen. Generell bleibt der Entscheidungstheorie unter Ungewissheit anhaften, dass der Weg zum Ergebnis einer vergleichsweise starren Regelung folgt, die z.B. technische Gesetzmäßigkeiten oder Erfahrungswerte vollkommen außer Acht lässt.

Im nächsten Kapitel werden die vorgestellten Methoden nun bewertet, die beiden vielversprechendsten Modell ausgewählt und einer Detaillierung sowie einer abschließenden Validierung unterzogen.

8 Gesamtmodell zur Seilschädigung aus Verdrehung

8.1 Bewertung und Auswahl des Abbildungsmodells

Die als Grundlage für ein Abbildungsmodell vorgestellten Methoden müssen durch eine systematische Bewertung nun auf ihre Eignung für das vorliegende Projekt verglichen und bewertet werden. In den Vorangegangenen Kapiteln wurden Kriterien und die grundsätzliche Philosophie des angestrebten Modells entwickelt, so dass sich nun eine Matrix bilden lässt, anhand der sich die Methoden im Rahmen einer klassischen technischen Bewertung nach Punkten analysieren lassen. Als relevante Anforderungen werden daher die folgenden Kriterien berücksichtigt:

- Die Komplexität der Anwendung des Modells sollte möglichst niedrig sein, damit auch dritte die hier erforschten Ergebnisse nutzen können und die Datenbasis durch weitere Untersuchungen gepflegt und erweitert werden kann.
- Für den Anwender sollte das Ergebnis möglichst nachvollziehbar sein, um Rechenfehler aber auch Grenzen des Modells erkennen zu können. Die Ergebnissicherheit wird dadurch maßgeblich gesteigert.
- Das Modell sollte zur Struktur der vorliegenden Datenbasis möglichst effizient passen. Ein hoher Anteil an noch zu entwickelten bzw. zu schätzenden Parametern wirkt sich negativ auf die Ergebnissicherheit aus, erfordert Rückmeldungen der Drittnutzer und löst unter Umständen eine langwierige Korrekturphase aus.
- Das Modell sollte in technischen Umgebungen erprobt sein. Dies erhöht nicht nur die Nutzerakzeptanz, sondern mindert auch das Risiko einer eventuell nicht ausreichenden Funktionalität.
- Das Modell sollte einen hohen Automatisierungsgrad ermöglichen, um zukünftig eine softwarebasierte Analyse mit wenig Eingabeaufwand anbieten zu können. Die Nutzung von standardisierten Rechenoperationen und Gesetzmäßigkeiten ist dabei von großem Vorteil.
- Das Modell sollte eine möglichst hohe Funktionalität besitzen und dem Nutzer möglichst vielschichtige, informative Ergebnisse liefern. Dies wirkt sich erneut positiv auf die Nutzerakzeptanz und letztlich auf die Weiterentwicklung der neuen Analysemethode aus.
- Das Modell sollte in einem gewissen Rahmen Flexibilität bieten, um sich anderen Seilkonstruktionen, Seiltrieben oder speziellen Anlagenkonfigurationen anpassen zu können. Zudem soll die Möglichkeit zur Erweiterung gegeben sein, um neue Einflussparameter in Zukunft hinzufügen zu können.

Auf Basis dieser Beurteilungskriterien werden die einzelnen Methoden nun in Tabelle 42 systematisch bewertet, dabei wird eine Punkteskala von 1 bis 10 verwendet. Hohe Punktzahlen stehen für einen positiven, sehr guten Erfüllungsgrad des Kriteriums durch die Methode, während niedrige Punktzahlen als mangelnde Erfüllung eines Kriteriums zu einer negativen Bewertung führen. Die maximal erreichbare Punktzahl bei den sieben beschriebenen Kriterien beträgt somit 70 Punkte.

Kriterium	Bewertungs- skala	Methode			
		Pahl/Beitz VDI 2225	Feyrer	Palmgren- Miner	Savage- Niehans
Komplexität der Anwendung (insbes. für Dritte)	Hoch = 0 Niedrig = 10	10	4	8	6
Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses	Niedrig = 0 Hoch = 10	10	7	10	8
Eignung in Bezug auf Datenbasis / Schätzanteil Parameter	Hoch = 0 Niedrig = 10	7	10	6	4
Nähe / Erprobung in Bezug auf technische Problemstellung	Niedrig = 0 Hoch = 10	10	8	10	4
Automatisierungsgrad / Anteil vorbestimmter Gesetzmäßigkeiten	Hoch = 0 Niedrig = 10	8	4	6	2
Erwartete Funktionalität	Niedrig = 0 Hoch = 10	10	8	6	5
Flexibilität / Erweiterbarkeit	Niedrig = 0 Hoch = 10	8	4	6	8
Summe [%]		63 [90%]	45 [64%]	52 [74%]	37 [53%]

Tabelle 42: Bewertung der vorgestellten Methoden für ein mögliches Gesamtmodell

Dem Ergebnis der Bewertung zur Folge ist mit 90 % der erreichbaren Punkte ein Gesamtmodell in Anlehnung an die technische Bewertung nach Pahl/Beitz bzw. VDI 2225 zu bevorzugen. Durch die ebenfalls hohe Einstufung des Ansatzes nach Palmgren-Miner mit 74 % der erreichbaren Punkte wird im Folgenden ein Gesamtmodell erstellt, das Grundsätze von beiden Methoden beinhaltet.

8.2 Beurteilung und Vorhersage der Seillebensdauer in der Praxis

Die Modellstruktur als Verknüpfung der beiden favorisierten Ansätze wird nun wie folgt gebildet: in Anlehnung an Palmgren-Miner wird ein maximal erreichbares Schadensniveau aus Seildrall formuliert, äquivalent zur ehemals erreichbaren Lebensdauer von Kugellagern in einem Lastkollektiv. Die berechenbaren Drall-Einflussfaktoren der FMEA entsprechen dabei einem Belastungskollektiv und werden individuell normiert, so dass sie innerhalb des Formel ausdrucks zusammengefasst werden können. Ein Wert von 1 bzw. 100% entspricht somit dem maximal erwartbaren Seillebensdauerverlust durch Drall. Die Struktur der technischen Bewertung nimmt Einfluss in Form von Vorfaktoren, wodurch im Rahmen der nachfolgenden Validierung Seil- und Anlagentypische Eigenschaften berücksichtigt werden können. Neben dieser theoretischen Erfassung des Drall-Aufkommens (SOLL) wird zur Validierung eine messdatenbasierte Abbildung des in der Stichprobe vorgefundenen Schadensniveaus gebildet.

Durch Kenntnis der technischen Anlagen- und Seildaten kann mit Hilfe des Modells die erwartbare bleibende Verdrehung des Zugseils, sein Schädigungspotential sowie die voraussichtliche Seillebensdauer rechnerisch abgeschätzt werden. Der Einfluss von Drall auf die Lebensdauer von Seilbahnseilen in der Praxis lässt sich somit erstmalig voraussagen und erlaubt langfristig eine positive Auswirkung auf die Verfügbarkeit von Seilen, insbesondere für sowohl alpine als auch urbane Hochleistungsbahnen.

Theoretische Abbildung der schadhafte Einflussfaktoren (SOLL)

Auf der theoretischen Seite wurden nun diejenigen Faktoren der FMEA implementiert, die eine Berechnung erlauben. Um das Modell nicht unnötig groß werden zu lassen, wurden die mathematisch erschlossenen Parameter nochmals auf ihre Relevanz hin analysiert bzw. zusammengefasst. Die Krafterhöhung aus Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen in Nr. 06 wird dabei von der Analyse ausgeschlossen. Da der Effekt nur kurzzeitig auftritt und sich die Last und somit das aufgebrachte Drehmoment am Ende der Beschleunigungsphase wieder zurückstellen, wird das Modell an dieser Stelle vereinfacht. Somit bleiben die folgenden Fehler als Rechengrößen in der Analyse erhalten und werden wie beschrieben auf ihr in der Stichprobe der Seilbahnanlagen errechnetes Maximum bezogen. Durch die Bezugnahme der einzelnen Kriterien auf ihr eigenes spezifisches Ausmaß ähnelt die Methode dabei, wie angestrebt, der Implementierung einzelner Lastfälle in der Palmgren-Miner Regel. Um eine sinnvolle Normierung zu erreichen, werden dabei Seilkräfte aus der Anlage auf das Quadrat des wirkenden Seilnennendurchmessers bezogen, um eine äquivalente Seilspannung zu bilden. Die Drehmomente aus Materialkontakt wiederum fließen nur über den Hebelarm des Seilradius ein, so dass diese Größen im Schritt der Normierung durch den einfachen Seildurchmesser d geteilt werden:

- Nr.01: durchmesserbezogene Höhenspannkraft S_H/d^2
- Nr.02: durchmesserbezogene Seilreibungskraft S_R/d^2 bei Wechsel der Fahrtrichtung
- Nr.05: durchmesserbezogene Umfangskraft am Antrieb S_U/d^2
- Nr.08: durchmesserbezogenes Drehmoment aus Stützenreibung M_{ST}/d
- Nr.09: durchmesserbezogenes Drehmoment aus Seilreiterreibung M_{SR}/d .

$$\Phi_{Theor} = \frac{\sum \frac{\varphi_{i,j} \cdot f_i}{\varphi_{i,max}}}{\sum f_{ID,i}} = \frac{\frac{S_{H,j}}{d_j^2} \cdot f_{01}}{\left(\frac{S_H}{d^2}\right)_{max}} + \frac{\frac{S_{R,j}}{d_j^2} \cdot f_{02}}{\left(\frac{S_R}{d^2}\right)_{max}} + \frac{\frac{S_{U,j}}{d_j^2} \cdot f_{05}}{\left(\frac{S_U}{d^2}\right)_{max}} + \frac{\frac{M_{ST,j}}{d_j} \cdot f_{08}}{\left(\frac{M_{ST}}{d}\right)_{max}} + \frac{\frac{M_{SR,j}}{d_j} \cdot f_{09}}{\left(\frac{M_{SR}}{d}\right)_{max}}}{\sum f_{ID,i}} \quad (60)$$

Mit den Werten der Datenbasis ergibt dies

$$\Phi_{Theor} = \frac{\sum \frac{\varphi_{i,j} \cdot f_i}{\varphi_{i,max}}}{\sum f_i} = \frac{\frac{S_{H,j}}{d_j^2} \cdot f_{01}}{69,9 \frac{N}{mm^2}} + \frac{\frac{S_{R,j}}{d_j^2} \cdot f_{02}}{23,3 \frac{N}{mm^2}} + \frac{\frac{S_{U,j}}{d_j^2} \cdot f_{05}}{96,1 \frac{N}{mm^2}} + \frac{\frac{M_{ST,j}}{d_j} \cdot f_{08}}{0,426 \frac{Nm}{mm}} + \frac{\frac{M_{SR,j}}{d_j} \cdot f_{09}}{1,113 \frac{Nm}{mm}}}{\sum f_{ID,i}} \quad (61)$$

Mit:	Φ	Schadensniveau [%]
	φ	Niveau der Einzelkriterien
	ω	Längenbezogener Verdrehwinkel [°/m]
	f	Vorfaktor der technischen Bewertung [-]

Abbildung des vorgefundenen Schadensniveaus (IST)

An dieser Stelle werden die aus Messungen und rechnerischen Analysen vorgefundenen IST-Schadenszustände zu einem gemeinsamen Schadensniveau zusammengefasst. Die umfangreich untersuchten 20 Bahnanlagen bzw. 42 Seile werden als Stichprobe aus der Gesamtheit der existierenden Seilbahnanlagen gewertet und somit die vorgefundenen Niveaus als Referenz verwendet. Das Gesamtniveau wird aus den folgenden drei Punkten gebildet:

1. Vorgefundene Schlaglängen-Erhözung (Aufdrehen) in Bezug auf die maximal vorgefundene Schlaglänge und damit verbundene erwartbare Lebensdauerreduktion, errechnet durch lokale Fouriertransformation aus vorliegenden magnetinduktiven Prüfdaten in Forschungspfad 3 mit Bezug auf die durchgeführten Dauerbiegeversuche und Formelentwicklungen aus Pfad 1
2. Vorgefundene kleinste Seillebensdauer in Bezug auf die erwartbaren Seillebensdauern nach Feyrer, errechnet aus den dokumentierten realen Seillebensdauern der individuellen Seilbahnanlagen aus Pfad 3 und der mit der Methode Feyrer abgeschätzten möglichen Seillebensdauern ohne Verdrehung
3. Vorgefundene Dralldifferenz zwischen Berg- und Talfahrt am Messpunkt bezogen auf das maximal vorgefundene Spektrum der Dralldifferenz, ermittelt aus den Drehsensormessungen der untersuchten Seilbahnanlagen in Pfad 2

Da die Berechnung sowohl der in der Praxis gefahrenen Biegewechsel als auch der erwartbaren Biegewechselzahlen nach Feyrer in Punkt 2 einem gewissen Schätzanteil und Vereinfachungsgrad unterliegen, wurden den Kriterien im Sinne der technischen Bewertung erneut Vorfaktoren zugewiesen, um diesen Anteil besser zu berücksichtigen. Sowohl die exakt vorliegenden Seilkräfte und Fahrzeugauslastungen als auch die Betriebsstunden und witterungsbedingten Stillstandzeiten mussten zum Teil erfahrungsbasiert sinnvoll abgeschätzt werden. Die verbleibende Schlaglänge und Dralldifferenz wurde daher als real gemessen mit Faktor $f_1 = f_3 = 1$, die abgeschätzten Seillebensdauern hingegen mit Faktor $f_2 = 0,5$ multipliziert, um die erwartbare Streuung nicht übermäßig in die Bewertung einfließen zu lassen. Das Schadensniveau gibt daher eine prozentuale Auskunft über den erwartbaren Verdreh- und Schädigungszustand eines Seils:

$$\Phi_{IST,i} = \frac{\sum \frac{\varphi_{i,j} \cdot f_i}{\varphi_{i,max}}}{\sum f_i} = \frac{\frac{\omega_j}{\omega_{max}} \cdot f_1 + \left(1 - \frac{\frac{Z_{Am,IST,j}}{Z_{Am,Fey,j}}}{\left(\frac{Z_{Am,IST}}{Z_{Am,Fey}}\right)_{max}}\right) \cdot f_2 + \frac{N_{max} - \Delta N_{dreh,B-T,j}}{\Delta N_{dreh,B-T,max}} \cdot f_3}{\sum_{i=1}^3 f_i} \quad (62)$$

Mit den Werten der verwendeten Datenbasis ergibt dies

$$\Phi_{IST,i} = \frac{\frac{\omega_j}{-487,7^\circ/100d} \cdot 1 + \left(1 - \frac{\frac{Z_{Am,IST,j}}{Z_{Am,Fey,j}}}{3,274}\right) \cdot 0,5 + \frac{19 - \Delta N_{dreh,B-T,j}}{42} \cdot 1}{2,5} \quad (63)$$

Mit: ZAm Seillebensdauer, bei der 50% der Seile ablegereif sind [Zyklen]
 N Umdrehungen des Seils während einer Umfahrt hin und zurück [U]

Das Ergebnis der Gleichung ist ein vorgefundenes Schadenslevel, das sich in Prozent ausdrücken lässt. Das Niveau der Schädigung orientiert sich dabei am Spektrum der umfangreich untersuchten 20 Seilbahnanlagen bzw. 42 Seile. 100% entsprechen dabei einer maximalen Schädigung des Seils durch Dralleffekte in Bezug auf die Stichprobe. Werden sogar 100% überschritten, so ist die Anlage als übermäßig durch Drall beeinflusst einzustufen. Niedrige Werte stehen stattdessen für eine von Drall nahezu unbeeinträchtigte Seillebensdauer. In Bezug auf das angepasste Feyrer'sche Lebensdauermodell auf Basis der Dauerbiegeversuche führt die größte in der aktuellen Stichprobe vorgefundene negative Verdrehung bei $-487,37^\circ/100d$ im Mittel zu einer erwartbaren Lebensdauerreduktion von 20% in Punkt 1 der IST-Seite, siehe auch Abbildung 96 auf Seite 104. Mit wachsender Datenbasis bei Fortführung der hier begonnenen Untersuchungen können die Faktoren und

Grenzwerte entsprechend dynamisch angepasst werden – ein Vorteil, der für das Modell in der vorangegangenen Wertung berücksichtigt wurde.

8.3 Validierung

In der Praxis müsste die IST-Seite nicht zwingend rechnerisch erfasst werden. Sie dient in der vorliegenden Abhandlung vielmehr der Verifikation und Optimierung der Bewertungsfaktoren für die theoretische Drallanalyse, somit der SOLL-Seite. Liegt jedoch ein Ergebnis der nachfolgend vorgestellten Rechnung vor, so können z.B. durch eine Drehsensor- oder Schlaglängenmessung zusätzlich Daten gewonnen werden, um den Lebensdaueranteil in Gleichung (63) isolieren und ausrechnen zu können. Somit entfällt die für Erstanwender aufwändige und von Schätzungen abhängige Berechnung der Seillebensdauer nach Feyrer. Umgekehrt kann jedoch auch bei Ermittlung der erwartbaren Lebensdauer unter Verdrehung mit Hilfe der Ergebnisse aus Pfad 1 die Größenordnung der erwartbaren Differenz an Seildrehungen oder das Schlaglängenniveau an den Rändern vorhergesagt werden.

Zur Validierung wurden die benötigten Vorfaktoren $f_{i,j}$ der technischen Bewertung nun aufgrund der unterschiedlichen Schlaglängencharakteristik für obere und untere Zugseile sowie in Bezug auf die direkte Einwirkung einer Treibscheibe einzeln gebildet, so dass vier Parametersätze benötigt werden. Ein erster Parametersatz wurde anhand der Erwartungshaltung auf Basis der der inzwischen geleisteten Vorarbeiten aufgesetzt und anschließend systematisch optimiert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Soll- und IST-Seite erreicht wurde. Die Vorfaktoren wurden dabei bewusst ganzzahlig gehalten, um die Anwendbarkeit des Modells zu stärken und das Risiko von Übertragungsfehlern zu mindern. Dabei wurde auch der negative Zahlenraum erlaubt, um den Parametern auch unterstützende Wirkung gegen den Aufbau von Drall zu ermöglichen, wie es in der Literatur auch gefordert wird, vgl. (Engel 1977).

Faktor $f_{i,j}$	Nr.01 Höhen- spannkraft	Nr.02 Seil- reibkraft	Nr.05 Umfangskraft	Nr.08 Drehmoment Stütze	Nr.09 Drehmoment Seilreiter
Oberes Zugseil mit Antrieb	2	3	1	3	2
Oberes Zugseil	1	2	0	0	-1
Unteres Zugseil mit Antrieb	1	1	3	-1	1
Unteres Zugseil	2	3	-2	0	1

Tabelle 43: Parametersätze zur Analyse der SOLL-Seite

Die Abbildungsqualität der SOLL-Seite des Modells gegenüber der Datenbasis der IST-Seite erreicht momentan eine durchschnittliche Abweichung der theoretisch erwartbaren Schädigung gegenüber der vorgefundenen von -1,61 % bei einer Standardabweichung von 16,3 %. Die Streuung mag aus mathematischer Sicht bedeutend sein, aus Sicht der Seilanwendung jedoch sind Streuungen in der Größenordnung von 20% keine Seltenheit, weshalb das vorliegende Ergebnis als gut bezeichnet werden kann. In nachfolgender Abbildung 96 ist eine Übersicht der Modellstreuung entlang des prognostizierten Schadenslevels sortiert für die analysierte Stichprobe dargestellt. Die Zuordnung der vorgefundenen IST-Werte der 42 umfänglich untersuchten Seile durch blaue Rauten gegenüber den schwarzen Quadraten der berechneten, erwartbaren SOLL-Schadensentwicklung des Gesamtmodells verdeutlichen die vergleichsweise geringe Streuung. Ein Schadenslevel von 0% entspricht dabei einer von Drall nahezu unbeeinträchtigten Seillebensdauer, die den Rechenwerten der konventionellen

Feyrer'schen Lebensdauerabschätzung entspricht. Ein ermitteltes Level von 100% kann hingegen aktuell auf eine mittlere Lebensdauerreduktion um 20% unter aufdrehender Dralleinwirkung bezogen werden, wie die zusätzlich dargestellte Referenzachse am rechten Rand des Diagramms zeigt. Die Bahnanlagen der Randbereiche stellen dabei Extremzustände der Stichprobe da (rote Markierungen X1 und X2): während bei X1 nahezu kein Dralleinfluss zu erwarten ist, so ist bei X2 die größte Verdrehung und somit ein maximaler Lebensdauerverlust von 20% zu erwarten. Die Dauerbiegeversuche im Labor haben gezeigt, dass mit steigender Verdrehung sogar 30% Verlust gegenüber einem unverdrehten Seil erreicht werden können. Durch Pflege der Datenbasis ist der Abbildungsraum des Gesamtmodells zukünftig weiter anpassbar. Aktuell liegt der Mittelwert aller Untersuchten Seile der Stichprobe bei einem IST-Schadigungsgrad von 46,93% bzw. einer erwartbaren mittleren Lebensdauerreduktion von nahezu 10%, siehe auch blaue Mittelwertlinie in Abbildung 96.

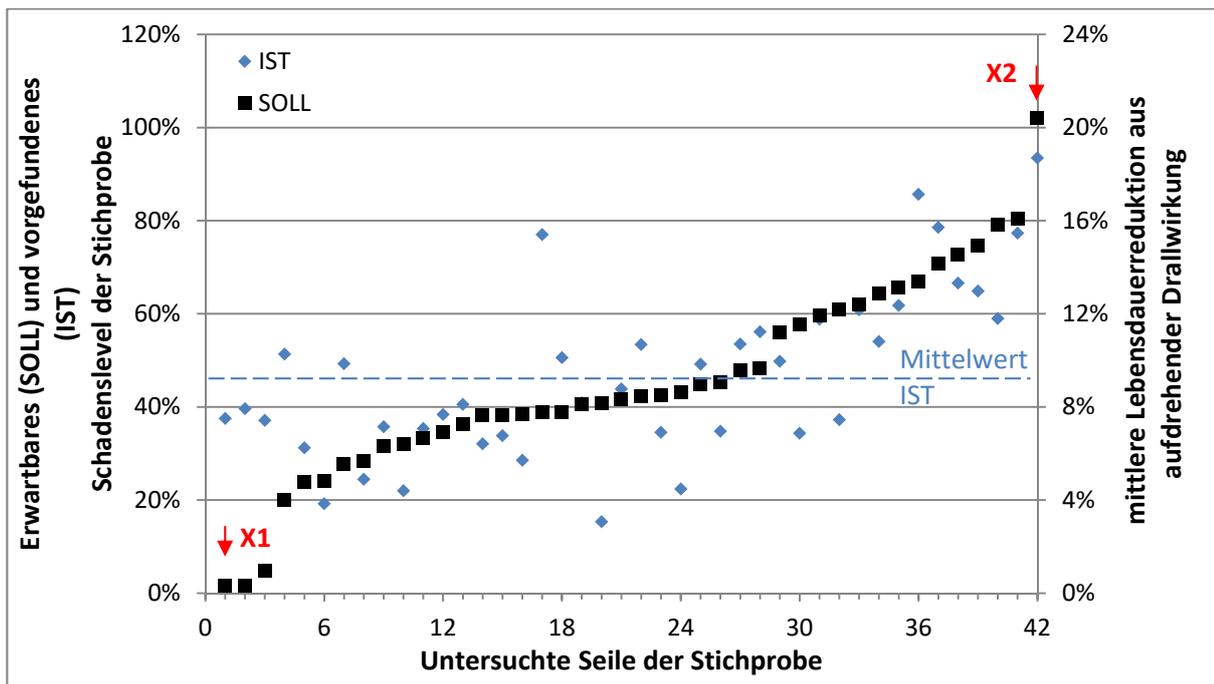


Abbildung 96: Übersicht der Streuung zwischen erwartbaren (SOLL) und vorgefundene Seilschädigung (IST) der Stichprobe mit Bezug auf die mittlere Lebensdauerreduktion aus aufdrehender Drallwirkung (rechte Achse)

Deutlich wird bei Betrachtung der Parametersätze, dass vor allem die Seilkräfte aus Höhenspannung, Seilreibung und Umfangskraft des Antriebs hohe Einflüsse erzeugen, während die Drehmomentauswirkung von Stützen je nach Seil und Antriebskonfiguration stark schwanken kann oder sogar irrelevant für Seile ohne direkte Antriebseinwirkung zu sein scheint.

Das Drehmoment von Seilreitern fällt, wenn vorhanden, aufgrund der gleichmäßig angestrebten Seildurchhänge auf der Strecke annähernd konstant aus. Da untere Zugseile aufgrund der niedrigeren Spannung und des Effekts des Aufdrehens an den Rändern vermehrt zu Drallschäden neigen, liegen hier die Bewertungsfaktoren bei direkter Antriebseinwirkung oder hohen Anlagenreibungen entsprechend hoch.

Positiv wirken Drallverursacher maßgeblich in den folgenden beiden Fällen: Eine hohe Umfangskraft am Antrieb eines oberen Zugseils scheint sich mindernd auf die Drallentwicklung des unteren Zugseils auszuwirken, hier wird mit -2 der beste helfende Vorfaktor erreicht. Während Stützen und Seilreiter bei oberen Zugseilen mit Antrieb zur Schädigung durch ihr Drehmoment beitragen, können diese zudem bei oberen Zugseilen ohne Antrieb die Drallschädigung ebenfalls mindern.

Die Güte des Modells kann mit wachsender Datenbasis weiter verschärft werden. Zudem ist es möglich, bei Kenntnis von anlagenspezifischen Seileigenschaften, insbesondere den zukünftig zu ermittelnden Charakteristiken von „weichen Seilen“ aus Nr. 11, weitere unterstützende Faktoren einzufügen, welche die Abbildungstreue weiter optimieren können.

8.4 Empfehlungen

In Anlehnung an den Schritt 4 der FMEA werden nun für Seilbahnplaner und Betreiber zusätzlich zum Berechnungsmodell Empfehlungen, Entscheidungshilfen und Optimierungsmaßnahmen auf Basis der Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Mit diesen lässt sich Drehung bzw. bleibende Verdrehung abmindern und ein Zugewinn an Seillebensdauer erzielen.

Obere Zugseile

Obere Zugseile drehen im mittleren Bereich ihrer Länge auf, sind jedoch in der Regel wenig von Drallschädigungen durch Aufdrehen betroffen. Dies liegt maßgeblich daran, dass diese Seile aufgrund der Anlagentopografie meist unter verhältnismäßig hohen Spannungen fahren. Dadurch verhält sich das Seil drehsteifer gegenüber niedrigeren Vorspannungen und wird an den Stützpunkten weniger stark abgelenkt, so dass hier nur niedrige Drehmomente aus Walkarbeit entstehen. Trotzdem können hohe Stützenknickwinkel und lange, flache Seilfelder insbesondere ohne Seilreiter den Drall begünstigen. Bei Zweiseilbahnen mit einem Tragseil ist in der Planung auf ein harmonisches Geländeprofil zu achten. Nach der Realisierung jedoch können hier kaum sinnvolle Maßnahmen durchgeführt werden. Bei Anlagen mit Doppeltragseilen hingegen können zusätzliche Seilreiter zum Abfangen von großen Durchhängen hilfreich sein.

Die Verwendung von Fullplasteinlagen oder Stützkunststoffen zwischen den Litzen können das Drehbestreben der Seile mindern, jedoch können diese Hilfsstrukturen unter extrem hohen Seildrehmomenten auch frühzeitig versagen, wie es an kurvenreichen Standseilbahnen bereits beobachtet wurde. Kompaktierte Seile können, wenn es die Anlage konstruktiv erlaubt, durch ihre höhere Steifigkeit ebenfalls eine Linderung des Dralls erzielen. Lässt sich sogar der Seildurchmesser verringern, führt dies zu einer weiteren Minderung des Drehmoments aus Walkarbeit an den Stützpunkten.

Bei Seilen, die sich im Betrieb als „weich“ erweisen, sind ergänzende Elastizitäts- und Drehmomentmessungen an vorhandenen Rückhaltemustern oder Reparaturstücken zu empfehlen, um eine breite Datenbasis aufzubauen. Sollten sich bestimmte Werte als Anzeichen für ein späteres, unzureichendes Betriebsverhalten isolieren lassen, könnten diese in zukünftige Normen von Seilbahnseilen aufgenommen werden.

Untere Zugseile

Untere Zugseile sind an ihren Rändern häufig durch nennenswerte Schlaglängenänderung betroffen. Dies liegt an der häufig vergleichsweise niedrigen Vorspannung und den damit verbunden starken Durchhängen und somit hohen Drehmomententwicklungen an Stützpunkten. Durch die verminderte Spannung ist zudem die Drehsteifigkeit des Seils verhältnismäßig schwach. Entgegenwirken lässt sich diesem Phänomen maßgeblich durch die konstruktive Ausgestaltung der Bahn, indem Durchhänge möglichst reduziert und Seilspannungen möglichst hoch gehalten werden. Insbesondere bei Anlagen mit Spanngewicht am Berg kann bei Längung des unteren Zugseils die Seilvorspannung beim Einfahren in die Station sinken, da diese Veränderung nicht vom Spanngewicht ausgeglichen werden kann, so dass große Durchhänge in den Feldern entstehen, vgl. Abbildung 97. Doch auch im Nennfahrbetrieb kann hier eine übermäßige Längung des unteren Zugseils zu erhöhten Durchhängen und somit einer Begünstigung von Seildrall führen.

Das Rillenprofil der Seilreiter und Stützenrollen kann sich zudem stark auf den Drall auswirken, insbesondere, wenn die Durchmesser vom oberen und unteren Zugseil stark

unterschiedlich sind oder im Betrieb standardisierte Rillenkanten vorrätig gehalten werden, die sich im Betrieb einfahren sollen. In beiden Fällen von zu großer oder zu kleiner Rille kann der Seildrall begünstigt werden.



Abbildung 97: Beispiel eines zu langen unteren Zugseils bei Abspannung am Berg; die großen Durchhänge bei verminderter Seilspannung können Drall begünstigen

Bei fehlender Seitenführung wandert das Seil im Futter und dreht, bei Linienförmiger Abstützung an den Seiten hingegen entstehen erhöhte Pressungen, wie sie bei Keilrillen von Aufzugsantrieben bewusst erzeugt werden, um die Normalkraft und somit die Treibfähigkeit zu erhöhen, vgl. Abbildung 98. In der Gummirolle einer Seilbahn führt dies jedoch zu erhöhter Walkarbeit und somit einem erhöhten Drehmoment am Stützpunkt. Es wird daher empfohlen, die Radien der Rillenfutter immer möglichst passend zu wählen. Flache V-Rillen können wie ein zu großer Rillenkantenradius wirken und ebenfalls ein Wandern und Drehen des Seils begünstigen.

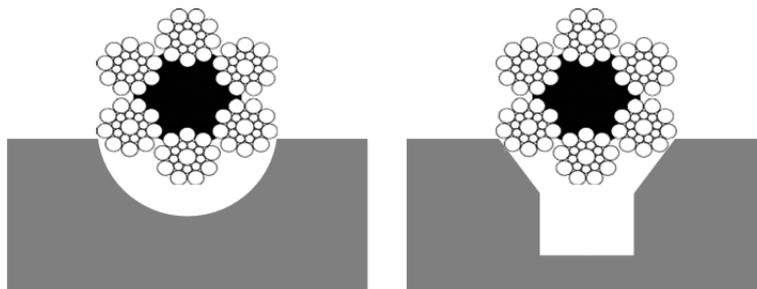


Abbildung 98: Vergleich des Linienkontakts mit erhöhter Pressung bei Rillenkanten mit Untermaß zur Keilrille einer Aufzugstreibscheibe

Durch Kunststoffe verstärkte oder kompaktierte Seile mit erhöhten Drehsteifigkeiten können wie oben beschrieben drallmindernd wirken.

Station

In den Stationen ist neben der Ausrichtung von Rollenbatterien darauf zu achten, dass die Rillenfutter von orthogonal zueinander stehenden Scheiben nicht übermäßig einlaufen. Passiert dies, baut sich schleichend ein Schrägzugwinkel auf, durch den das Seil beim Ein- und Auslaufen von der Scheibe zu drehen beginnt, vgl. Abbildung 99.

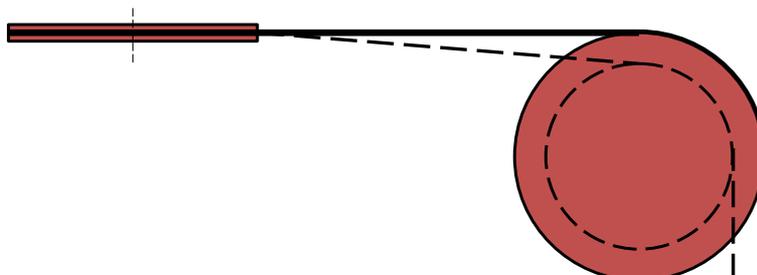


Abbildung 99: Schrägzug bei eingelaufenem Futter von orthogonal angeordneten Scheiben

Stützenbauwerke

An den Stützen von Pendelbahnen können nur bedingt Veränderungen vorgenommen werden, um eventuelle Fluchtungsfehler auszugleichen. Trotzdem macht eine Überprüfung insbesondere von Bestandsanlagen Sinn, um eventuelle Setzvorgänge des Bauwerks oder torsionale Elastizitäten des Stützenkopfes während der Überfahrt von Fahrzeugen zu identifizieren. Unter Umständen können zumindest Aussteifungsmaßnahmen vorgenommen werden, vgl. Abbildung 100.

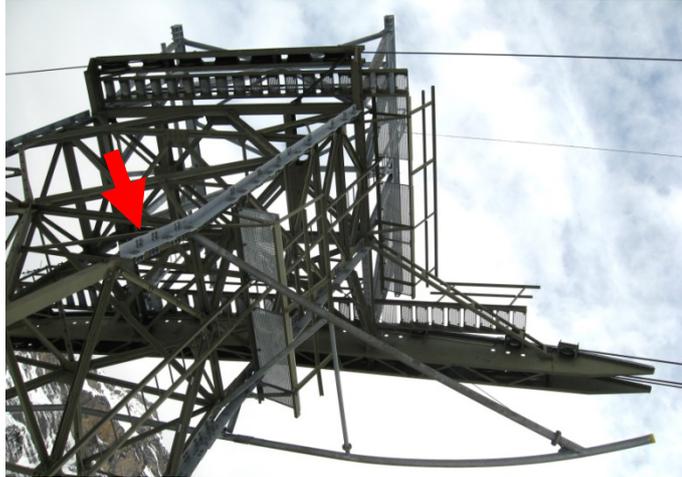


Abbildung 100: Aussteifungsmaßnahmen an einer bestehenden Stütze

Wartung

Bei der Wartung der Seile wird eine fachgerechte Nachschmierung empfohlen, um dem Seil die Rückstellung einer Verdrehung zu erleichtern. Durch regelmäßige Messung der Schlaglänge an den Rändern und in Seilmitte kann der Verdrehzustand gut überwacht werden. Zu beachten ist dabei, dass die aktuelle Normvorgabe der prEN12927 vor Abschluss der vorliegenden Untersuchung auf Basis von Praxiserfahrungen von Seilherstellern festgelegt wurde (Norm prEN 12927). Diese sieht eine maximale Schlaglängenänderung von $\pm 15\%$ gegenüber der Nennschlaglänge bis zur Ergreifung von Wartungsmaßnahmen vor. Nach dem nun neu vorliegenden Erkenntnisstand ist dies nicht ideal gewählt. Eine Verlängerung der Schlaglänge auf $+15\%$ entspricht einem Verdrehwinkel ω von $-320^\circ/100d$. In dieser Größenordnung liegt im Experiment bereits ein Lebensdauerverlust im Bereich von 15% vor. Das Kriterium ist in dieser Richtung als sinnvoll anzusehen. Die Grenze von -15% entspricht jedoch einem Verdrehwinkel ω von $+430^\circ/100d$. In diesem Bereich ist keine nennenswerte Lebensdauereinbuße der Seile im Biegeversuch feststellbar. Es steht zu überlegen, diese Grenze fallen zu lassen oder sinnvoll in die Nähe des Kipp-Punktes der Lebensdauerkurve zu rücken respektive zu erhöhen. Bei $+720^\circ/100d$ würde die Verkürzung -23% betragen. Der Einfachheit halber könnten somit in zukünftigen Überarbeitungen -20% als Grenzwert vorgesehen werden.

Regelmäßiges, fachgerechtes Kürzen der Seile kann Dralleffekte durch abfallende Vorspannung und große Durchhänge mindern. Beim Lösen von den Vergussköpfen an den Laufwerken sollte der Drallstau vor allem bei oberen Zugseilen nicht herausgedreht werden, da somit mehr und mehr Schlaglängen aus dem Seil herausgenommen werden. Bei unteren Zugseilen würde die Schlaglänge im Mittel gekürzt, was grundsätzlich einen positiven Effekt erzielen könnte. Jedoch ist dies in der Praxis bisher nicht systematisch erprobt worden.

Bei Pendelbahnen ohne Fangbremse mit geschlossener Seilschleife ist beim Lösen der Fahrzeugklemme prinzipiell gegen ein Auslassen des Dralls nichts einzuwenden, da die Seilschleife in Summe davon unberührt bleibt. Hier müssen also keine knebelnden Elemente verwendet werden, jedoch sollte darauf geachtet werden, dass das schnell drehende Seil keine Riefen durch Reibkontakt zur Klemme aufbaut.

9 Übertragungspotential

9.1 Übertragung auf Leerseile von Einseilumlaufbahnen

Technisch bedingt gelten bei Umlaufbahnen andere Anforderungen und Drehungsprobleme als bei Pendelbahnen. Da die Fahrzeuge einer Umlaufbahn in regelmäßigen Abständen auf das Seil geklemmt werden, kann sich hier im Betrieb keine derart bleibende Verdrehung ausbilden, wie sie bei Pendelbahn-Zugseilen beobachtet werden konnte. Die Gehängearme zwischen Klemme und Kabine wirken als Drallsperre, im Seilbahnbereich oft auch „Knebel“ genannt.

Verdrehung kann nur während vier Prozessen in das Seil eingebracht werden, die im Folgenden diskutiert werden.

Montage- und Wartungsarbeiten

Bei Montage und Wartungsarbeiten, wie sie zum Seilzug beim Aufbau der Anlage oder Austausch eines abgereiften Seils bzw. beim Abspannen und Nachspießen durchgeführt werden, werden die freien Seilenden im Gelände gehandhabt und sind somit der Gefahr des unkontrollierten Verdrehens ausgesetzt. Neben der Drallinitiation durch Reibung an einfachen Leitrollen oder Schutzhölzern (vgl. Abbildung 101) bewirkt die Höhenspannung beim Seilzug im Gelände ein steigendes Drehmoment im Seil. Zur Unterbindung dieser Effekte werden meist Knebel und Drallstützen eingesetzt, wie in Abbildung 19, Seite 17, beispielhaft zu sehen ist. Obwohl in den einschlägigen Regelwerken auf die Gefahr des Verdrehens hingewiesen wird, vgl. z.B. (Norm DIN EN 12927-5), berichten Monteure und Betreiber regelmäßig von unterlassener Verdrehsicherung³² oder bewusstem Ausdrehenlassen eines Vergusskegels bei Wartungsarbeiten am Laufwerk einer Pendelbahn zur Erleichterung der Arbeitsbedingungen³³.



Abbildung 101: Kantholz als Anlaufschutz beim Einziehen eines Seils (Quelle: zurbrügg.ch)

Fehler bei Montage- und Wartungsarbeiten können zwar nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden, stellen jedoch keinen üblichen betrieblichen Zustand eines Seilbahnseils dar. Bei Einhaltung der Empfehlungen aus geltenden Regelwerken und Hersteller-Montageanweisungen kann hier Verdrehung weitestgehend ausgeschlossen werden und wird daher in dieser Abhandlung nicht weiter berücksichtigt. Es wird jedoch sowohl

³² Messgespräch mit Seilbahnbauern auf der InterAlpin 2013 bezüglich der Montagebedingungen zur Winterolympiade 2014 in Sotchi, Russland.

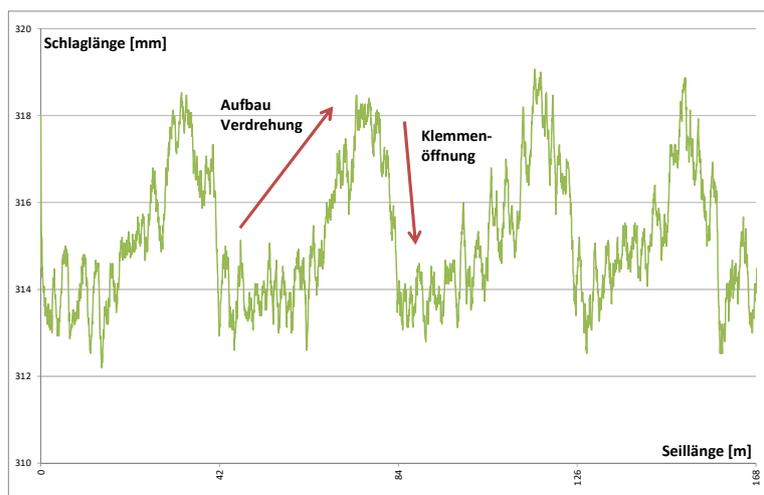
³³ Gespräch mit der technischen Leitung eines Schweizer Seilbahnbetreibers im Berner Oberland, April 2010.

Betreibern als auch Herstellern bei der Auftragsvergabe an Fremdfirmen empfohlen, die fachgerechte, drallfreie Montage bei Neubauten oder Seilwechseln zu überprüfen.

Spurfehler im Bereich der Station und den vorgelagerten Stützen

Nach (Oplatka 2004) sind Spurfehler im Stationsbereich und den vorgelagerten Stützen ein wichtiger Einflussfaktor bei Verdrehungserscheinungen in kuppelbaren Umlaufbahnen. Im Stationsbereich entsteht durch das Abkuppeln der Fahrzeuge über den Umlaufbogen eine verhältnismäßig lange freie Seilstrecke, die durch Schrägzug zwischen Seil und Rollen- oder Scheibeneinlagen stetig Drehung aufbauen kann. Diese wird nun zwischen den wiedereinkuppelnden Fahrzeugen als Verdrehung gespeichert. Abbildung 102 zeigt die Schlaglängenmessung einer kuppelbaren Einseilumlaufbahn mit eingehängten Fahrzeugen, deren Trend deutlich eine periodische Schlaglängenänderung im Abstand der Fahrzeugintervalle zeigt. Dazu sind anhand von drei Fotos Beispiele von Spurfehlern aus Begutachtungsprojekten des IFT gezeigt: eine nicht ideal fluchtende Rolleneinlage mit starkem Verschleißbild am unteren Rand, eine hängende Rolle als Verursacher von Schrägzug innerhalb einer horizontalen Batterie sowie ein zum Zentrum der Führungsrolle seitlich versetzt laufendes Seil.

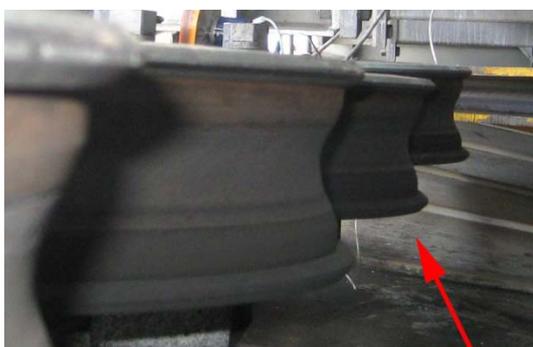
Obwohl sie zu den wichtigsten Kriterien bei der Drallbeurteilung von Umlaufbahnen gehören, sollen Spurfehler im Stationsbereich folgend hier nicht weiter behandelt werden, da diese klar identifizierbar und deren Auswirkungen durch gewissenhaftes Einstellen der Seilbahnanlage eliminiert werden können. Dies wird durch zahlreiche positive Rückmeldungen der Bahnbetreiber auf die Empfehlungen der Untersuchungsberichte des IFT zweifelsfrei bewiesen.



Schlaglängenverlauf in der Station bei mangelhafter Spurführung



Beispiel des Spurbildes in einer nicht fluchtenden Rolleneinlage



„Hängende“ Rolle einer horizontalen Rollenbatterie

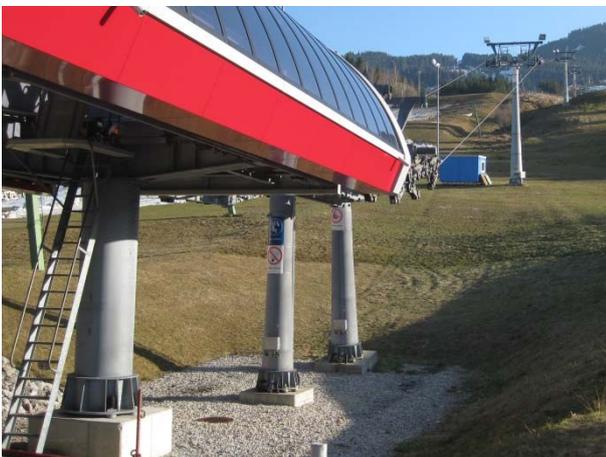


Seitlich versetzt laufendes Seil in der Station einer kuppelbaren Einseilumlaufbahn

Abbildung 102: Schlaglängenmessung und Beispielbilder bei Spurfehlern in der Station

In Bezug auf die vorgelagerten Stützen von Berg- und Talstationen werden nachfolgend unterschiedliche Konfigurationen vorgestellt, die einen mehr oder minder starken Einfluss auf den initiierten Drall in einer kuppelbaren Seilbahnanlage haben können.

So ist es von entscheidender Bedeutung, ob in der Berg- oder Talstation die vorgelagerte Ablenkstütze auf einem separaten Fundament oder auf der Stationsplatte mit verankert wird, wie Betriebserfahrungen mit unterschiedlichen Stationskonfigurationen zeigen. Bei separaten Fundamenten kann durch unterschiedliche Setzvorgänge die Stütze geringfügig verkippen, so dass sich schleichend ein Spurfehler aufbaut, der den jeweils durch Kuppelvorgänge betroffenen Seilabschnitt zur Verdrehung animieren kann. Je kürzer der Abstand zwischen Station und Stütze, desto stärker wirkt sich eine Setzung auf den Spurfehler aus. Wird diese Situation nun noch mit der Drallwirkung des Antriebs überlagert, entsteht die ungünstigste Situation aus Sicht des Dralls. Abbildung 103 zeigt Beispiele unterschiedlicher Stationskonfigurationen, die abschließende Tabelle 44 fasst die Konfigurationen und ihr Risiko zur Drallneigung qualitativ zusammen.



Talstation mit separaten Stützenfundamenten



Talstation einer 3S-Bahn mit integrierter Stütze
(Quelle: birswilly.ch)



Bergstation mit kurzem Stützenabstand



Bergstation mit langem Stützenabstand

Abbildung 103: Beispiele unterschiedlicher Stationskonfigurationen

Konfiguration	Antriebsstation	Umkehrstation
Ablenkstütze auf Stationsfundament	gering bis mäßig	gering
Ablenkstütze auf separatem Fundament, langer Abstand	mäßig	gering bis mäßig
Ablenkstütze auf separatem Fundament, kurzer Abstand	hoch	mäßig bis hoch

Tabelle 44: Qualitatives Risiko zur Drallneigung einer Umlaufbahnstation

Beschickung der Strecke mit Fahrzeugen bei anfänglich leerem Seil

Beim Beschicken des anfänglich leeren Seils bildet sich eine stetig steigende Seilspannung durch das kontinuierliche Einkuppeln von Fahrzeugen aus. Die dadurch entstehende Verdrehung wird durch die knebelnde Wirkung der Fahrzeugklemmen im Seil gespeichert.

Zur rechnerischen Abschätzung der Drehungseinflüsse beim Beschicken muss unter anderem das Stammdatenblatt für Pendelbahnen angepasst werden, damit die periodische Lasterhöhung durch das Einbringen von Fahrzeugen in den Formeln zur näherungsweise Bestimmung der Seilkräfte berücksichtigt wird.

Mechanische Einrichtungen		
Merkmal	Wert	Kommentar / Aktion z.B. von Excel
Fahrzeugtyp		<ul style="list-style-type: none"> Kabine oder Sessel, ggf. mit Haube
Fahrzeug Fassungsvermögen [Pers.]		<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung der Leergewichtskraft eines Fahrzeugs
Fahrzeugabstand [m]		<ul style="list-style-type: none"> Berechnung spezifisches Ersatz-Seilgewicht
Sicherheitsfaktor	4,0	<ul style="list-style-type: none"> Fest, aber beim Beschicken deutlich höher, da eine Fahrbahn unbelastet ist und die Kabinen leer sind
Lage von Antrieb- und Spannstation		<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung der korrekten Näherungsgleichungen für Seilkräfte
Nutzungsgrad η [-]		<ul style="list-style-type: none"> Siehe Sicherheitsfaktor
Reibbeiwert μ der Antriebsscheibe [-]		<ul style="list-style-type: none"> Verwendung von Gummi-Werkstoffen anstatt Becorit, der Default Wert von 0,3 bleibt jedoch unbeeinflusst
Umschlingungswinkel α am Antrieb [°]		<ul style="list-style-type: none"> Nur 180 oder 360°, Berechnung $e^{\mu\alpha}$

Tabelle 45: Ergänzung des Stammdatenblatts für die Untersuchung der Beschickung einer Umlaufbahn

Vereinfacht können jedoch zur statischen Betrachtung des resultierenden Verdrehzustands die Seilspannungen bei leerem Seil und beschicktem Seil (unter der wirkenden Antriebs- und oder Höhenspannung der Gegenstation) ermittelt werden, um mit Hilfe des Seilelastizitätsmoduls aus der Schlaglänge bei diesen Spannungen die Drehwinkeldifferenz zu berechnen.

Auf kurzer Strecke von etwa einem Gehängeabstand wird diese Drehwinkeldifferenz zwischen Leerseil und beschicktem Seil nun zwischen dem ersten und dem letzten Fahrzeug erst wieder beim Passieren der Kuppelstelle in der Gegenstation gelöst. Hier ist die freie Seillänge über den Umlaufbogen der Station größer als der Fahrzeugabstand im Feld, so dass sich der Drallstau beim Öffnen einer Klemme auf eine geringfügig längere Strecke verteilen kann. Dieser Effekt kann für Fahrgäste hörbar sein und insbesondere bei Nennbetrieb der Anlage Verschleiß an den Klemmenmäulern bzw. der Seiloberfläche verursachen. Mit jedem Umlauf der Bahn wird die lokale Verdrehwinkel-Differenz im Stationsbereich schrittweise durch das beschriebene Lösen von Fahrzeugklemmen

gemindert, man spricht hier vom sogenannten „drallfrei fahren“³⁴. Das Drallfrei-Fahren stellt zum heutigen Stand der Technik die einzige Möglichkeit dar, die Verdrehung aus der Beschickung abzubauen.

Die Situation ließe sich zum Beispiel optimieren, indem das Seil nur während des Beschickungsvorgangs bewusst entgegengesetzt, also mit der Schlagrichtung zuge dreht wird. Dies kann insbesondere für sehr lange oder steile Anlagen mit entsprechender Höhenspannung relevant werden. Technisch lösbar wäre dies z.B. durch eine beim Beschicken schräg zum Seil angestellte Leitrolle vor der Kuppelstelle, deren Einstellung jedoch empirisch vorgenommen und in Verantwortung des Betreibers regelmäßig justiert werden müsste. Zusätzlich wäre eine Überwachung der Rollenposition seitens der Steuerung notwendig, um sicherzustellen, dass diese nur während der Beschickung aktiv ist. Bis zu einem Praxistest oder gar einer standardisierten Lösung ist dies jedoch mit nennenswerten Kosten verbunden.

Umfahrt mit dem leeren Seil

Drehungen bei Umfahrten mit dem leeren Seil sind aus betrieblicher Sicht weniger für die Seillebensdauer relevant, als für das Verschleißverhalten einzelner mechanischer Komponenten. Die Fahrzeuge halten wie bereits beschreiben als Knebel das Seil auf der Strecke vom Drehen ab, jedoch müssen die Stützelemente der Strecke eventuelle zusätzliche Querkräfte oder Gleitvorgänge ertragen.

Der erwartbare Kraft- und Drehmomentverlauf eines Leerseils lässt sich nach der Methode des Stammdatenblatts aus §5.5 für Pendelbahnen auf gleiche Art für Umlaufbahnen analysieren und berechnen. Die gewonnenen Zusammenhänge der Drehungsuntersuchung von Zugseilen können somit auf Umlaufbahnen als Beispiel für andere Seiltriebe übertragen werden. Zur Überprüfung wurden Förderseile verschiedener moderner Umlaufbahnen bei leerer Strecke mit dem Drehsensor gemessen.

Die Kurvenverläufe der gemessenen Drehung entsprechen bei gut gespurter Strecke den theoretischen Drehmoment-Kennwerten, vgl. Abbildung 104. Hier ist ein kontinuierliches Drehverhalten in Abhängigkeit der Geländesteigung und des daraus resultierenden Stützendrucks sichtbar.

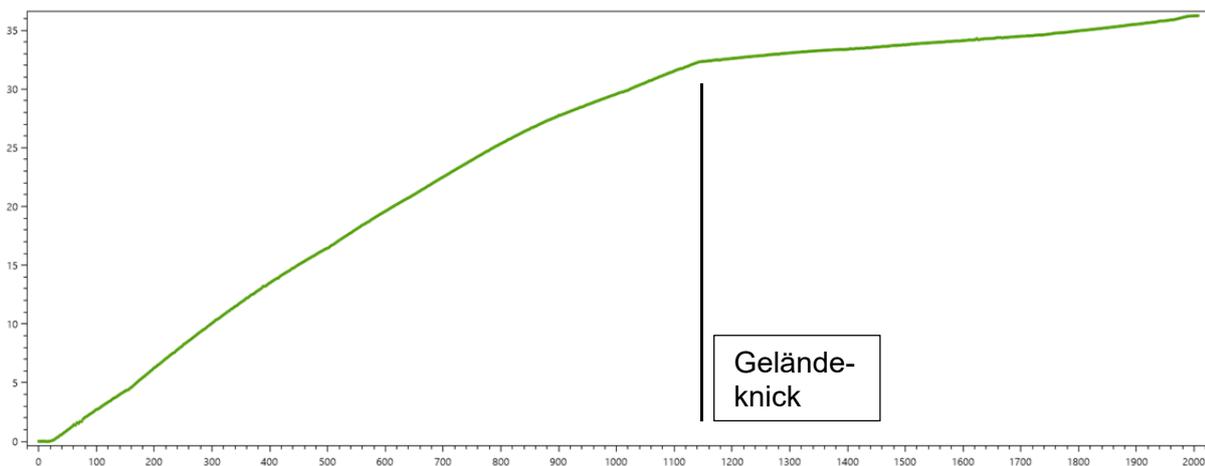


Abbildung 104: Messung des leeren Seils einer Umlaufbahn mit 16 Stützen auf der Bergfahrseite mit einem markanten Geländeknick bei hervorragender Spur (x-Achse: Länge in [m], y-Achse: Umdrehungen [-])

Lokale Auffälligkeiten in den Kurvenverläufen können auf Unzulänglichkeiten im mechanischen IST-Zustand der Anlage hindeuten, wie das folgende Beispiel zeigt. In Abbildung 105 ist die Drehsensor-Messung einer Umlaufbahn mit einer unsachgemäß

³⁴ Expertengespräch mit Seilbahnbetreibern und einem Hersteller anlässlich einer Seilbahnuntersuchung in Österreich, Februar 2012.

gespurten Stütze dargestellt. Der Knick ins Negative im Bereich einer Stütze entgegen dem Geländeprofil und der allgemeinen Tendenz der Fahrbahn deutet auf einen lokalen Spurfehler hin. Wie im vorliegenden Fall auch geschehen, muss die genaue Ursache im Anschluss der Messung z.B. durch eine Stützenbegehung ermittelt werden. Daraufhin lassen sich Wartungs- oder Sanierungsmaßnahmen durchführen. Ursachen für lokal auffällige Drallerscheinungen auf der Strecke können somit durch eine mangelhafte Spurführung an einzelnen Stützen oder einen erhöhten Rollendruck an einzelnen Batterien hervorgerufen werden.

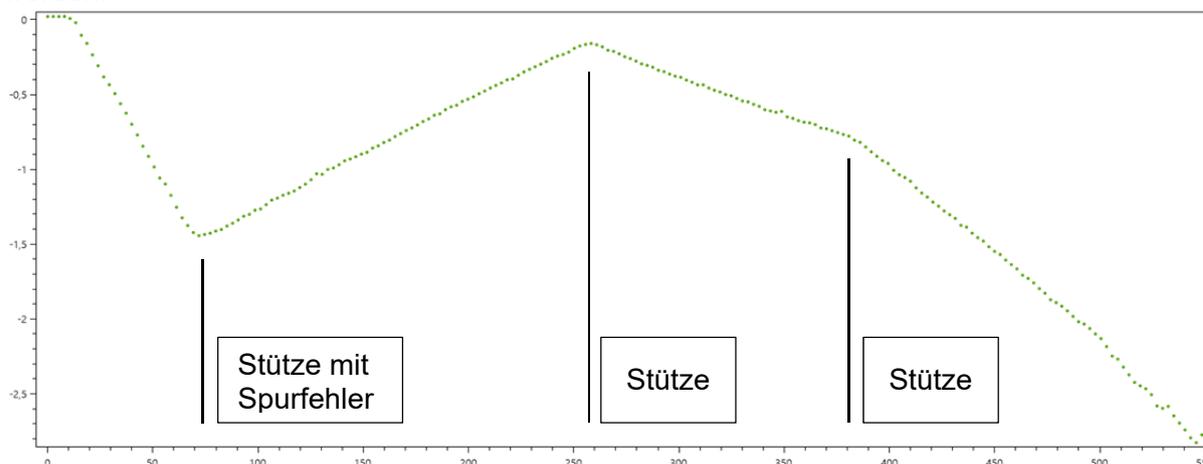


Abbildung 105: Drehungsmessung des leeren Seils einer Umlaufbahn mit einer mangelhaft gespurten Stütze

Aus den hier durchgeführten Messungen und Erfahrungswerten von Betreibern und Sachverständigen lassen sich folgende Grundsätze festhalten. Der Seildrall einer Umlaufbahn hält sich im Bereich eines physikalisch unvermeidbaren Minimums, wenn:

- die Rillenradien von Seilrollen und Scheiben möglichst gut zum Seildurchmesser passen. Flache V-Rillen oder zu große Radien führen zu einer geringen Seitenführung des Seils und zu Linienberührung bei hoher Pressung, enge Rillen mit Untermaß aus dem Baukasten führen zu erhöhten Pressungen und somit Drall (vgl. Sitzrille mit Unterschnitt bei Aufzügen)
- die Anlage gut gespurrt ist, insbesondere im Stationsbereich
- die Seilspannung möglichst hoch ist, vor allem beim Beschicken oder im Konvoi-Betrieb.

Letztere Anforderung ließe sich mit einer intelligenten Seilspannvorrichtung lösen: da beim Beschicken der Strecke oder im Konvoibetrieb mit wenigen Fahrzeugen die maximal erlaubte Seilspannung des Systems nicht erreicht wird, ist es möglich, die Anlage bei geringer Belastung hydraulisch zu überspannen und mit dem Einschleichen der Fahrzeuge kontinuierlich auf Nennniveau zu reduzieren. Damit würden die Seildurchhänge und somit Normalkräfte an den Stützen niedrig gehalten, während das Seil gleichzeitig steifer gegen äußere einwirkende Drehmomente wird. Störende Dralleffekte beim Beschicken ließen sich somit reduzieren. Die Methode muss jedoch bei der Auslegung der Bahn rechnerisch berücksichtigt werden. Zudem müsste das Einhalten der maximal erlaubten Seilspannung voraussichtlich sicher überwacht werden.

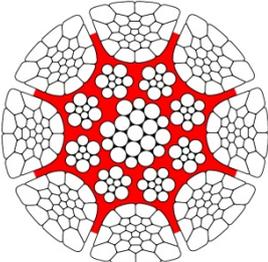
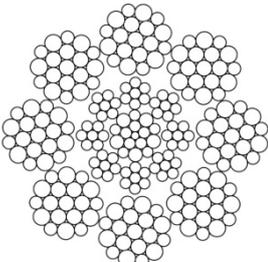
9.2 Hinweise zur Übertragung auf allgemeine Seiltriebe

Die Übertragung der Drehungs- und Schadensmodelle auf andere Seiltriebe ist rein technisch gesehen durchführbar, jedoch liegen für die breite Seilanwendung in Hebezeugen und Seiltrieben keine derart systematisch detaillierten Daten vor, wie es nun für Seilbahnen der Fall ist. Über die vielfältigen, teils herstellerspezifischen Seilkonstruktionen, die zum Teil erheblich von den Seilklassen der DIN EN 12385-4 (Norm DIN EN 12385-4) abweichen können, ist meist nur wenig veröffentlicht. Insbesondere die benötigten Drehmomentkennwerte von Spezialseilen müssten oft aufwändig ermittelt werden, die

erwartbare Lebensdauer kann zum Teil nur durch Ähnlichkeitsbetrachtung abgeschätzt werden oder es müssen aufwändige Dauerbiegeversuche durchgeführt werden. Zudem werden Hebezeuge und sogar Personenaufzüge bei entsprechend höherem Sicherheitsfaktor nicht derart intensiv geprüft, so dass vergleichbar weniger Seilprüfergebnisse und Dokumentationen über die Drahtbruchverteilung, Seillebensdauer und Betriebsverhalten herangezogen werden können. Zudem ist das Messprinzip des hier bei Seilbahnen eingesetzten Drehsensors nicht zur Untersuchung senkrecht laufender Seile geeignet, da hier keine Drehung gegenüber der Erdanziehung stattfindet. Folgend werden daher Überlegungen, Hinweise und zugängliche Veröffentlichungen aufgeführt, die bei der Übertragung des Drehungsmodells auf beliebige Seiltriebe berücksichtigt und weiterentwickelt werden können.

Eigenschaften von Seilkonstruktionen in Aufzügen und Hebezeugen

In Hebezeugen werden vornehmlich drallarme Seilkonstruktionen eingesetzt, die unter Last zwar wenig Drehmoment aufbauen, jedoch zum Teil empfindlich auf äußere, gewaltsame Verdrehung reagieren können, wenn der ursprünglich drehsteife Seilverband innerlich verschoben wird. Besonders gegenläufig geschlagene Litzenlagen in drehungsarmen Seilen werden durch Verdrehung lagenweise unterschiedlich belastet, zum Teil vollständig entlastet, so dass nur noch ein Teil des Seilquerschnitts Spannung führt und somit der Sicherheitsfaktor der Seilanwendung bis zum Versagen gemindert werden kann (Verreet 1996). Zudem zielen einige Seilanwendungen gar nicht auf die maximal erreichbare Lebensdauer in Form von Biegewechseln über Scheiben hin, stattdessen wird die Ablegereife durch mechanischen Abrieb, Verformung oder Korrosion bestimmt (Weiskopf 2008). Insbesondere bei mobilem Einsatz von Hebezeugen, manueller Handhabung und Montage des Seil- oder Flaschenzugs und bei mehrlagiger Trommelwicklung ist dies zu beachten. Die Seilhersteller haben sich zum Teil in speziellen Branchen etabliert und bieten hier Sonderkonstruktionen an. Die nachfolgende Übersicht in Tabelle 46 zeigt typische Seilkonstruktionen und bewertet ihren Einsatz in Bezug auf die erwartbare Seillebensdauer sowie Eignung und Wirtschaftlichkeit hinsichtlich von Dralluntersuchungen.

<p>Gehämmerte Litzenseile</p> <p>Diese werden vornehmlich bei mehrlagiger Wicklung auf Seiltrommeln eingesetzt. Die mittlere Lebensdauer hinsichtlich Biegewechseln über Scheiben ist vergleichsweise niedrig, das Seil erreicht seine Ablegereife durch äußere mechanische Beanspruchung. Seildrall ist zu erwarten, trägt hier jedoch nur untergeordnet zur Schädigung bei. Zudem liegen kaum Literaturkennwerte vor. Eine methodische Untersuchung wird somit zum aktuellen Zeitpunkt als nicht weiter relevant eingestuft.</p>	 <p>(Quelle: casar.de)</p>
<p>Konventionelle Rundlitzenseile mit Stahleinlage</p> <p>Diese kommen bei Aufzügen und Hebezeugen zum Einsatz. Seildrall ist zu erwarten, für einfache Hebezeuge ist das Drallverhalten jedoch weitestgehend vernachlässigbar, da hier meist vergleichsweise nur wenige Zyklen pro Zeiteinheit gefahren werden und üblicherweise ein Seilwechsel bei relativ geringen Kosten erfolgen kann. Bei Schachtförderanlagen und Aufzügen, insbesondere im „high-rise“-Segment, wirkt sich der Seildrall auf die Elastizität und Spannung der parallel laufenden Tragseile aus. Dies kann von großer Bedeutung sein, wie aktuelle Schadensgutachten sowie Industrieaufträge für E-Modul und Drehmomentmessungen am IFT belegen. Zudem werden in Einzelfällen Aufzugseile oder Förderseile im Bergbau magnetinduktiv geprüft, so dass eine hochwertige Dokumentation der Schadensentwicklung vorliegt und die Schlaglänge ermittelt werden kann. Die methodische Untersuchung an üblichen Konstruktionen kann für die Branche von großem Nutzen sein.</p>	 <p>(Quelle: drako.de)</p>

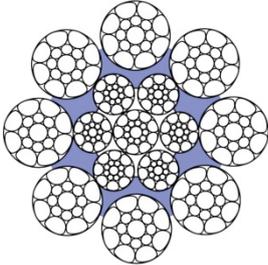
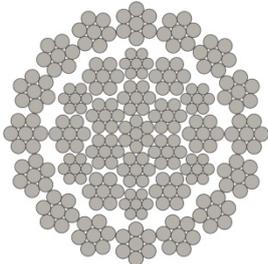
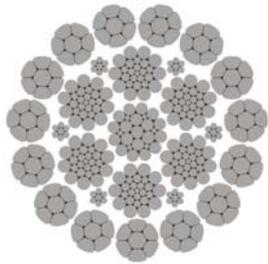
<p>Spezielle Rundlitzenseile mit Stahleinlage (z.B. mit kompaktierten Litzen und/oder Kunststoffzwischenlage)</p> <p>Diese kommen u.a. häufig bei hochwertigen Hebezeugen und Förderanlagen zum Einsatz, die eine stabile Spurführung gewährleisten können. Kompaktierte Litzen erhöhen den tragenden Seilquerschnitt und können zu verbesserten Pressungsverhältnissen bei Querkräften führen. Die Kunststoffzwischenlage baut unter anderem Spannungsspitzen im Seilinnern ab und sorgt für eine vergleichsweise geringere betriebliche Dehnung. Seildrall ist zu erwarten, es liegt jedoch eine Fülle an Spezialseilen vor, so dass Dralluntersuchungen nur in Einzelfällen sinnvoll durchgeführt werden können. Die Kosten müssen sich hier durch Anforderungen an die Verfügbarkeit und Grad der Wertschöpfung der Anlage rechtfertigen. Allgemeingültige Ergebnisse sind durch derartige Untersuchungen nicht zu erwarten.</p>	 <p>(Quelle: drako.de)</p>
<p>Konventionelle drehungsarme Rundlitzenseile</p> <p>Diese kommen vornehmlich bei Hebezeugen zum Einsatz. Es liegen in den technischen Regelwerken klare Grenzwerte aus empirischen Daten vor, um Drall durch Schrägzug gering zu halten. Seildrall ist somit kaum zu erwarten, kann jedoch bei konstruktiven Grenzfällen bzw. Ausführungs- und Anwendungsfehlern auftreten. In Einzelfällen könnten Schadensursachen durch Drall ermittelt werden. Die methodische Untersuchung an üblichen Konstruktionen kann zur Überprüfung und eventuellen Detaillierung der etablierten Norm-Kennwerte genutzt werden und für die Branche von Nutzen sein.</p>	 <p>(Quelle: wdi.de)</p>
<p>Spezielle drehungsarme Rundlitzenseile (z.B. mit kompaktierten Litzen und/oder Kunststoffzwischenlage)</p> <p>Diese kommen u.a. häufig bei hochwertigen Hebezeugen und Förderanlagen zum Einsatz. Kompaktierte Litzen erhöhen den tragenden Seilquerschnitt und können zu verbesserten Pressungsverhältnissen bei Querkräften führen. Die Kunststoffzwischenlage baut unter anderem Spannungsspitzen im Seilinnern ab und sorgt für eine vergleichsweise geringere betriebliche Dehnung. Auch hier liegen dieselben Grenzwerte vor, um Drall durch Schrägzug gering zu halten. Seildrall ist somit kaum zu erwarten, kann jedoch bei konstruktiven Grenzfällen bzw. Ausführungs- und Anwendungsfehlern auftreten. In Einzelfällen könnten Schadensursachen durch Drall ermittelt werden. Allgemeingültige Ergebnisse sind durch derartige Untersuchungen nicht zu erwarten.</p>	 <p>(Quelle: diepa.de)</p>

Tabelle 46: Beispiele für Seilkonstruktionen in allgemeinen Seiltrieben und Hebezeugen

Für eine Übertragung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auf allgemeine Seiltriebe eignen sich somit vornehmlich die Seilkonstruktionen der einfachen Rundlitzenseile mit Stahleinlage sowie einfache drehungsarme Rundlitzenseile.

Eigenschaften und Eignung von Seiltrieben zur Entwicklung einer Datenbasis

Bestimmte Applikationen eignen sich besonders für erste Schritte der Übertragung, da bei wenigen Anwendungsfällen vertiefende Inspektionsdaten und Prüfanforderungen vorliegen können und eine Modellbildung zumindest in Ansätzen ermöglichen wird. Dazu gehören unter anderem:

- Personenaufzüge im sogenannten „high-rise“-Segment
- Schachtförderanlagen und andere Seiltriebe im Bergbau, Tagebau und Untertage
- „heavy-duty“-Krane, insbesondere der Offshore-Industrie

- Kranlagen mit erhöhten Sicherheitsansprüchen im Bereich von Kraftwerken oder der Luft- und Raumfahrtindustrie
- Selten: Regalbediengeräte in Distributionszentren mit höchsten Anforderungen an die Verfügbarkeit

Die genannten Systeme weisen unterschiedlichste Antriebs- und Anlagenkonfigurationen vor. Die nachfolgende Übersicht zeigt typische Ausführungen von Komponenten und bewertet ihren Einsatz in Bezug auf die Eignung und Wirtschaftlichkeit hinsichtlich von Dralluntersuchungen.

Antriebe
<p>Reibschlüssige Antriebe (Koepescheibe) der allgemeinen Seiltriebe ähneln denjenigen von Seilbahnen und finden vor allem bei Schachtförderanlagen und Aufzügen Anwendung. Die übertragbaren Seilkräfte unterliegen der Euler-Eytelwein'schen Gleichung und können bei Berücksichtigung der spezifischen Seil-Sicherheitsfaktoren und (dynamischen) Betriebskoeffizienten ähnlich der Methodik für Seilbahnen theoretisch ermittelt werden. Zur Dralluntersuchung lassen sich daraus die resultierenden Schlaglängen und Drehwinkel-Differenzen abschätzen.</p>
<p>Trommelantriebe können ein- oder mehrlagig ausgeführt sein. Das Drallverhalten ist nur in Ansätzen bekannt und wird nur fallweise in Schadensfällen genauer untersucht. Durch die Gestaltung und Fahrkonzepte von Wickelhilfen und Trommelflanken sowie die konstruktive Gestaltung der Seiloberfläche kann das Drehverhalten beeinflusst werden. Die methodische Untersuchung dieser Zusammenhänge kann für die Branche von großem Nutzen sein, die Definition aussagekräftiger Beispielkonfigurationen ist jedoch angesichts der Variantenvielfalt nicht trivial.</p>
Anlagenkonfigurationen
<p>Konstruktiv notwendiger Schrägzug zwischen Scheiben ist in vielen Seiltrieben, zum Beispiel in der Einscherung von Flaschenzügen, vorhanden und verursacht zwangsläufig eine gewisse Seildrehung. Konstruktiv wird durch die Wahl der Seilschlagrichtung in Abhängigkeit der Einscherung ein Zudrehen des Seils bevorzugt, die quantitative Ausprägung ist jedoch nach aktuellem Stand der Literatur nur in Ansätzen bekannt. Die methodische Untersuchung kann für die Branche von Nutzen sein.</p>
<p>Gegensinnige Biegung zwischen Scheiben ist in vielen Seiltrieben vorhanden und verursacht zwangsläufig eine gewisse Seildrehung. Die quantitative Ausprägung ist jedoch nach aktuellem Stand der Literatur nicht bekannt. Die methodische Untersuchung kann für die Branche von Nutzen sein.</p>
<p>Die Beladung des Lastaufnahmemittels erfolgt je nach Seilförderanlage an unterschiedlichsten Zeitpunkten und Orten während eines Fahrspiels. Die Seilkräfte können ähnlich der Methodik für Seilbahnen theoretisch ermittelt werden. Zur Dralluntersuchung lassen sich daraus die resultierenden Schlaglängen und Drehwinkel-Differenzen abschätzen.</p>
<p>Höhenspannung aus Seileigengewicht und Beladung der Lastaufnahmemittel ist in vielen Seiltrieben vorhanden und verursacht zwangsläufig eine gewisse Seildrehung. Die Seilkräfte können ähnlich der Methodik für Seilbahnen theoretisch ermittelt werden. Zur Dralluntersuchung lassen sich daraus die resultierenden Schlaglängen und Drehwinkel-Differenzen abschätzen.</p>

Bezüglich der konstruktiven Einflüsse von allgemeinen Seiltrieben auf die Seildrehung lässt sich eine Vielzahl von Komponenten durch die entwickelten Beziehungen dieser Abhandlung abdecken und rechnerisch abschätzen. Im Bereich der Trommelantriebe und bei konstruktivem Schrägzug sind jedoch weitere Untersuchungen und experimentelle Begleitung notwendig.

Literaturbasis zur Weiterentwicklung

In der Literatur stehen über die Seilbahnanwendung hinaus für allgemeine Seiltriebe bereits Ergebnisse von Untersuchungen zur Verfügung, von denen im Folgenden in Tabelle 47 eine Auswahl thematisch gegliedert aufgelistet wird³⁵. Diese Aufstellung kann für zukünftige Untersuchungen erneut herangezogen werden.

<p>Drehmoment-Kennwerte von Seilen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Feyrer, Klaus (Feyrer 2000): Drahtseile. Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Wien: Springer-Verlag. • Gegebenenfalls können vom Seilhersteller Daten für spezielle Seilkonstruktionen zur Verfügung gestellt werden
<p>Drehverhalten und Seillebensdauer bei Schrägzug</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schönherr, Silke (Schönherr 2005): Einfluss der seitlichen Seilablenkung auf die Lebensdauer von Drahtseilen beim Lauf über Scheiben. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT). • Steinbach, Gerhard (Steinbach 2007): Die Drehwirkung in Seiltrieben und das Verhalten der Drahtseilkonstruktionen. Technische Überwachung. Band 48.
<p>Seillebensdauer unverdreht und verdreht</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ernst, Björn (Ernst 2012): Zum Einfluss von Verdrehungen auf die Eigenschaften zugschwellbelasteter Drahtseile. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT). • Feyrer, Klaus (Feyrer 2000): Drahtseile. Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Wien: Springer-Verlag. • Weber, Tobias (Weber 2013): Beitrag zur Untersuchung des Lebensdauerverhaltens von Drahtseilen unter einer kombinierten Beanspruchung aus Zug, Biegung und Torsion. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT). • Außerdem wird die regelmäßige Recherche von Veröffentlichungen weiterer Universitäten mit Forschungsschwerpunkten im Bereich der Seilfördertechnik empfohlen, z.B. der TU Dresden und TU Chemnitz.
<p>Seillebensdauer bei Trommelantrieben mit mehrlagiger Wicklung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weiskopf, Ulrich (Weiskopf 2008): Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
<p>Seillebensdauer bei Treibscheibenantrieben mit Formrillen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berner, Oliver Roger (Berner 2011): Lebensdauer von Stahlseilen beim kombinierten Lauf über Treibscheiben und Ablenkscheiben unterschiedlicher Rillenform. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).

Tabelle 47: Literaturübersicht zum Thema Seildrehung und Verdrehung für allgemeine Seiltriebe

³⁵ Hinweis: Zum Teil wiederholen sich hier Quellen, die bereits bei Seilbahnen herangezogen wurden. Zum Teil sind hier jedoch andere Beziehungen oder Tabellenkennwerte zu verwenden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Das Drahtseil stellt beim Einsatz in Seilbahnen das Herzstück der technischen Anlage dar, trägt es doch die Fahrzeuge über große Spannweiten und Steigungen hinweg und überträgt die benötigten Antriebskräfte von der zugehörigen Endstation zum Fahrzeug (Günthner und Liedl 1999; Monheim et al. 2010).

Durch ihre schraubenförmige Wendelung entwickeln Litzendrahtseile unter Last ein Drehmoment (Feyrer 2000). Dadurch vollführt das Seil Drehungen in seinen frei beweglichen Abschnitten und ändert lokal seine ursprünglich eingestellte Produktionsschlaglänge. Das Seil ist somit gegenüber seinem Ursprungszustand verdreht (Verreet 1996). Dies kann bei Seilbahnen durch Kraftänderungen auf Grund seines Eigengewichts, dem Wirken des reibschlüssigen Antriebs und von Systemreibungen geschehen oder bei Reibkontakt mit anderen Materialien z.B. an den Stützpunkten (Oplatka 2004; Weber 2013). Die somit veränderte Seilstruktur führt zu einer anderen Belastung des Seilverbands und Destabilisierung des Querschnitts, wodurch die Lebensdauer des Seils in den verdrehten abschnitten gemindert werden kann und eine beschleunigte Schadensentwicklung begünstigt wird (Briem 1995). Die Verfügbarkeit hochbeanspruchter Anlagen wird dadurch eingeschränkt, zudem kann die Entwicklung der Schädigung von den Erwartungen der Betreiber und Prüfer abweichen, so dass Schadensfortschritte verspätet erkannt werden können.

Bisherige Abhandlungen und Forschungsarbeiten haben sich ausschließlich damit beschäftigt, die Größe der seileigenen Drehmomente zu bestimmen oder die Lebensdauer von bereits verdrehten Seilen experimentell zu untersuchen (Engel 1966; Ernst 2012; Feyrer 2000; Weber 2013). Der Versuch, die Drehung eines Seils im Betrieb rein rechnerisch durch die Integration des Verdrehwinkels eines drehmomentbehafteten Seils über seine Länge vorauszusagen, scheiterte bisher (Engel 1977; Hofmann 2015; Terriez und Reineri 1997). Da die bisherigen Untersuchungsmethoden für Seildrall nur auf einfachen Farbmarkierungen und Beobachtungshilfen wie z.B. sich auf- und abwickelnden Fäden beruhten, war es bisher nicht möglich, einen Zusammenhang zwischen den mechanischen Einwirkungen, der Drehung, der bleibenden Verdrehung und nutzbaren Seillebensdauer unter Verdrehung herzustellen. Erst in jüngerer Zeit sind detaillierte elektronische Messungen von Seildrehungen und Schlaglängen technisch anwendbar gelöst worden (Reichart 2006; Wehking et al. 2013).

Seildrall wird bei fördertechnischen Anlagen meist hingenommen und in der Planung nur kaum berücksichtigt. In vielen Fällen findet eine Bekämpfung der Phänomene erst bei Betriebs- oder Qualitätseinschränkungen statt, wenn diese auf betroffenen Anlagen auftreten. Eine Vorabprognose war vor der Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit nicht möglich.

Seilbahnen bieten durch ihre diskreten mechanischen Elemente, großen Seildurchmesser und langen Spannfelder zum einen günstige Voraussetzungen, um einen Untersuchungsansatz zu entwickeln: Drallerscheinungen können sich hier gegenüber Kranen oder Aufzügen durch die verhältnismäßig großen Beruhigungsabstände bis zum nächsten Stützelement vergleichsweise klar ausprägen. Zum anderen liegen hier hochdetaillierte Daten von anerkannten externen Prüfstellen über Drahtbruchentwicklungen, Seillebensdauern, Kräfte und Geometrien vor, mit denen eine theoretische Untersuchung durchgeführt werden kann. Zerstörungsfreie Prüfmethode wie die magnetinduktive Seilprüfung bilden die Grundlage dieser Verschleißdaten (Pernot et al. 2016), die oft über Jahrzehnte und über mehrere Generationen nacheinander eingesetzter Seile hinweg zugänglich sind. Letztlich sind Seilbahnen für ihre Drallwirkung bekannt, so dass von einer vielschichtigen Lage von Beispielfällen ausgegangen werden kann.

Durch einen ganzheitlichen Untersuchungsansatz sowie neu entwickelte Mess- und Datenanalysetechnik konnte erstmalige eine vollumfängliche Erschließung des Seildralls von Seilbahnen am Beispiel von Zweiseilpendelbahnen mit Bezug auf die Seillebensdauer erreicht werden. Dazu wurden in einem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG geförderten Projekt³⁶ drei Forschungspfade verfolgt, die final in einem Gesamtmodell zusammengeführt wurden.

Im **ersten Pfad** wurden 47 **Dauerbiegeversuche** mit verdrehten Gleichschlagseilen der Konstruktion 6x19 Seale bei unterschiedlichen Lasten bis zum Bruch der Prüflinge durchgeführt. Dabei wurden diskrete Verdrehwinkel eingestellt und während der Versuche die Drahtbruch- und Durchmesserentwicklung der Prüflinge dokumentiert, so dass Kennwerte für die Bestimmung der Ablegereife ermittelt werden konnten. Stichproben der Prüflinge wurden dazu mikroskopiert, um die Bruchmechanik zu klären, Schadensursachen zu dokumentieren und die Gültigkeit der Versuchsergebnisse abzusichern. Die Seile zeigen in allen Versuchskonfigurationen überwiegend Ermüdungsdrahtbrüche, so dass eine Verfälschung des Schadensmechanismus durch die im Versuch erhöhte Beanspruchung mit kleinen Scheibendurchmessern und den gewählten Kraftniveaus ausgeschlossen werden kann.

Die Durchmesserüberwachungen zeigen, dass aufgedrehte Gleichschlagseile mit erhöhter Schlaglänge zu einer Destabilisierung des Seildurchmessers neigen und stärker ovalisieren, so dass im inneren zusätzlicher Abrieb, Initialrisse und Drahtbrüche entstehen. Zugeschlagene Seile hingegen zeigen gleichbleibende bis erhöhte Lebensdauern, bis bei übermäßigem Zudrehen die Litzenberührung einsetzt und die Lebensdauer langsam wieder abfällt. Die Ablegereife bei Sichtkontrolle stellt sich bei aufgedrehten Seilen früh und in verhältnismäßig kurzer Distanz zum Seilbruch ein, was durch den fortgeschrittenen inneren Verschleiß begründet werden kann. Zugeschlagene Seile erreichten im Versuch die sichtbare Ablegereife rechtzeitig mit sicherem Abstand zum Bruch.

Die Versuche ergänzen die Forschungsarbeit von Weber und erlauben die Erweiterung der Lebensdauerberechnung nach Feyrer, jedoch konnte wegen der bei Seilbahnen üblichen großen Durchmesserhältnisse von Scheibe zu Seil gegenüber allgemeinen Hebezeugen nicht das exakt gleiche Polynom weiterverwendet werden. Eine angepasste Lebensdauerformel steht nun für die Lebensdauerprognose verdrehter Seilbahnseile zur Verfügung. Die Güte der Näherungsgleichung wurde mit Hilfe der in der Feyrer'schen Lebensdauerberechnung üblichen logarithmischen Standardabweichung und dem Bestimmtheitsmaß überprüft. Die Ergebnisse erfüllen die bisher auch in anderen Forschungsarbeiten gestellten Anforderungen.

Im **zweiten Pfad** wurde die Methode der **FMEA** in angepasster Form angewendet, um die Einflussfaktoren einer Seilbahnanlage auf die Seildrehung systematisch zu untersuchen und im Anschluss für die identifizierten Einflussfaktoren mit Hilfe von bestehender Literatur Formelzusammenhänge zu entwickeln, die eine Beschreibung des zu erwartenden Drehmoments möglich machen. Die FMEA ist ein probates Mittel der Industrie, komplexe Konstruktionen methodisch zu analysieren und in ihre Bestandteile zu zerlegen, um das Risiko des Versagens von Neuentwicklungen und Prototypen bereits im Planungsstadium auf ein Minimum zu reduzieren. Für die vorliegende Abhandlung bietet die Methode Sicherheit, alle relevanten Einflüsse zu erfassen und durch ihren Anteil an Teamarbeit vielschichtiges Expertenwissen im Beurteilungsmodell zu verarbeiten. Neben der Herleitung detaillierter Formeln wurden dabei Vereinfachungen und Tabellenkennwerte ermittelt, um die spätere Analyse in einem sinnvoll anwendbaren Modell zu ermöglichen. Die FMEA wurde dazu geringfügig angepasst und folgte in ihren Fehlernetzen den beiden übergeordneten schädlichen Konsequenzen „Seil dreht durch Kraftänderung“ und „Seil dreht durch

³⁶ Projektnummer WE 2187/33-1 „Untersuchung der Schädigung von Seilbahn-Zugseilen durch Verdrehung im Betrieb“

Walkarbeit / Materialkontakt“. Durch Bewertung der Schadensbedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit in einem für die Seilbahnaufgabe speziell erarbeiteten Maßstab werden die Risikoprioritätszahlen „RPZ“ der einzelnen Fehler gebildet und somit eine Fehlerhierarchie erzeugt. Die Filterung des Ergebnisses mit Hilfe einer Pareto-Analyse führte letztlich zu 14 identifizierten Fehlern, die nennenswert zur Seildrehung beitragen und einer weiteren Untersuchung und Erschließung bedürfen:

- 01 - Spannungsdifferenz durch Seileigengewicht
- 02 - Seilkraft-Änderung bei Berg- oder Talfahrt
- 03 - Walkarbeit
- 04 - Walkverlust
- 05 - Kraftänderung durch Umfangskraft
- 06 - Kraftänderung durch Beschleunigung/Verzögerung
- 07 - Reibverlust an Rolle (Rollen Anzahl unzureichend)
- 08 - Reibverlust an Rolle
- 09 - Reibverlust an Rolle
- 10 - Schmierung mangelhaft
- 11 - E-Modul zu niedrig (Seil ist „weich“)
- 12 - Höhengschlag
- 13 - Drallschlaff / weich
- 14 - Normalkraft zu hoch

Für jeden Drallverursacher wurden, soweit Literatur vorhanden war, die mathematischen Hintergründe aufbereitet oder vollkommen neu erarbeitet. Die Betrachtung der Walkarbeit des Seils in Gummifütterungen wurde zum Beispiel in den bisherigen Abhandlungen ignoriert, kann aber durch die Analyse und weitere Aufbereitung nun in der Drehmomentermittlung berücksichtigt werden. Begleitende Versuche und Statistiken liefern die zugehörigen Faktoren, um eine Berechnung des gesamten erwartbaren Seildrehmoments innerhalb einer Seilbahnanlage zu ermöglichen. Dazu genügt es, wenige Geometrie- und Konstruktionsdaten der geplanten oder vorhandenen Anlage zu kennen. Die Abwicklung ist in einem hohen Grade automatisierbar, so dass Berechnungshilfen auf Softwarebasis unterstützend genutzt werden können.

Zur Überprüfung und Ergänzung der zuvor getroffenen der Annahmen und zur Messung realer Seildrehung in Seilbahnanlagen wurde eine neuartige Sensorlösung entwickelt. Mittels eines dreiachsigen Beschleunigungsaufnehmers kann der Drehsensor erstmalig ortsabhängig die Rotation des Seils um seine eigene Achse messen. Neben der Messtechnik selbst wurde ein geeignetes Schutzgehäuse konstruiert und ein Montagekonzept erarbeitet. Insgesamt wurden 25 Pendelbahnanlagen vermessen, so dass eine breite Datenbasis verschiedenster Anlagenkonfigurationen vorliegt. Zur Aufbereitung der Daten wurde ein neuartiges Softwaretool benötigt, um diese glätten, schneiden und zu einer kontinuierlichen Drehkurve zusammenfügen zu können. Während der Entwicklung wurde durch gezielte Testmessungen dafür Sorge getragen, dass die Daten durch die Verarbeitungsalgorithmen nicht verfälscht werden.

Die Messungen zeigen, dass obere und untere Zugseile bis auf lokale Abweichungen bei Berg- oder Talfahrten charakteristische kontinuierlich geformte Drehkurven ausbilden. Mit dem Drehsensor konnte bewiesen werden, dass das Drehverhalten eines Seils nahezu ideal physikalischen Grundlagen entspringt und nur unwesentliche zufällige Ereignisse auftreten. Ähnliche Bahnkonfigurationen, Wiederholfahrten oder parallel verlaufende Seile zeigen identische Drehkurven. Die Differenz der Drehungen zwischen den beiden abgeschlossenen Betriebszyklen einer Berg- und Talfahrt ist ein Maß für den Drallstau und die erwartbare Verdrehung. Dabei zeigen obere Zugseile eine Tendenz zum Zudrehen am Messpunkt in der Nähe der Fahrzeuge, während untere Zugseile am Messpunkt in Fahrzeughöhe aufdrehen.

Die Differenz muss sich auf dem letzten Seilabschnitt nach Demontage des Sensors ausgleichen bzw. bleibt als Drallstau im Seil erhalten.

Im **dritten Pfad** wurden **magnetinduktive Prüfdaten** zu den untersuchten Beispielanlagen aus dem Archiv des IFT ausgewertet. Diese zerstörungsfreie Prüfung ist ein seit Jahrzehnten bei Seilbahnen vorgeschriebenes Mittel, um Drahtbrüche, Verschleiß und Korrosion in Seilen sicher entdecken zu können. Drahtbrüche führen zu einem wachsenden Tragkraftverlust im Seilquerschnitt und bilden somit ein Maß für die sichere Einsatzgrenze, die Ablegereife. Sie entwickeln sich mit fortgeschrittener Einsatzdauer eines Seils exponentiell, so dass der Schadensfortschritt durch regelmäßige Prüfung erkannt und vorausgesagt werden kann. Die Ablegereife zieht den Ersatz eines Seils nach sich, so dass über die dokumentierten Einsatzdauern der Seile ihre Betriebszeit in Biegewechseln berechnet werden kann, so dass ein Bezug zur im Dauerbiegeversuch erreichten Seillebensdauer herstellbar ist. Durch Analyse der Stations- und Scheibenkonfigurationen der Anlagen sowie durch die Ermittlung der wirkenden Kräfte und Definition mittlerer jährlicher Fahrtzahlen konnte die real erreichte Seillebensdauer in Biegewechseln aus den magnetinduktiven Prüfberichten errechnet werden.

Neben der Drahtbruchentwicklung, Einsatzdauer und den konstruktiven Daten der Seile und Anlagen wurden dazu die Messsignale der Prüfungen durch lokale Fouriertransformationen auf ihr Frequenzspektrum hin analysiert, um den Schlaglängenverlauf der Seile während der Messungen berechnen zu können. Die kontinuierliche aufgenommene Messkurve enthält neben den Signalausschlägen für verdächtige, eventuell schadhafte Stellen ein sogenanntes Grundsignal, das zum Teil durch die geometrischen Eigenschaften des Drahtseils geprägt wird und somit auch Anteile der sich periodisch wiederholenden Schlaglänge beinhaltet.

Die Fourieranalyse musste für die Untersuchung der Daten vorerst differenziert eingestellt werden, um zuverlässige Daten zu erhalten. Die Ergebnisse wurden durch vergleichende manuelle und elektronische Schlaglängenmessungen verifiziert. Zu jeder Anlage wurden, sofern Daten verfügbar waren, entsprechende Diagramme erstellt, dabei wurden auch Messungen derselben Seile aus verschiedenen Jahren, Messungen von zwei Generationen von Seilen auf derselben Anlage und Messungen parallel verlaufender Zugseile analysiert. Erneut konnte dadurch bewiesen werden, dass der Drall der Seile physikalischen Grundsätzen folgt, da sich die vergleichenden Messungen nahezu vollständig entsprechen.

Die magnetinduktiven Daten zeigen in Verbindung mit den Schlaglängenkurven, dass sich Drahtbrüche in den Bereichen der verstärkt aufgedrehten Seilabschnitte sammeln. Obere Zugseile drehen mäßig in ihren mittleren Abschnitten auf, während die Randzonen eine verkürzte Schlaglänge aufweisen. Untere Zugseile hingegen drehen in ihrer Mitte zu und an den Rändern verstärkt auf. Die Seile der untersuchten Stichprobe weisen überwiegend Drahtbruchhäufungen und verkürzte Lebensdauern in den Randzonen von unteren Zugseilen auf. Aus der lokalen Schlaglänge kann der Verdrehwinkel des Seils berechnet werden, so dass ein Bezug zu den Biegeversuchen aus Pfad 1 hergestellt werden kann. Die vorgefundenen Verdrehwinkel fallen zum Teil nennenswert in den signifikanten Bereich von reduzierter Seillebensdauer und überschreiten dabei die Warnschwelle der Norm von +15 % Schlaglängenzuwachs. Die negative, symmetrisch gewählte Grenze der aktuellen EN-Norm hingegen ist wenig aussagekräftig und dürfte den Ergebnissen der Versuche zur Folge auf eine Verkürzung von -20 % gesenkt werden.

Nach Analyse und Bewertung verschiedener Modellansätze wurde ein Gesamtmodell erarbeitet, das sich aus Ansätzen der technischen Bewertung in der methodischen Konstruktion nach Pahl/Beitz bzw. VDI 2225 und der Schadensakkumulationshypothese von Kugellagern nach Palmgren-Miner zusammensetzt. Andere Ansätze nach Feyrer oder aus der Entscheidungstheorie der Betriebswirtschaft beinhalten zwar interessante Vorgehensweisen und Funktionalitäten, konnten aber unter den Bewertungskriterien wie zum Beispiel der Erweiterbarkeit, der möglichen Nachvollziehbarkeit oder einem geringen Anteil an Schätzfaktoren keine ausreichend hohen Punktzahlen erreichen.

Grundsätzlich wurden für das finale Gesamtmodell eine IST-Seite aus real vorgefundenen Schädigungszuständen bzw. berechenbaren reduzierten Seillebensdauern sowie eine SOLL-Seite aus den theoretischen Analysen der berechenbaren Parameter der FMEA generiert. Die SOLL-Seite gibt ein erwartbares Schadenslevel in Prozent an, wobei 100% der höchsten aus der Stichprobe von 20 umfangreich untersuchten Bahnanlagen bzw. 42 Seilen bekannten Schädigung aus Verdrehung entsprechen. In diesem Zustand ist der extremste Fall der Stichprobe erreicht und somit mit einer maximalen Lebensdauerreduktion aus Verdrehung von 20% zu rechnen. Mit Blick auf das Rechenmodell auf Basis der Biegeversuche sind bei stärkerer Verdrehung bis $-1080^{\circ}/100d$ bis zu 30% Lebensdauerverlust möglich. Aus den im Feld vorgefundenen Lebensdauer kennwerten und Verdrehungszuständen wurde dazu die IST-Seite der Gleichung aufgestellt, welche die realen Schadenslevels zusammenfasst und nicht zwingend für die Analyse einer bestehenden oder geplanten Anlage benötigt wird. Diese dient vornehmlich zur Einstellung der Bewertungsparameter der SOLL-Seite, kann aber auch in zukünftigen Analysen wieder in Einzelfaktoren zerlegt werden, wenn Teilinformationen über die IST-Schlaglänge oder die real erreichte Lebensdauer vorliegen. Somit können durch die Kombination aus theoretischer Berechnung und real gemessener Daten fehlende Informationen über das System näherungsweise berechnet werden.

Der Parametersatz der Bewertungsfaktoren des Gesamtmodells teilt sich dabei in vier Varianten, je nachdem, ob ein oberes Zugseil oder ein unteres Zugseil mit oder ohne direkter Wirkung des Antriebs am Seilstrang zu untersuchen ist. Durch Optimierung der ganzzahligen Faktoren konnte eine Übereinstimmung der Soll und IST Seite von durchschnittlich -1,6 % bei einer Standardabweichung von 16,3 % erreicht werden. Dies stellt in Bezug auf die üblichen Streuungen bei experimentellen Untersuchungen und Lebensdauerberechnungen von Seilen eine ausreichende Güte der Abbildung dar.

Die Gleichung kann mit wachsender Datenbasis weiter gepflegt werden, so dass Grenzwerte angepasst oder sogar neue Faktoren für spezielle Seilkonstruktionen oder spezielle konstruktive Ausführungen von Pendelbahnen hinzugefügt werden können.

Aus den Analysen und Ergebnissen der drei Forschungspfade werden schließlich Empfehlungen abgeleitet, welche kurz- und mittelfristigen Handlungsoptionen beim Auftreten von hohen Seildrehmomenten und Drallstau in Pendelbahnen bestehen. Neben Wartungs- und Pflegemaßnahmen wie zum Beispiel dem Nachschmieren des Seils, Ausrichten der Spur oder dem Ausdrehen von Fütterungen der Scheiben und Rollenbatterien können dabei auch konstruktive Maßnahmen wie das Einbringen weiterer Seilreiter, die Aussteifung von Stützen oder der Wechsel der Seilkonstruktion dem Drall entgegenwirken.

Abschließend wird die Übertragung der hier vorliegenden Ergebnisse auf Einseilumlaufbahnen und in Ansätzen auf allgemeine Seiltriebe diskutiert. Bei umlaufenden Seilen gelten andere Voraussetzungen in Bezug auf die Entwicklung von Verdrehung und die Auswirkung auf die Anlage. Während hier weniger die Seillebensdauer durch Verdrehung beeinflusst wird, da sich ein Drallstau zu verschiedenen Gelegenheiten wieder abbauen kann, können hohe Drehmomente dagegen zu betrieblichen Qualitätseinbußen und Störungen führen, wenn der aufgestaute Drall zu Fahrzeugschwingungen führt oder sich beim Öffnen von Klemmen in den Stationen schlagartig abbaut. Das Stammdatenblatt für Pendelbahnen ist in angepasster Form nutzbar, um erwartbare Seildrehmomente im System abzuschätzen. Zudem werden konstruktive Lösungsvarianten von Umlaufbahnsystemen analysiert und Empfehlungen zur Untersuchung und zum Umgang mit Drallerscheinungen in Umlaufbahnen gegeben. Prinzipiell sind hier die mitunter reduzierte Seilvorspannung in bestimmten betrieblichen Situationen und die Qualität der Spurung insbesondere im Bereich der Station maßgeblich ausschlaggebend für den Aufbau von Verdrehungen im System.

Bei allgemeinen Seiltrieben stehen nur vergleichsweise grobe Daten über die Schlaglängenverteilung, somit den Drallstau und die lokale Drahtbruchentwicklung zur Verfügung. Der verwendete Drehsensor ist zudem aufgrund seines Messprinzips an vertikal

verlaufenden Seilsträngen nicht einsetzbar. Als Impuls zur weiterführenden Forschung an Drallphänomenen allgemeiner Seiltriebe werden daher die drehungsbezogenen Charakteristiken der hier üblichen verwendeten Seilkonstruktionen sowie der Antriebskonzepte systematisch analysiert. Erste Bewertungen, welche Konfigurationen sich besonders für weitere Forschungsarbeiten eignen, werden zusammen mit einer nach Themengebieten sortierten Darstellung der bestehenden Literaturlage zur Verfügung gestellt. Abschließend erfolgt nun ein Ausblick, welche Wege die Forschung im Bereich von Seildrehungen und schädlichen Verdrehungen in Zukunft nehmen kann.

10.2 Ausblick potentielle Weiterentwicklung des Themas

Seildrall bleibt eine unvermeidbare Auswirkung in Seilförderanlagen aller Art. Zum aktuellen Stand der Technik sind viele Anwendungen, wenn überhaupt, nur hinlänglich bezüglich des Seildralls untersucht. Die Fortentwicklung industrieller Fördertechnik und moderner Personenförderer wird zudem die Grenzen der Belastbarkeit und Verfügbarkeit von Seiltrieben kontinuierlich weiter aufstoßen. Aktuelle geplante und zum Teil bereits genehmigte Forschungsvorhaben des IFT Universität Stuttgart zeigen, dass die Untersuchung der Seillebensdauer unter Dralleinflüssen in Zukunft weiter vorangetrieben wird:

- DFG-Forschungsprojekt „Gegenbiegung“ zur Ermittlung der Seillebensdauer bei verschiedenen Scheibenabständen, Biegeverhältnissen und Seilkräften
- AIF-ZIM Projekt „RBG III“ zur Ermittlung der Seillebensdauer von Faserseilen in Regalbediengeräten mit Trommelantrieben
- Masterarbeit M.Sc. Marcus Hansch, „Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prototypen-Sensors zur Messung von Seildrehung bei senkrecht laufenden Seilen“, IFT Universität Stuttgart 2016.³⁷

Zudem wird der Seilbahn-Drehensor bereits bei Seilherstellern, Seilbahnherstellern und Dienstleistern der Branche als Beta-Anwender eingesetzt, so dass von einer stetig wachsenden Erfahrungs- und Datenbasis ausgegangen werden kann, deren steter Fortschritt und Zugänglichkeit vom Verfasser dieser Abhandlung zukünftig unterstützt und begleitet wird.

Fortschritte in der Untersuchung von Drall-Phänomenen bei Schachtförderanlagen, Kranen oder Windenantrieben sind angesichts des aktuellen Trends in sowohl universitärer als auch industrieller Forschung und Entwicklung absehbar.

Insbesondere bei hochfesten Faserseilen in innovativen Anwendungen stellen sich seitens Drall und Verdrehung neuartige Probleme, da viele Faserseilkonstruktionen geflochten ausgeführt werden und somit vollkommen drehmomentfrei sind (Richtlinie prVDI 2500). Werden diese jedoch gewaltsam von außen verdreht, so entwickeln sie im Gegensatz zu Stahlseilen nahezu kein Rückstellmoment, da die Fasern nicht zurückfedern (Kühner 2016), vgl. Abbildung 106. Der Seilverband wird durch Verdrehung inhomogenisiert, hält diesen Zustand weitestgehend bei und kann dadurch im Kontakt mit Scheiben, Rollen und Trommeln unverhältnismäßig stark beansprucht werden. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Abhandlung werden am IFT erste Biegeversuche mit verdrehten Faserseilen zur Einführung in die komplexe Thematik durchgeführt, vgl. Abbildung 107.

³⁷ Das Prototypensystem soll zukünftig in Schachtförderanlagen oder bei Versuchen an Hochleistungsaufzügen Anwendung finden.

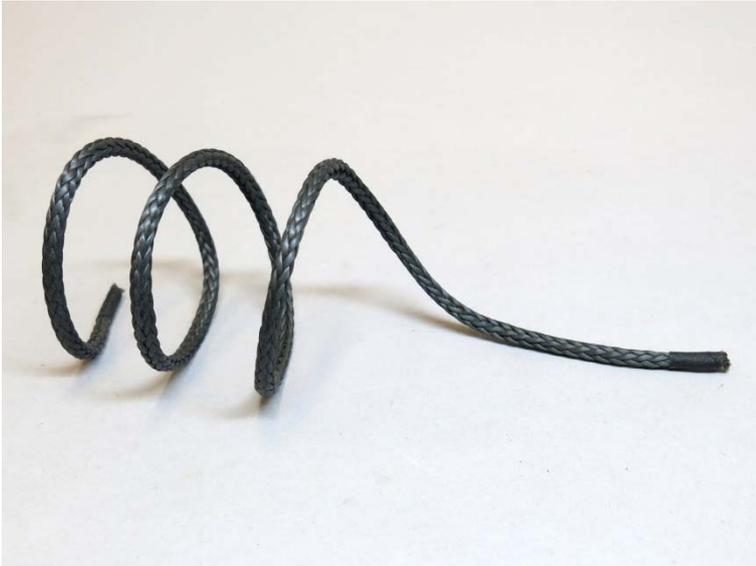


Abbildung 106: Beispiel des Ruhezustands eines verdrehten Faserseils in geflochtener Konstruktion (Kühner 2016)



Abbildung 107: Biegeversuch mit verdrehtem Faserseil

Die Untersuchung und Eingrenzung der hier wirkenden Drall-Mechanismen stellt eine wichtige Aufgabe für den zukünftigen wirtschaftlichen und sicheren Einsatz von Faserseilen in der Fördertechnik von Material und Personen dar.

Es bleibt zu wünschen, dass die hier vorgestellte Forschungsarbeit an anderer Stelle zu weiterer Forschung im Bereich der Verdrehung von Seilen genutzt werden kann und Impulse für neue Arbeiten in diesem Themengebiet gibt.

Literaturverzeichnis

Norm prEN 12927, 05-2016: Safety requirements for cableway installations designed to carry persons - Ropes.

Norm DIN 15020 Blatt 1, 02-1974: Grundsätze für Seiltriebe - Berechnung und Ausführung.

Norm DIN EN 12385-4, 03-2003: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit, Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke.

Norm DIN EN 12385-8, 03-2003: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit, Teil 8: Zug- und Zug-Trag-Litzenseile für Seilbahnen zum Transport von Personen.

Norm DIN EN 12385-9, März 2003: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit, Teil 9: Vollverschlossene Spiraltragseile für Seilbahnen zum Transport von Personen.

Norm DIN EN ISO 7500-1, 11-2004: Metallische Werkstoffe - Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen, Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung.

Norm DIN EN 12927-2, 06-2005: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr, Seile, Teil 2: Sicherheitsfaktoren.

Norm DIN EN 12927-5, 06-2005: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr, Seile, Teil 5: Lagerung, Transport, Auflegen und Spannen.

Norm DIN EN 12927-7, 06-2005: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr, Seile, Teil 7: Inspektion, Reparatur und Wartung.

Norm DIN EN 12927-8, 06-2005: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr, Seile, Teil 8: Magnetinduktive Seilprüfung.

Norm DIN EN 12930, 06-2005: Sicherheitsbestimmungen für Seilbahnen für den Personenverkehr - Berechnungen.

Norm DIN EN 1907, 01-2006: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr - Begriffsbestimmungen.

Norm DIN EN 60812, 11-2006: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA).

Norm DIN EN 12385-2, 06-2008: Stahldrahtseile - Sicherheit - Teil 2: Begriffe, Bezeichnung und Klassifizierung.

Norm DIN EN 12385-1, 01-2009: Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit, Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

Norm DIN EN 81-1, 06-2010: Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen - Teil 1: Elektrisch betriebene Personen- und Lastenaufzüge.

DIN EN 13411-4, 06-2011: Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit, Teil 4: Vergießen mit Metall und Kunstharz.

Norm DIN EN 13223, 11-2015: Sicherheitsanforderungen an Seilbahnen für den Personenverkehr - Antriebe und weitere mechanische Einrichtungen.

Norm ISO 4309, 01.08.2010: Cranes - Wire Ropes - Care and maintenance, inspection and discard.

VDI-Richtlinie 2358, 1984: Drahtseile für Fördermittel.

Richtlinie VDI 2225-3, 11-1998: Konstruktionsmethodik, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Blatt 3: Technisch-wirtschaftliche Bewertung.

Richtlinie prVDI 2500, 2016: Faserseile.

- Bachl, Walter; Trenkle, Norbert; Muser, Hans (1968): Die Walmendingerhornbahn. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)*, 1968 (2), S. 89–95.
- Bamberg, Günter; Coenenberg, Adolf Gerhard; Krapp Michael (2012): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 15. Aufl. München: Vahlen.
- Baum, Reinhold (1951): Der Seildrall. In: *DRAHT* 1, Dezember 1951 (12), S. 326–327.
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (11-2004): Technische Lieferbedingungen für Drahtseile von Seilschwebe- und Standseilbahnen gemäß BOSeil (TL). BOSeil (TL).
- Bender, Volker (2015): Seilbahn Koblenz. Mit einem Beitrag von Peter Kleber und Fotos von Dietmar Guth und Thomas Frey. Koblenz: Garwain Presse und Verlag e.K.
- Benoit, Georg (1934): Einfluß von Drehungen bei Drahtseilen. In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* (52), S. 1495–1497.
- Berner, Oliver Roger (2011): Lebensdauer von Stahlseilen beim kombinierten Lauf über Treibscheiben und Ablenkscheiben unterschiedlicher Rillenform. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Bleichert, Adolf (1916): Seilbahnkalender. Handbuch der Seilbahnfirma Adolf Bleichert & Co. Hg. v. Adolf Bleichert & Co. Leipzig.
- Bleichert, Adolf (1927): Bleichert Transportanlagen. Zweiseilbahnen. Hg. v. Adolf Bleichert & Co. Leipzig.
- Bosse, Martin (2016): Mehrheit für das Seilbahn-Projekt in Wuppertal. In: *Westdeutsche Zeitung*, 25.09.2016.
- Brenner, Carolin; Kühner, Konstantin (2013): Handbuch Drehsensor (DSR). Hg. v. IFT Universität Stuttgart. Stuttgart.
- Briem, Ulrich (1995): Bruchkraftverlust bei Verschleiß durch Litzenberührung. In: *DRAHT* (46), S. 517–521.
- Bucher, Gustav (1958): Drahtseile und ihre Herstellung. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Czitary, Eugen (1962): Seilschwebbahnen. 2. Aufl. Wien: Springer-Verlag.
- Doppelmayr (2009): Urbane Seilbahnen als innovativer Lösungsweg für den modernen Stadtverkehr. Unter Mitarbeit von raumkom GmbH Trier. Hg. v. Doppelmayr Seilbahnen GmbH. Wolfurt.
- Doppelmayr, Artur (1998): Denkanstöße zur Funktionserfüllung von Einseilumlaufbahnen. Projektierung, Konstruktion und Betrieb im Sicherheitsregelkreissystem, basierend auf der Analyse von Vorfällen. Dornbirn: WIR Public Relations.
- Dreher, Fritz (1933): Ein Beitrag zur Theorie der Drehung und Spannungsverteilung bei zugbelasteten Litzen und Seilen. Dissertation. Badische Technische Hochschule "Fridericiana" zu Karlsruhe, Karlsruhe.
- Drißner, G. (2003): Seilbahnen brauchen keine Berge. In: *Süddeutsche Zeitung*, 24.11.2003 (270).
- Eberhardt, Otto (2013): Risikobeurteilung mit FMEA. Die Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse gemäß VDA-Richtlinie 4.2. 3. überarbeitete Auflage. Renningen: expert Verlag.
- Engel, Edwin (1957): Ein Beitrag zur Berechnung der Verdrehungen von Seilen und deren Bedeutung bei Seilbahnen. Dissertation. TU Wien, Wien. Institut für Eisenbahnbau und Spezialbahnen.
- Engel, Edwin (1959): Verdrehungserscheinungen an Seilen bei Seilbahnen. In: *Österreichische Ingenieur-Zeitschrift* 2, 1959 (6), S. 215–220.

- Engel, Edwin (1966): Der Seildrall. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)* (2/1966).
- Engel, Edwin (1977): Über den Laufwiderstand gefütterter Seilrollen. Hg. v. Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen. TU Wien. Wien (Institutsheft, 6).
- Engel, Edwin (1994): Drall-Verfrachtung bei Zugseilen. Hg. v. Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen. TU Wien. Wien (Institutsheft, 21).
- Engelmann, Lutz; Meyer, Lothar; Pews-Hocke, Christa; Simon, Helga (1999): Formeln und Tabellen. für die Sekundarstufen I und II. 7. Aufl. Berlin: paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH.
- Ernst, Björn (2012): Zum Einfluss von Verdrehungen auf die Eigenschaften zugschwellbelasteter Drahtseile. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Fatzer AG (2014): Seiltabellen Litzenseile. Hg. v. Fatzer AG Drahtseilwerk. Romanshorn.
- Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Wien: Springer-Verlag.
- Feyrer, Klaus (2000): Drahtseile. Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Wien: Springer-Verlag.
- Feyrer, Klaus (2011): Die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Größeneinfluss. In: *Lift-Report* 37, 2011 (1), S. 12–18.
- Feyrer, Klaus; Schiffner, Gerhard (1987): Torque and torsional stiffness of wire rope - Part II. In: *Wire*, 1987 (37 (1987)), S. 23–27.
- Gassmann, Hans-Rudolf (1981): Torsionsmomente in Förderseilen von Einseilumlaufbahnen. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Institut für Bau- und Transportmaschinen.
- Gleich, Clemens (2011): Meine Gondel ins Büro. In: *Welt am Sonntag*, 12.06.2011.
- Günthner, Willibald; Liedl, Stephan (1999): Skript Seilbahntechnik. Hg. v. Lehrstuhl für Fördertechnik / Materialfluss / Logistik. TU München. München.
- Härtel, Marina (2014): Entwicklung und Software-Konzeption zur Messdatenaufbereitung eines neuartigen Sensors zur Erfassung der Seildrehung. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Häusser, Otto-H. (2016): Eine Seilbahn könnte die B27 entlasten. In: *Stuttgarter Zeitung*, 08.08.2016.
- Hobbs, Roger; Ridge, Isabel (2013): Torsional interactions in multi-component moorings. In: *Proceedings OIPEEC Conference "Simulating rope applications"*. Oxford.
- Hofmann, Gottfried (2015): Ropeway Technology. Analytical Review of Ropeways. Krattigen (CH): Prellbock Verlag.
- Hoppe, Stefanie (2014): Mit der Seilbahn zur Marburger Uni. Umstrittenes Verkehrskonzept. Hg. v. hr-online.de. Hessischer Rundfunk.
- Hötzel, Manfred; Krieg, Stefan W. (2007): Adolf Bleichert und sein Werk. Beucha: Sax Verlag (Leipziger Historische Hefte, 8).
- Hudler, S. (1958): Der Drall des Drahtseiles. In: *Internationale Seilbahn-Rundschau* 1, 1958 (3), S. 74.
- Inäbnit, Florian (2005): Dolderbahn. Standseilbahn, Tram und Zahnradbahn. Leissigen: Prellbock Verlag.
- Jemlich, Günter (1985): Anwendung und Überwachung von Drahtseilen. 1. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik.

- Jenner, Tobias (1992): Ein Beitrag zur Geometrie der Drahtseile. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Kälin, Adi (2013): Zoo-Seilbahn ein Schrittchen weiter. Regierungsrat weist Rekurse gegen den Gestaltungsplan ab. In: *Neue Zürcher Zeitung*, 25.09.2013.
- Kehse, U. (2013): Seilbahnen. Himmlische Seilschaften. In: *"mobil" Kundenzeitschrift der Deutschen Bahn AG*, 2013 (02/2013).
- Koch, Klaus C. (2011): Schwebendes Verfahren. Mit neuen Ideen und Konzepten sucht die Seilbahnbranche ihre Zukunft - auch im Stadtverkehr. In: *Süddeutsche Zeitung*, 2011 (298).
- Kollros, W. (1974): Zusammenhang zwischen Torsionsmoment, Zugkraft und Verdrillung in Seilen. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)* (2/1974).
- Kubanda, Roland (2003): Stadtflucht 10m/s. Innsbruck und die Nordkettenbahn. Innsbruck: StudienVerlage Ges.m.b.H.
- Kuczera, Thomas (2012): Ermittlung der Beanspruchung großer Seilscheiben. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Kühner, Konstantin (2009): Projektstudie einer neuen Seilbahn Eibsee - Zugspitzgipfel nach dem System Funifor. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik.
- Kühner, Konstantin (2014): Ablegereife von Drahtseilen. Winspect Rope Academy. Landesberufsschule Hallein. Winspect GmbH München. Hallein (A), 06.02.2014.
- Kühner, Konstantin (2015): Research project digital measurement of rope rotation. In: Isabel Ridge (Hg.): *Challenging rope applications*. OIPEEC Conference 2015 / 5th International Stuttgart Ropedays. Stuttgart, 24-26.03.2015. OIPEEC, S. 209–219.
- Kühner, Konstantin (2016): Faserseile als Tragmittel im Bühnenbetrieb. Faserseile als Tragmittel. Euraka. EurAka Baden-Baden gGmbH. Baden-Baden, 17.03.2016.
- Kühner, Konstantin; Winter, Sven; Moll Dirk (2012): Visuelle Seilkontrolle. In: IFT Universität Stuttgart (Hg.): *Tagungsband 4. Stuttgarter Seiltage*. Stuttgart.
- Lang, Johannes (2003): Drahtseile zum Himmel. 75 Jahre Predigtstuhlbahn. Technik - Tourismus - Träume. Bad Reichenhall: Buch- und Offsetdruckerei Wiedemann OHG (Reichenhaller Geschichtsbilder).
- Longatti, Bruno (2012): Entwicklungstendenzen und Stolpersteine von verschlossenen Spiralseilen (Tragseilen). 4. Stuttgarter Seiltage. IFT Universität Stuttgart. Stuttgart, 2012.
- Malota, F. (1958): Abnormale Abnützungerscheinungen bei Seilrollenfütterungen und ihre Ursachen. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)*, 1958 (3), S. 104–106.
- Meebold, Richard (1959): Die Drahtseile in der Praxis. 3. Aufl. Berlin / Göttingen / Heidelberg: Springer-Verlag.
- Messmer, Stefan (2008): Seilprüfung Heute. Hg. v. IWM Institut für Werkstofffragen und Materialprüfungen (Heute IWT). Glattbrugg.
- Meyer-Krentler, Eckardt; Moeninghoff, Burkhard (2013): *Arbeitstechniken der Literaturwissenschaft*. 16. Aufl. Stuttgart: UTB GmbH.
- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg (11-2004): *Vorschriften für den Bau und Betrieb von Seilbahnen*. BO Seil (BOSeil).
- Möller, Uwe J.; Jamil, Nassar (2002): *Schmierstoffe im Betrieb*. 2. Aufl. 2 Bände. Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag (1).
- Monheim, Heiner; Muschwitz, Christian; Auer, Wolfram; Philippi, Matthias (2010): *Urbane Seilbahnen*. Moderne Seilbahnsysteme eröffnen neue Wege für die Mobilität in unseren Städten. Köln: Kölner Stadt- und Verkehrsverlag.

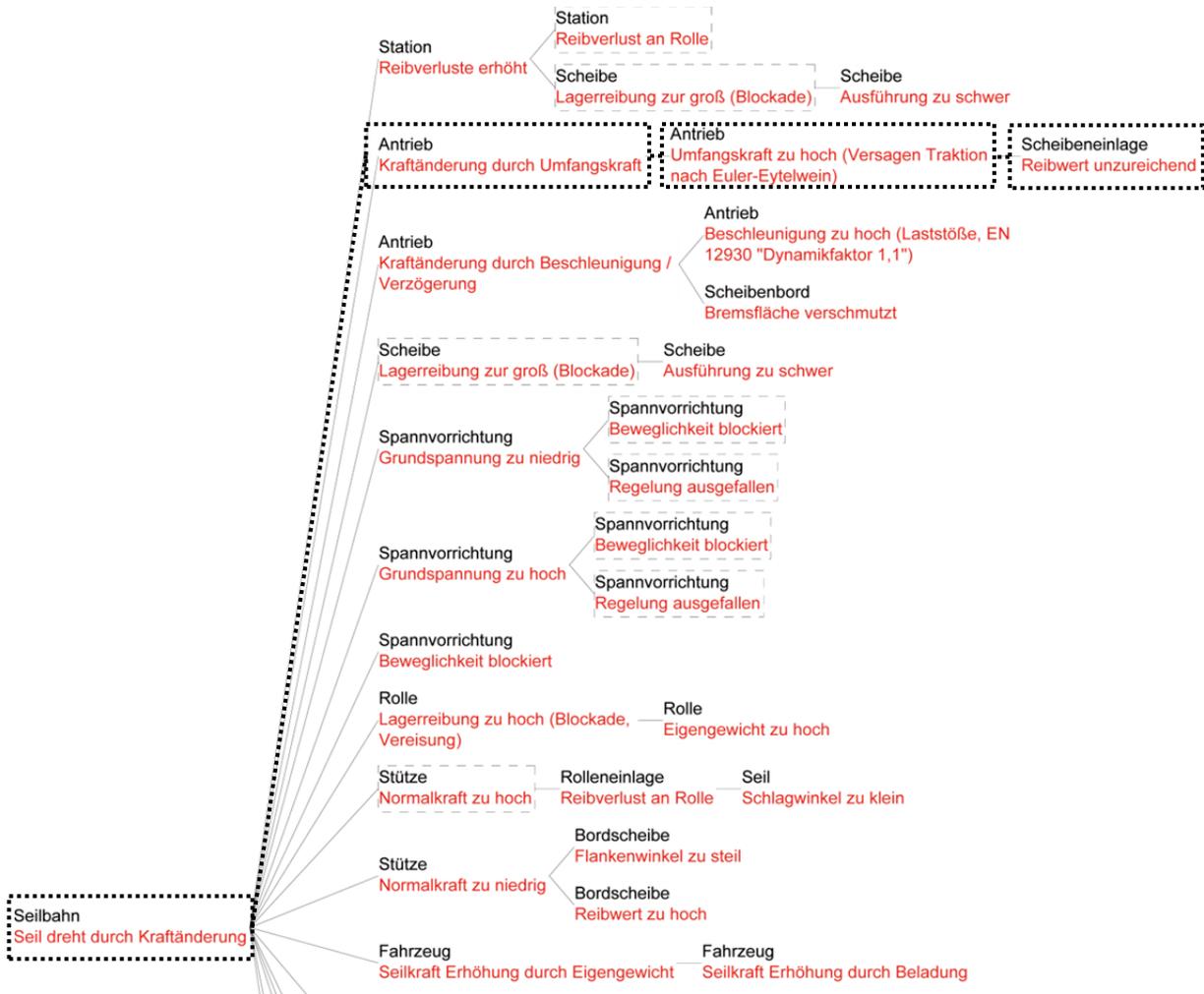
- Muchow, Harald (2016): Risikoanalyse visueller Seilprüfung. Masterarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik.
- Müller, Hugo (1966): Neue Ergebnisse der Drahtseilforschung. Drahtseilvereinigung e.V. Stuttgart, 06.12.1966.
- Nejez, Josef; Kühner, Konstantin; Longatti, Bruno; Pernot, Stephane; Paglia, Federico; Kopanakis, Georg A. (2014): Instandhaltung von Seilbahnseilen. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)*, 03/2014, S. 6–10.
- Novak, Gregor (2010): Konstruktion einer Verdrehvorrichtung für die Drehmomentmessung an Stahldrahtseilen. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- OITAF (2015): Survey on Magnetic Rope Testing. Unter Mitarbeit von Stephane Pernot, Konstantin Kühner und et. al. Rom: Eigenverlag (OITAF Books, 3).
- Oplatka, Gabor (2004): Drall in Zug- und Förderseilen. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)* (05/2004).
- Palmgren, Arvid (1924): Die Lebensdauer von Kugellagern. In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 68, 05.04.1924 (14), S. 339–341.
- Pernot, Stephane; Kuehner, Konstantin; et. al. (2016): Survey on Magnetic Rope Testing. OITAF Book No 3. Bozen: Eigenverlag.
- Pfeifer (2004): Pfeifer Drako - Katalog Aufzugseile. Hg. v. Drahtseilerei Gustav Koks GmbH. Mühlheim an der Ruhr.
- Piskóty, Gábor (1995): Entgleisungssicherheit von Förderseilen an Rollenbatterien. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Institut für Leichtbau und Seilbahntechnik.
- Pohlig (1917): Feldseilbahnen Type 1917. Bau- und Betriebsvorschriften für Pohlig'sche Feldseilbahnen. Hg. v. J. Pohlig Aktiengesellschaft. Köln (Nr. 1701).
- Pohlig, Julius (1931): Pohlig Zweiseilbahnen. Katalog. Hg. v. Julius Pohlig Aktiengesellschaft. Köln.
- Profos, Paul; Pfeifer, Tilo (1994): Handbuch der industriellen Messtechnik. 6. Aufl. Berlin, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Pröhl, Andreas; Nejez, Josef (2012): Seilprüfgerät behördlich genehmigt. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)* (01/2012).
- Rau, Jörg-Peter (2013): Kein Aprilscherz: Konstanzer OB will Seilbahn über den Rhein. In: *Südkurier*, 15.10.2013.
- Redaelli spa (2013): Stahldrahtseile für Seilbahnen und Skilifte, Seilbauwerke und Förderseile. Hg. v. Redaelli Tecna Cordati spa. Cologno Monzese (Milano).
- Reichart, David (2006): Entwicklung eines Schlaglängenmessgerätes für Litzenseile. Studienarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Reinelt, Oliver (2014): Drahtquerpressung / Sprungpunkt. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Rittner, Markus (2012): Optimierung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines elektronischen Schlaglängenmessgeräts für Drahtseile. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Röthemeyer, Fritz; Sommer, Franz (2013): Kautschuktechnologie. Werkstoffe - Verarbeitung - Produkte. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Schärli, Max (Hg.) (2007): 50 Jahre Seilbahnen der Schweiz. 1957-2007. Vereinigung Technisches Kader Schweizer Seilbahnen. Brienz: Thomann Druck AG.
- Schatz, Mario (1987): Seilbahnen der DDR. Heidelberg: R. v. Decker's Verlag.

- Schmoll, Hans-Dieter (1999): Welt Seilbahn Geschichte. Band 1. Eugendorf / Salzburg: Ottmar F. Steidl Verlag.
- Schneigert, Zbigniew (1966): Aerial Ropeways and Funicular railways. Warschau: Pergamon Press.
- Schönherr, Silke (2005): Einfluss der seitlichen Seilablenkung auf die Lebensdauer von Drahtseilen beim Lauf über Scheiben. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Schweri (2008): BECORIT – Kunststoff „D-670 SB“. Werkstoff – Beschreibung / mech. & therm. Eigenschaften. Hg. v. Seilbahntechnische Artikel Schweri. Thun. Online verfügbar unter http://www.st-schweri.ch/app/download/2279971620/ST_BECORIT+Techn.Datenblatt_P.2.7005.pdf?t=1428393795.
- Seeber, Anton (2010): The Renaissance of the Cableway. St.Pauls / Eppan: Prokopp & Hechensteiner.
- Shitkow, D. G.; Pospechow, I. T. (1957): Drahtseile. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Staffler, Reinhold; Innerhofer, Alois (1996): Stählerne Stege. Der Seilbahnpionier Luis Zuegg. Meran: Edition Raetia.
- Steinbach, Gerhard (2007): Die Drehwirkung in Seiltrieben und das Verhalten der Drahtseilkonstruktionen. In: *Technische Überwachung* 48, September 2007 (9), S. 46–52.
- Stephan, Paul (1921): Drahtseilbahnen. Ihr Aufbau und ihre Verwendung. Wien: Springer-Verlag.
- Terriez, J. M.; Reineri, N. (1997): Berechnung des Seildralls einer Seilbahn. In: *Internationale Berg- und Seilbahn Rundschau (ISR)* (2), S. 6–8.
- Teufelberger GmbH (2013): Stahlseile für Seilbahnen. Seilbahnen und Pistengeräte. Hg. v. Teufelberger Seil Ges.m.b.H. Wels.
- Tietjen, Thorsten; Decker, André; Müller, Dieter H. (2011): FMEA-Praxis. Das Komplettpaket für Training und Anwendung. 3. überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- Traub, Sebastian (2011): Entwicklung und Konstruktion eines Sensors für Seilverdrehung. Studienarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Trennert, Robert A. (2001): Riding the High Wire. Aerial Mine Tramways in the West. Boulder: University Press of Colorado.
- Verreet, Roland (1996): Über das Drehverhalten von Drahtseilen. Hg. v. CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH. Kirkel.
- Verreet, Roland (2002): Eine kurze Geschichte des Drahtseils. Hg. v. CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH. Kirkel.
- Verreet, Roland (2005): Drahtseile vor Gericht. Hg. v. CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH. Kirkel.
- Vorarlberger Illwerke AG (Hg.) (1996): Panoramablicke. Die Golmerbahn im Montafon - Architektur, Technik, Kunst. 1. Aufl. Ostfildern-Ruit: Verlag Gerd Hatje.
- Weber, Tobias (2013): Beitrag zur Untersuchung des Lebensdauerverhaltens von Drahtseilen unter einer kombinierten Beanspruchung aus Zug, Biegung und Torsion. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Wehking, Karl-Heinz (2009): Automatische Detektierung und Klassifizierung äußerer Schädigungen von Drahtseilen zur Erhöhung der Betriebssicherheit. Abschlussbericht DFG Forschungsvorhaben WE 2187/15-1. Hg. v. IFT Universität Stuttgart. Stuttgart.

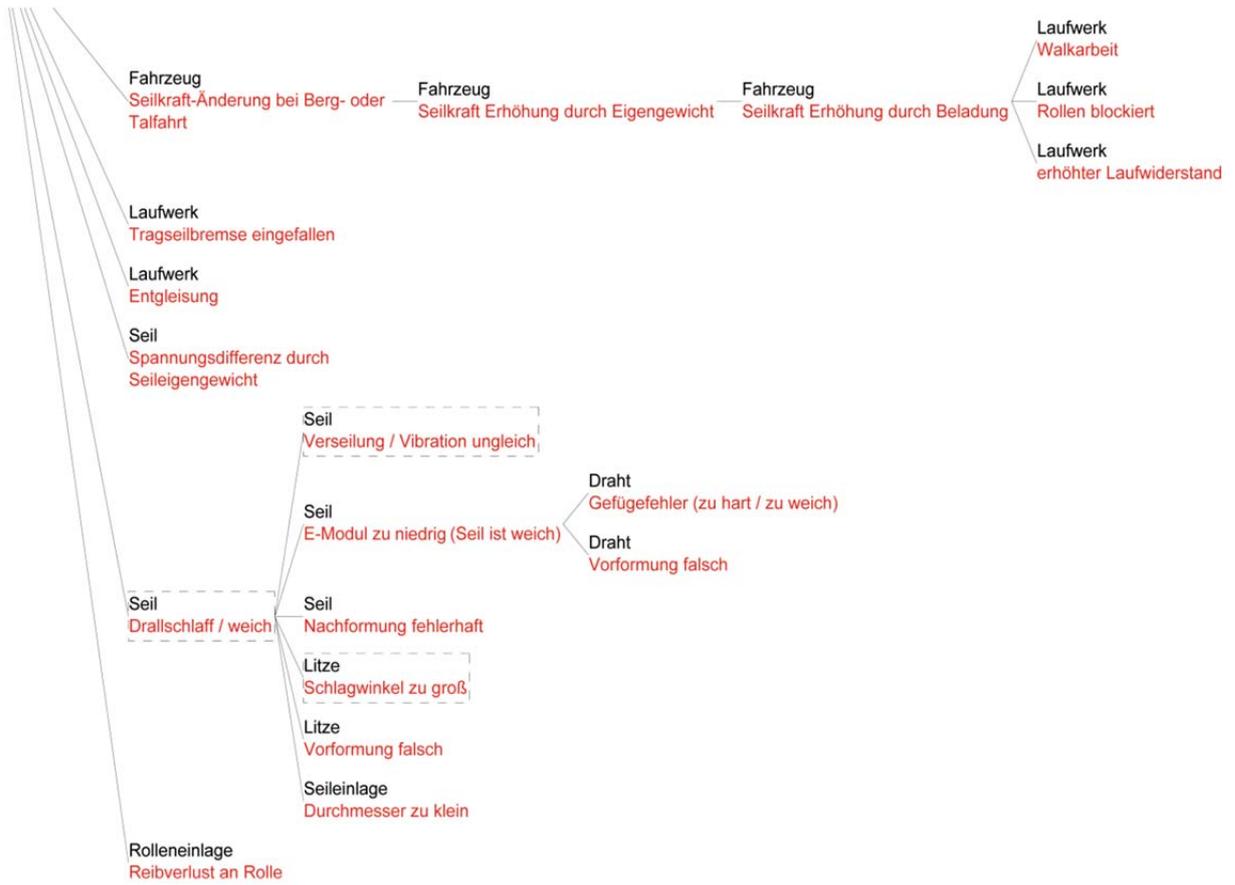
- Wehking, Karl-Heinz; Kühner, Konstantin; Winter, Sven (2013): Dem Seildrall auf der Spur. In: *Internationale Berg- und Seilbahnrundschau (ISR)* (01/2013).
- Wehking, Karl-Heinz; Moll, Dirk (2015): Verkehrserschließung urbaner Strukturen: Moderne Seilbahntechnik. In: Hanne Wolf-Kluthausen (Hg.): *Jahrbuch Logistik 2015*. Korschbroich: free beratung GmbH.
- Wehking, Karl-Heinz; Weber, Tobias (2012): Einfluss kombinierter Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchung auf die Lebensdauer und Ablegereife laufender Drahtseile. Abschlussbericht DFG Forschungsvorhaben WE 2187/24-1. Hg. v. IFT Universität Stuttgart. Stuttgart.
- Wehking, Karl-Heinz; Winter, Sven (2014): Vorlesung Seiltechnologie. Vorlesungsskript. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Weiskopf, Ulrich (2008): Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Werdich, Martin (2013): *FMEA - Einführung und Moderation*. 2., überarbeitete und verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Widmann, Michael (2013): Analyse von magnetinduktiven Seilprüfsignalen. Studienarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT).
- Winter, Sven (2006): *Handbuch Magnetinduktive Seilprüfung MIDAN*. Stuttgart.
- Winter, Sven (2013): *Laufende Seile*. Seminarunterlagen. Hg. v. Technische Akademie Esslingen. Esslingen.
- Wittel, Herbert; Muhs, Dieter; Jannasch, Dieter; Voßiek, Joachim (2013): *Roloff/Matek Maschinenelemente*. Normung, Berechnung, Gestaltung. 21. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Anhang

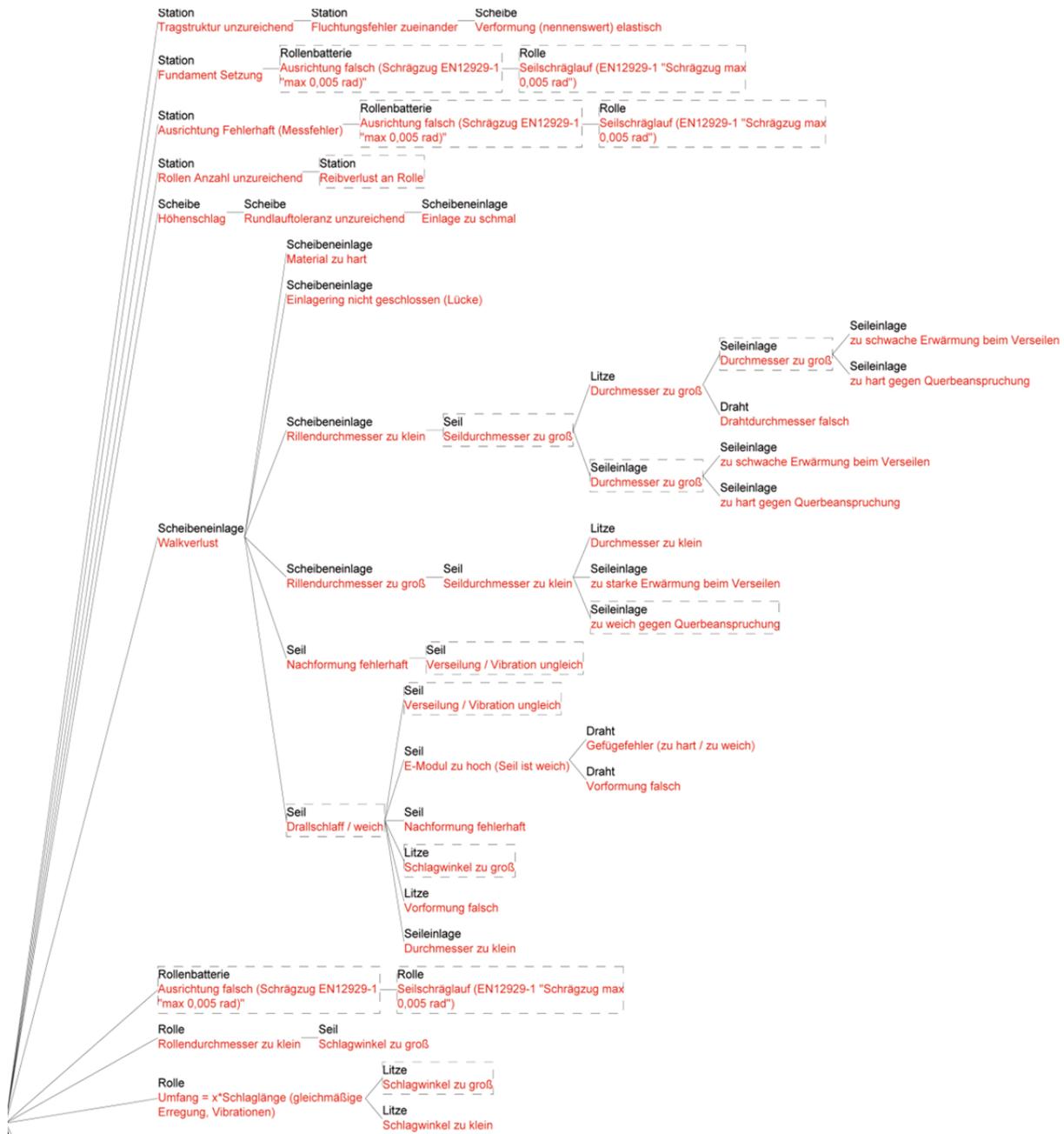
A1) Baumstrukturen der sortierenden Fehlerkategorien „Kraftänderung“ und „Walkarbeit“ der FMEA – zu Kapitel 5.1



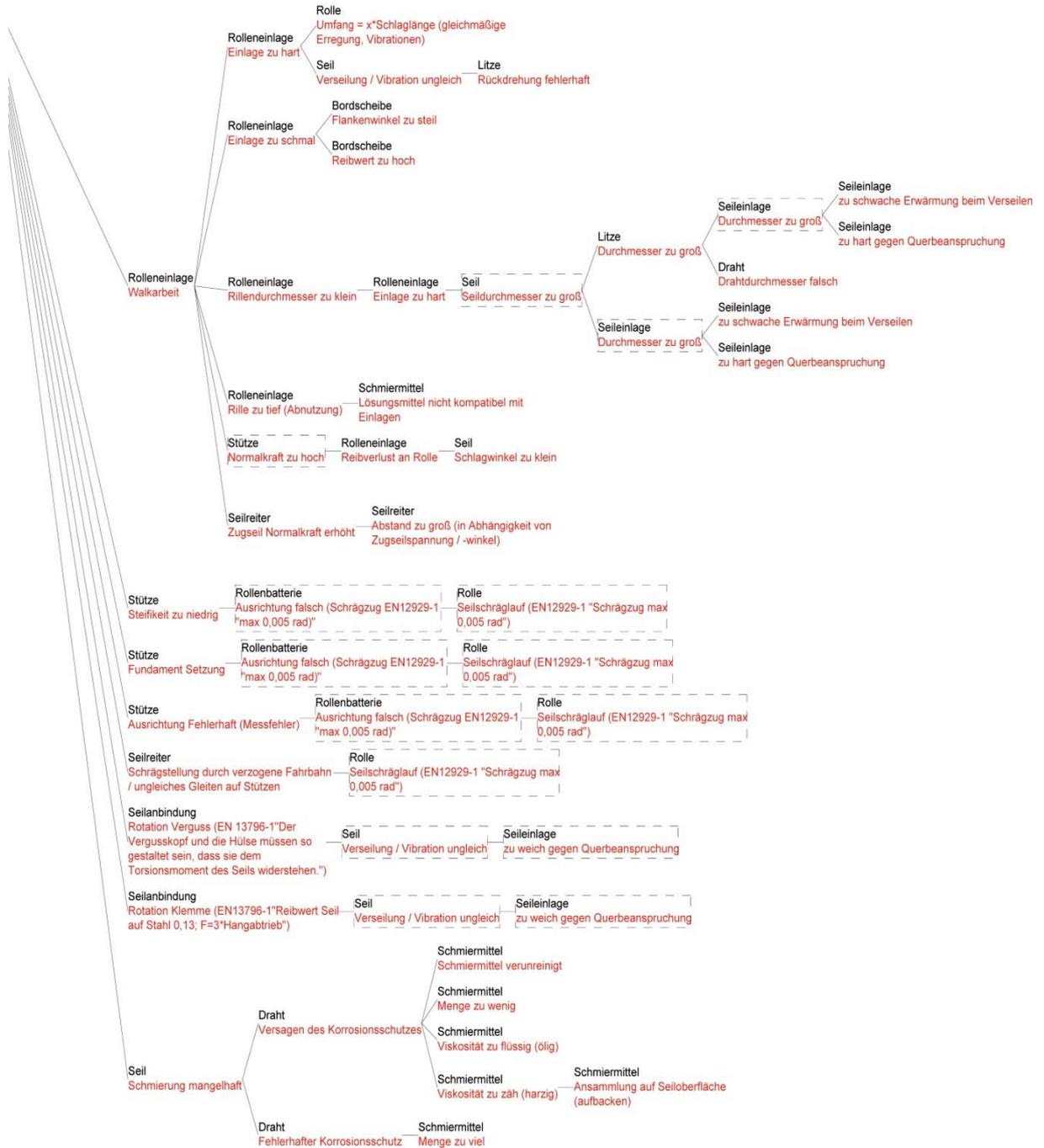
Ausschnitt (1) des Fehlerbaums (a) der FMEA für die Kategorie „Seil dreht durch Kraftänderung“



Ausschnitt (2) des Fehlerbaums (a) der FMEA für die Kategorie „Seil dreht durch Kraftänderung“

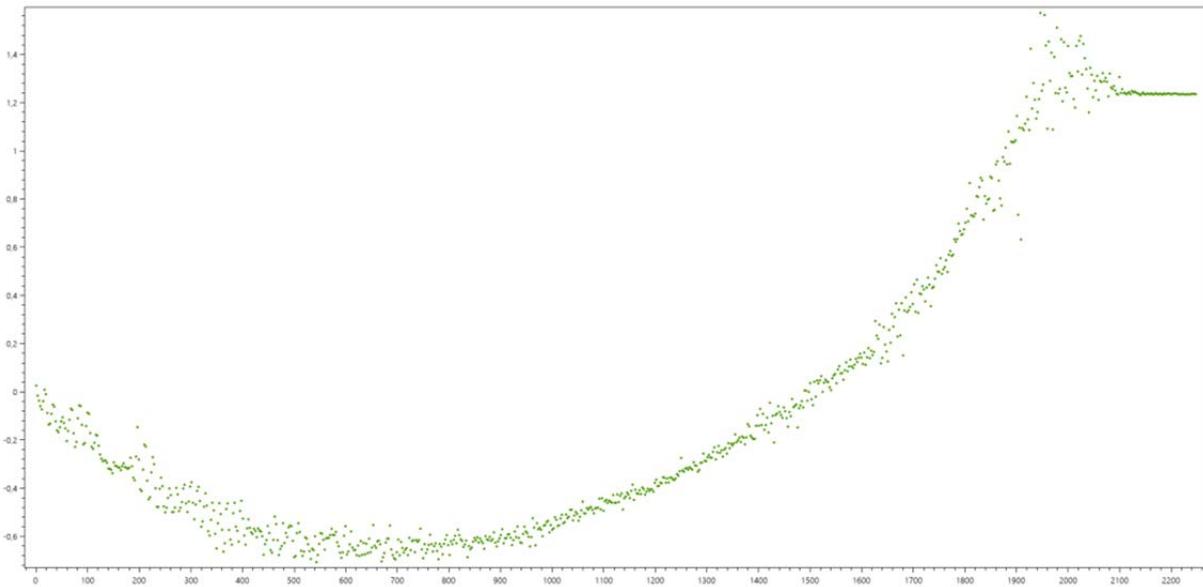


Ausschnitt (1) des Fehlerbaums (b) der FMEA für die Kategorie „Seil dreht durch Materialkontakt“

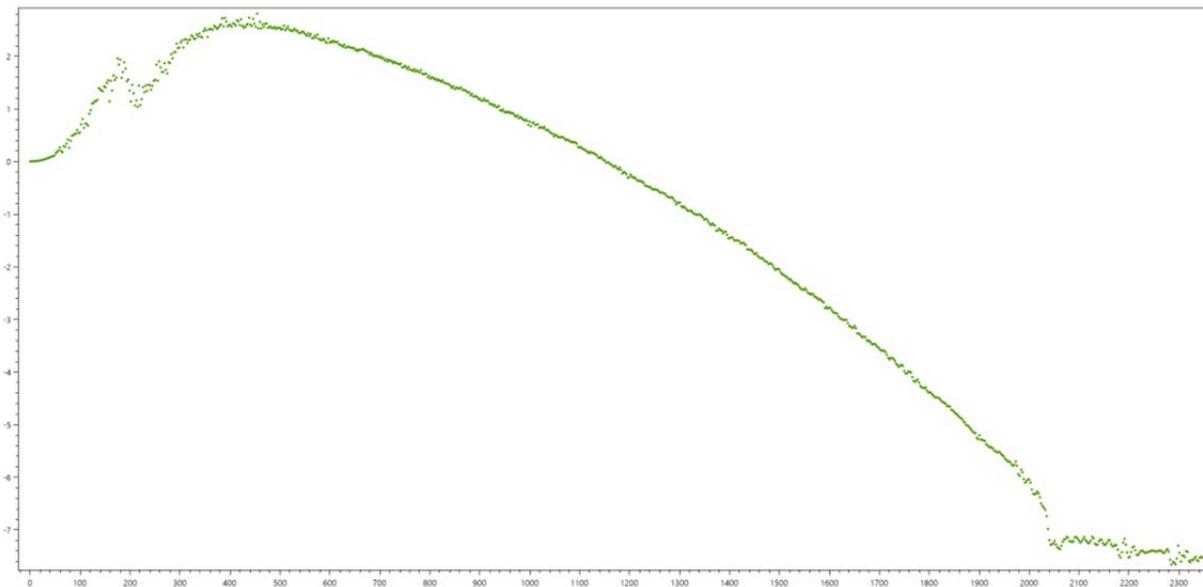


Ausschnitt (2) des Fehlerbaums (b) der FMEA für die Kategorie „Seil dreht durch Materialkontakt“

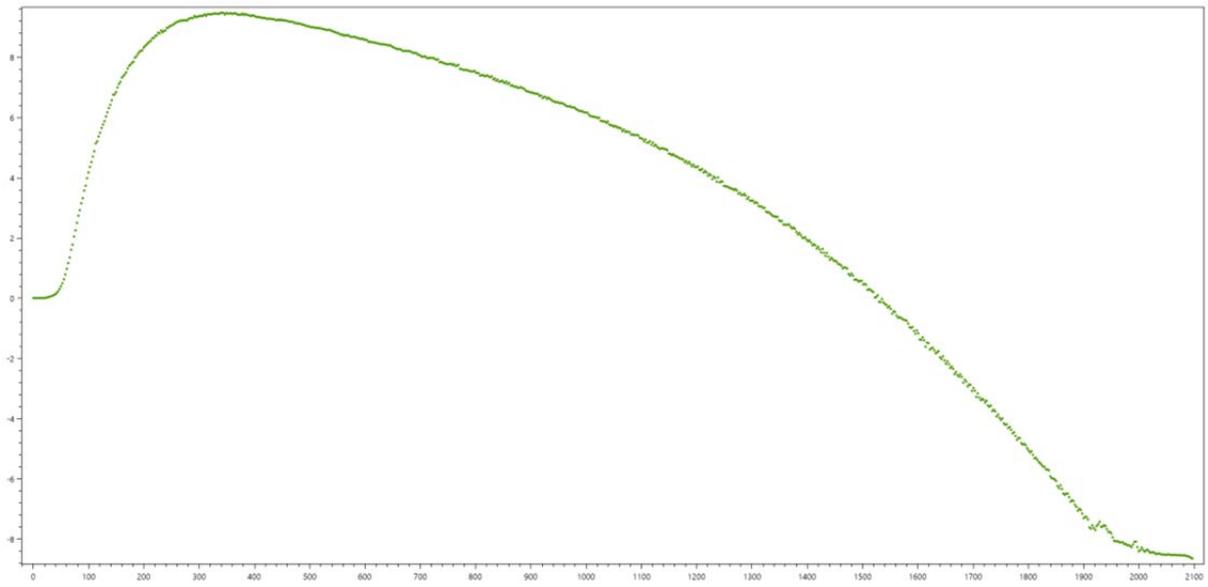
A2) ausgewählte Drehungsmessungen Pendel- und Umlaufbahnen – zu Kapitel 5.5



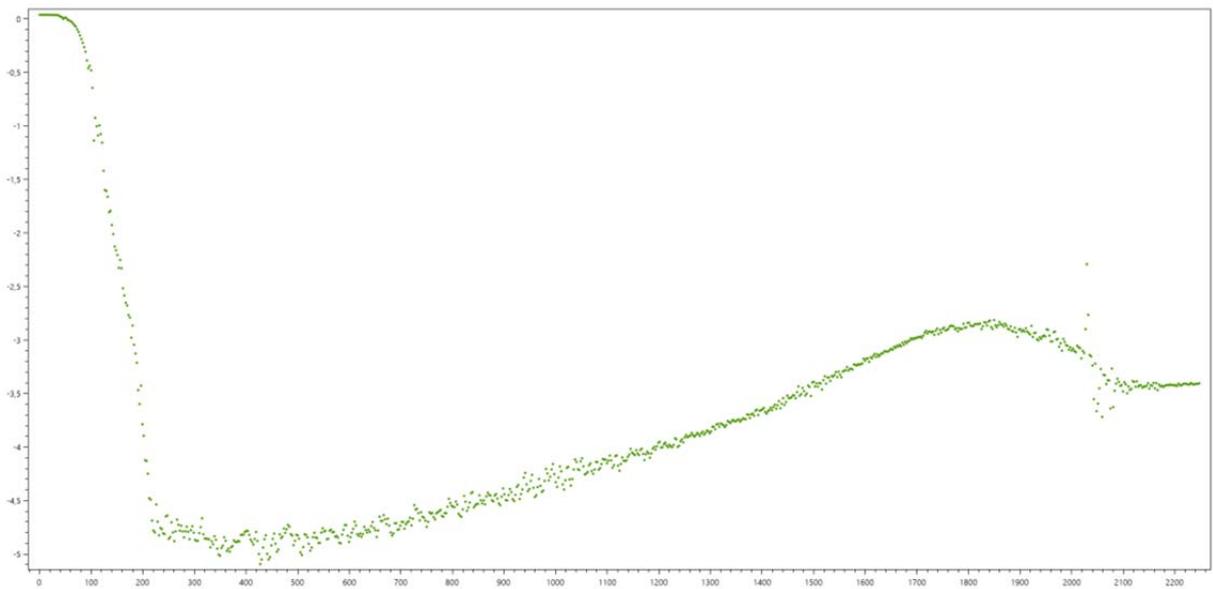
Bergfahrt oberes Zugseil einer Pendelbahn (A)



Talfahrt oberes Zugseil einer Pendelbahn (A)

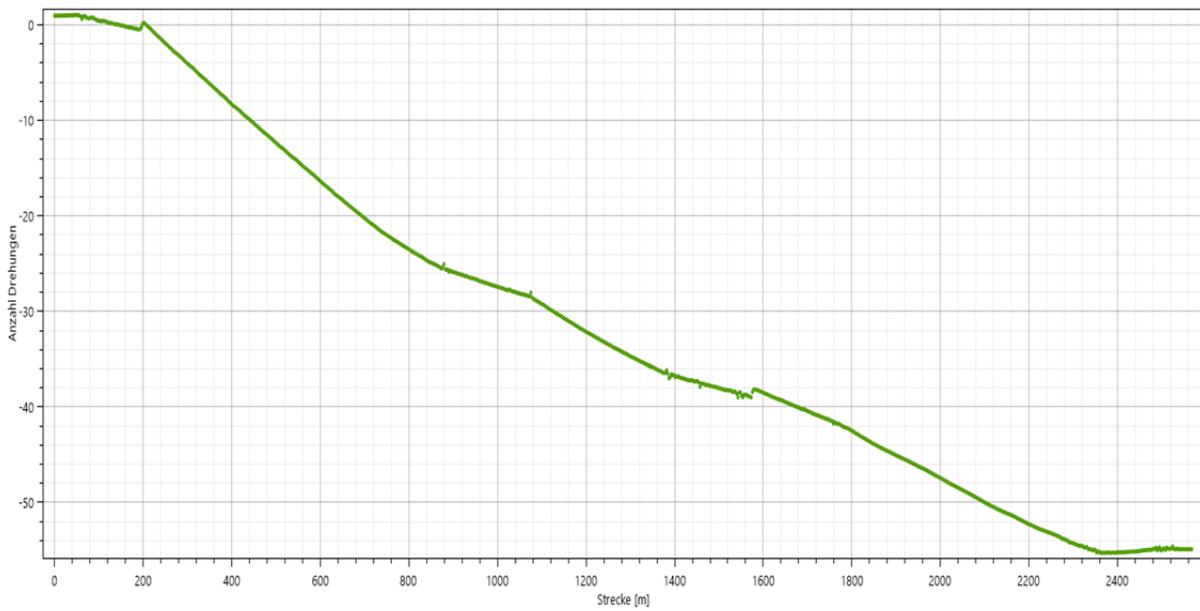


Bergfahrt unteres Zugseil einer Pendelbahn (A)

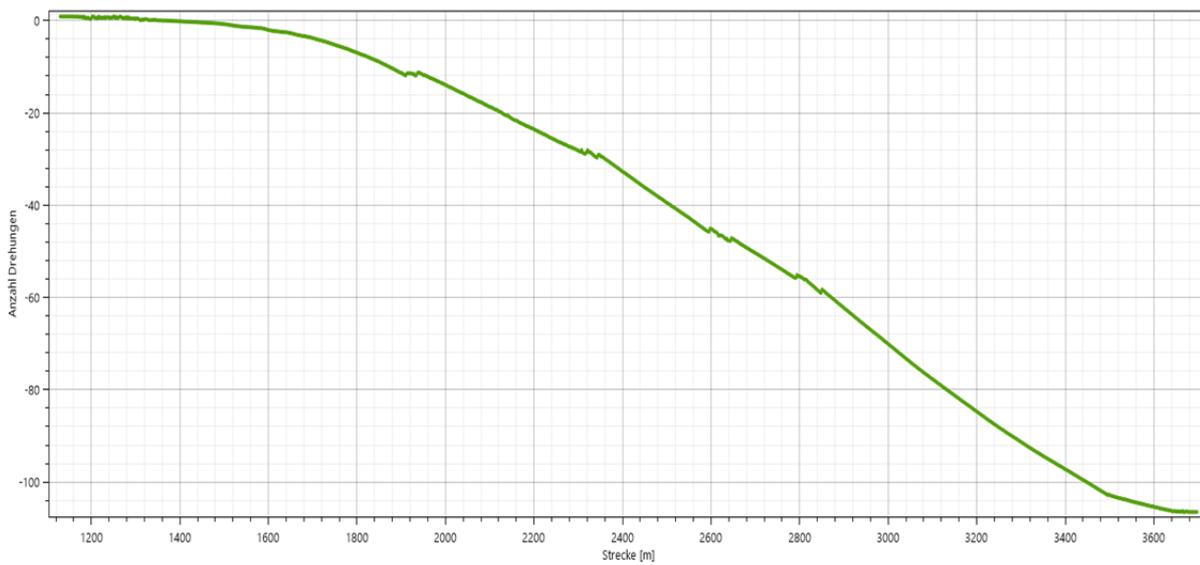


Talfahrt unteres Zugseil einer Pendelbahn (A)

Anhang



Drehungsmessung Bergfahrseite des Zugseils einer Zweiseilumlaufbahn



Drehungsmessung Talfahrseite des Zugseils einer Zweiseilumlaufbahn

A3) Ergänzende Fotos von Drehungsmessungen – zu Kapitel 5.4 und 5.5



Grüntenseilbahn, Rettenberg



Walmendingerhornbahn, Mittelberg (A)



Predigtstuhlbahn, Bad Reichenhall



Standseilbahn Waldfriedhof, Stuttgart

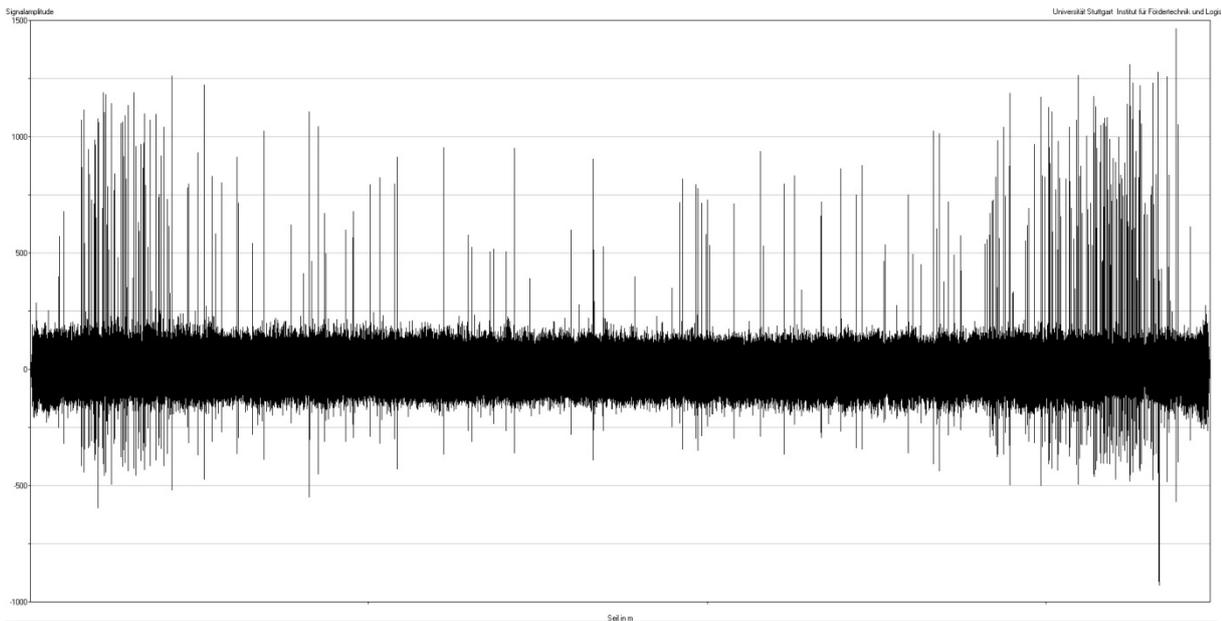


Fellhorn Gipfelbahn, Oberstdorf

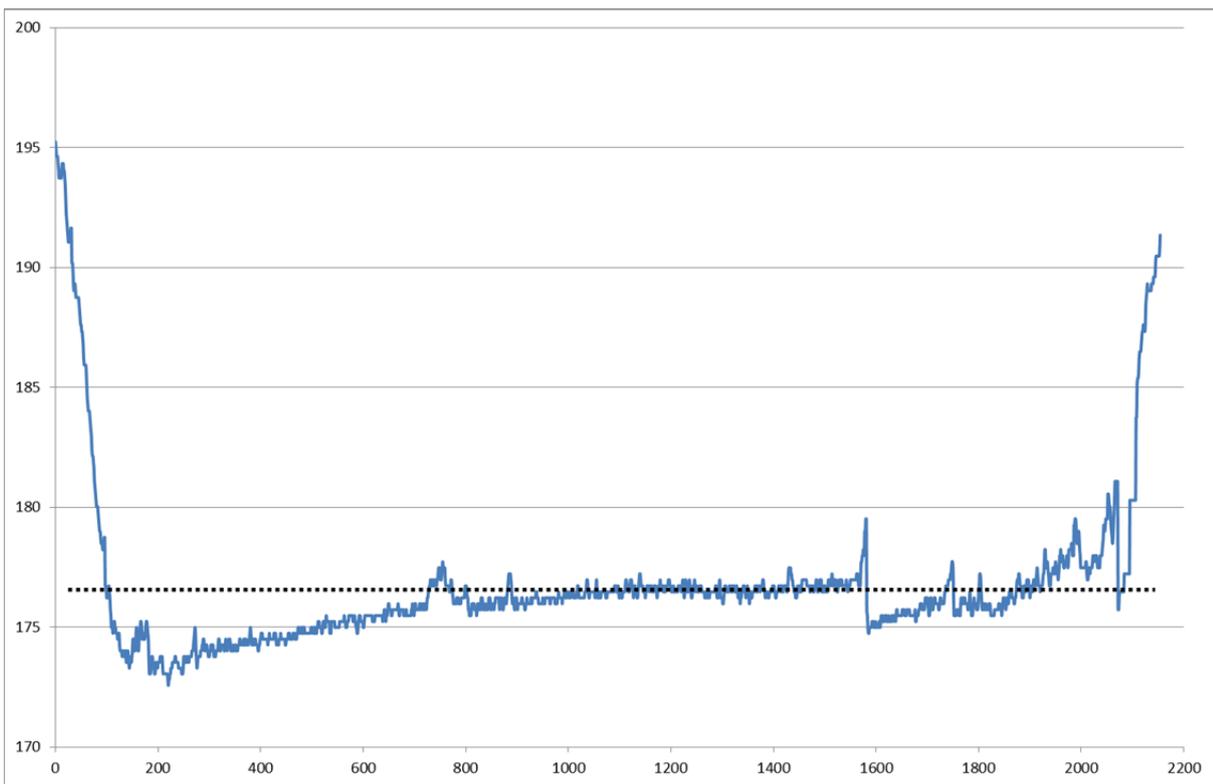


Hochfelln-Seilbahn I, Bergen/Chiemgau

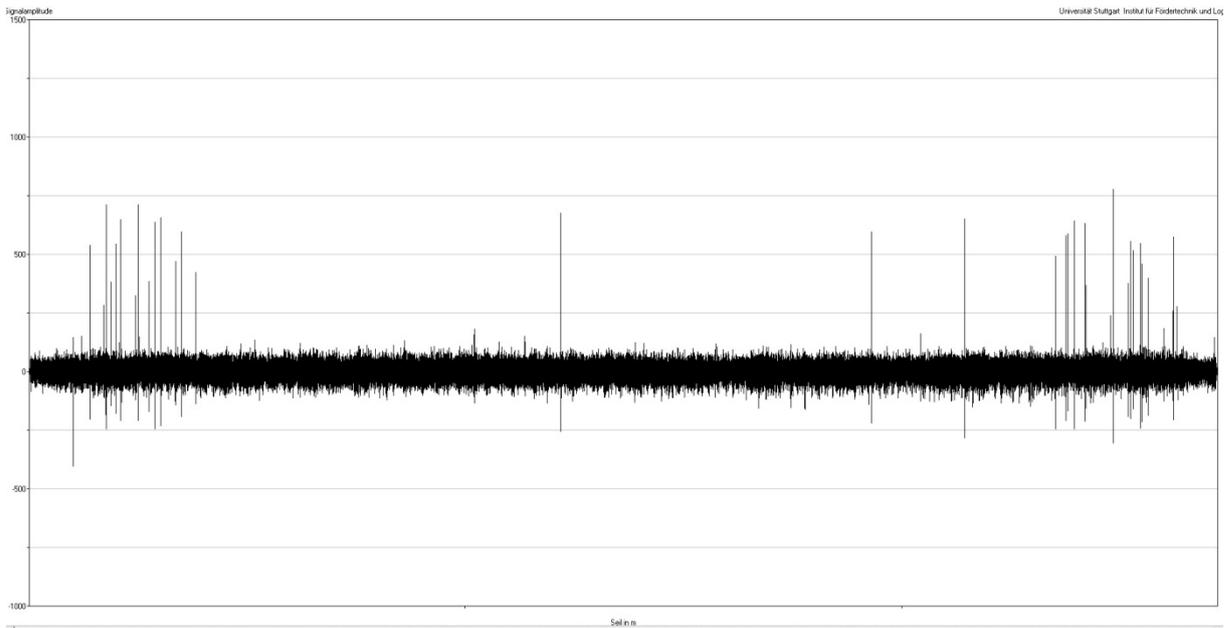
A4) Ausgewählte MI- und Schlaglängendiagramme – zu Kapitel 6.2



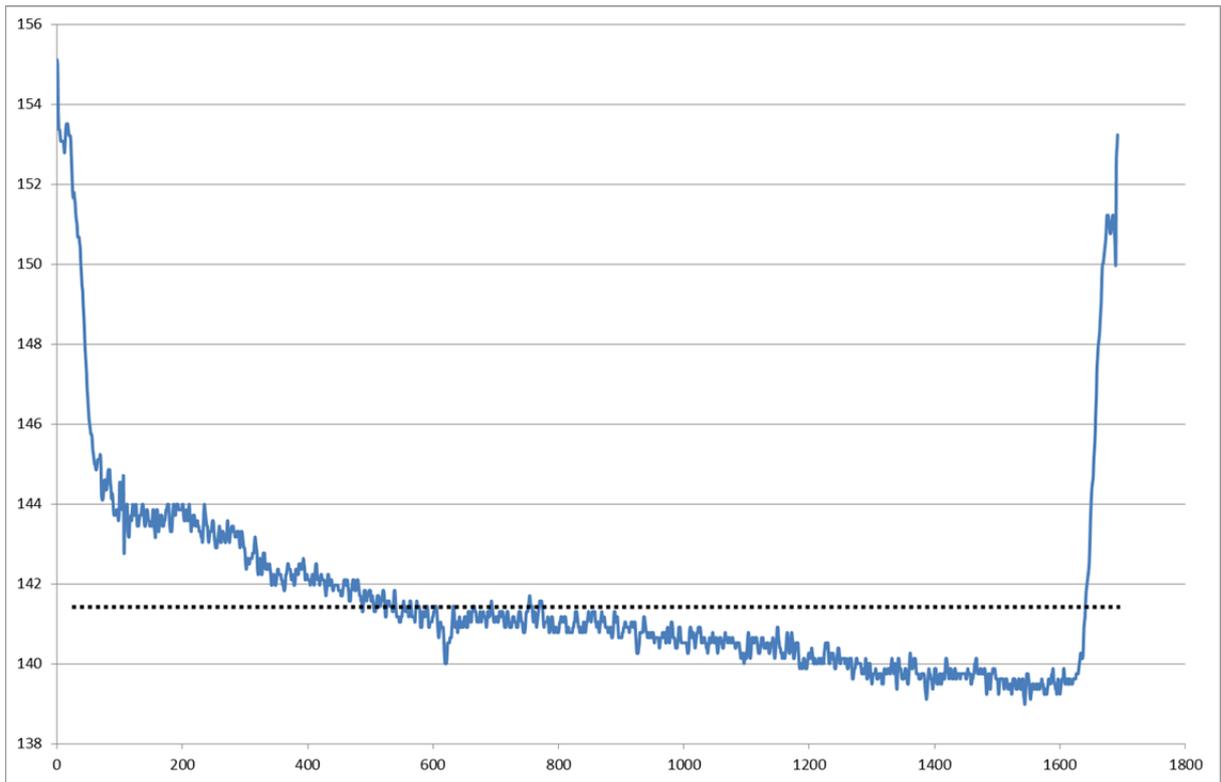
MI-Diagramm des unteren Zugseils einer Pendelbahn (B) kurz vor dem Ablegen



Zugehörige Schlaglängenkurve des unteren Zugseils einer Pendelbahn (B) kurz vor dem Ablegen mit Nennschlaglänge (•••••)



MI-Diagramm des unteren Zugseils der Pendelbahn (C)



Zugehörige Schlaglängenkurve des unteren Zugseils einer Pendelbahn (C) mit Nennschlaglänge (.....)

A5) Lebenslauf

Name: Konstantin Alexander Kühner

Geburtsdatum: 16. Juni 1983

Geburtsort: Siegen, Nordrhein-Westfalen

Familienstand: Verheiratet, zwei Kinder

Schule: 1989 – 1993 Jung-Stilling-Grundschule, Siegen-Weidenau
1993 – 2002 Fürst-Johann-Moritz-Gymnasium, Siegen
30.06.2002 Abschluss: Abitur

Studium: 2003 – 2009 Maschinenbaustudium an der
Universität Stuttgart
29.04.2009 Abschluss: Diplom-Ingenieur Maschinenbau

Berufliche Tätigkeit: 18.05.2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung
- 17.07.2017 Seiltechnologie, Institut für Fördertechnik und
Logistik, Universität Stuttgart
02.01.2013 Ernennung zum Sachverständigen nach
Landesseilbahngesetz in Baden-Württemberg
01.06.2014 Ernennung zum Gruppenleiter „Zerstörende
Seilprüfung“, Institut für Fördertechnik und
Logistik, Universität Stuttgart
ab 01.09.2017 Mitarbeiter Jakob GmbH, Ostfildern