Note: Headers (3 lines) are adjusted by the editor:
Conference proceedings innoTRAC 2024 OR innoTRAC Journal Volume 3 (2024), pp. 1–17
DOI *(if published in online innoTRAC Journal)*

Der Einfluss der Kombination von Stahl- und Kunststoffseilscheiben auf die Betriebs- und Lebensdauer von Stahlseilen: Eine vergleichende Biegeermüdungsstudie

M.Eng. Marco Elig[1*], Dr.-Ing. Marc Fuhrmann[1], B.Eng. Yeonhwan Bae[2]

[1] *R&D, KV R&D Center GmbH, Contwig, Rheinland-Pfalz, 66497, Deutschland*
[2] *Quality Conrtol, Kiswire Ltd., Busan, 46026, Rep. of Korea*
* *Correspondence: elig@kvrnd.com; Tel.: +49-151-258-286-98*
Version 30 May 2024 submitted to innoTRAC Journal

KURZFASSUNG In der modernen Seiltechnik, insbesondere bei Einscherungssystemen, gibt es einen deutlichen Trend zum Leichtbau, der den Einsatz von Kunststoffseilscheiben begünstigt. Trotz der attraktiven Gewichtseinsparungen, die mit Kunststoffseilscheiben verbunden sind, ist der Einsatz von mindestens einer Stahlscheibe in der Regel notwendig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Drahtbrüche an der Oberfläche von Stahlseilscheiben häufiger auftreten, was die Identifizierung des Endes der Betriebsdauer der Seile erleichtert. Die optimale Position dieser Stahlscheibe im Einscherungssystem von Hebeanwendungen und die Frage, ob eine einzige Stahlseilscheibe ausreichend ist, sind jedoch noch weitgehend ungeklärt. Außerdem kann nicht immer sichergestellt werden, dass ein Seilstück durch das gesamte Einscherungssystem bewegt wird. Das Hauptziel dieser Studie ist es daher, durch eine umfassende Biegeermüdungsuntersuchung einen Einblick in die Auswirkungen von Seilscheibenmaterialien und deren Positionierung auf die Seillebensdauer und Betriebsdauer zu gewinnen.

SCHLAGWORTE Lebensdauer, Betriebsdauer, Ablegereife, Seile, Stahlseilscheiben, Kunststoffseilscheiben

1. Der unerwartete Seilausfall an einem Kabelkran

Im Jahr 2019 kam es auf einer Baustelle, auf der ein Kabelkran arbeitete, zu einem unerwarteten Zwischenfall: Das Seil des Kabelkrans, welches erst drei Jahre zuvor installiert worden war, riss plötzlich während des Betriebs. Dies führte dazu, dass die Hakenflasche und die Last aus einer Höhe von über 100 Metern herabfielen.

Der Kabelkran, verfügte über insgesamt sieben Kunststoffseilscheiben, jeweils mit einem Durchmesser von 1,4 Metern und ein D/d-Verhältnis von 38, innerhalb seines Einscherungssystems, die der Betreiber aus Gründen der Gewichtsersparnis und zur

Verlängerung der Lebensdauer des Seils eingesetzt hatte. Gemäß ISO 16625 [1] platzierte der Betreiber weiterhin eine Stahlseilscheibe mit identischem Aufbau in das System.

Eine nachträglich durchgeführte Analyse des Einscherungssystems ergab, dass das Seil über die einzige im System verbaute Stahlseilscheibe nur eine geringe Anzahl an Biegewechseln durchlief. Andere Abschnitte des Seils, die über die Kunststoffseilscheiben geführt wurden, erfuhren eine deutlich höhere Anzahl an Biegewechseln.

Die Schadensanalyse des gebrauchten Seils, einem 8-litzigen verdichteten Seil mit unabhängiger Stahlseileinlage und einer Kunststoffzwischenlage, ergab, dass Teile des Seils verrostet waren und im Inneren erhebliche mechanische Abnutzung sowie Ermüdungsbrüche aufwiesen. Auch die innere Kunststoffummantelung des Seils war abgenutzt. Das Fehlen einer regelmäßigen Nachschmierung und die Verwendung eines schlecht eindringenden Schmiermittels trugen zu diesem Schadensbild bei. Die meisten Schäden wurden insbesondere an der Seileinlage und an der Unterseite der Außenlitzen festgestellt. Auf der Seiloberfläche wurden kaum Drahtbrüche gefunden, die Ablegereife des Seils war nicht sichtbar, was bedeutet, dass es keine vorzeitigen Anzeichen für ein bevorstehendes Seilversagen gab.

Sieht man vom möglichen negativen Einfluss fehlender Nachschmierung ab, ist das beobachtete Schadensbild typisch für Seile, die dem Einfluss großer D/d-Verhältnisse [2] und der Verwendung von Kunststoffseilscheiben [3] ausgesetzt sind. Die allgemeinen Umstände warfen jedoch die Frage auf, ob das plötzliche Seilversagen hätte vermieden werden können, wenn die Stahlseilscheibe im Einscherungssystem an einer anderen Position platziert worden wäre und ob eine solche Neuplatzierung einen Einfluss auf die Sichtbarkeit der Ablege Kriterien des Seils gehabt hätte.

Eine optimale Platzierung von Stahlseilscheibe innerhalb des Einscherungssystems einer Hebevorrichtung sowie die Frage, ob eine einzige Stahlseilscheibe ausreicht, sind jedoch noch weitgehend ungelöst. Außerdem ist es oft schwierig festzustellen, ob sich ein bestimmter Seilabschnitt durch das gesamte Einscherungssystem bewegt, was die Untersuchung noch komplexer macht.

Das primäre Ziel dieser Studie besteht darin, durch eine umfassende Untersuchung Erkenntnisse über die Auswirkungen zweier Materialien für Seilscheiben sowie deren Positionierung auf die Lebensdauer und Betriebsdauer von Seilen zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen Aufschluss darüber geben, ob eine einzelne Stahlseilscheibe in einem System, das ansonsten aus Kunststoffseilscheiben besteht, ausreichend ist und, falls ja, wie die optimale Position für diese Stahlseilscheibe definiert werden sollte. Diese Studie soll einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Auswirkungen von Seilscheibenmaterialien und deren Anordnung auf die Leistung, Lebensdauer und Sicherheit von Seilen in Einscherungssystemen leisten.

2. Versuchsaufbau & Methodik

In der Studie wurde ein fortschrittliches Maschinenkonzept zur Prüfung von Seilen auf Biegeermüdung eingesetzt, welches sich deutlich von den herkömmlichen Prüfmethoden unterscheidet. Wie in **Abbildung 1** zu sehen ist, besteht das Herzstück dieser Maschine aus einem System mit fünf Seilscheiben, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen können. Im Gegensatz zu herkömmlichen Prüfmaschinen, die das Seil über eine einzige Seilscheibe umlenken, schafft dieser Ansatz realistischere Prüfbedingungen, insbesondere im Hinblick auf den Einfluss der Positionierung unterschiedlicher Seilscheibenmaterialien in einem Einscherungssystem.

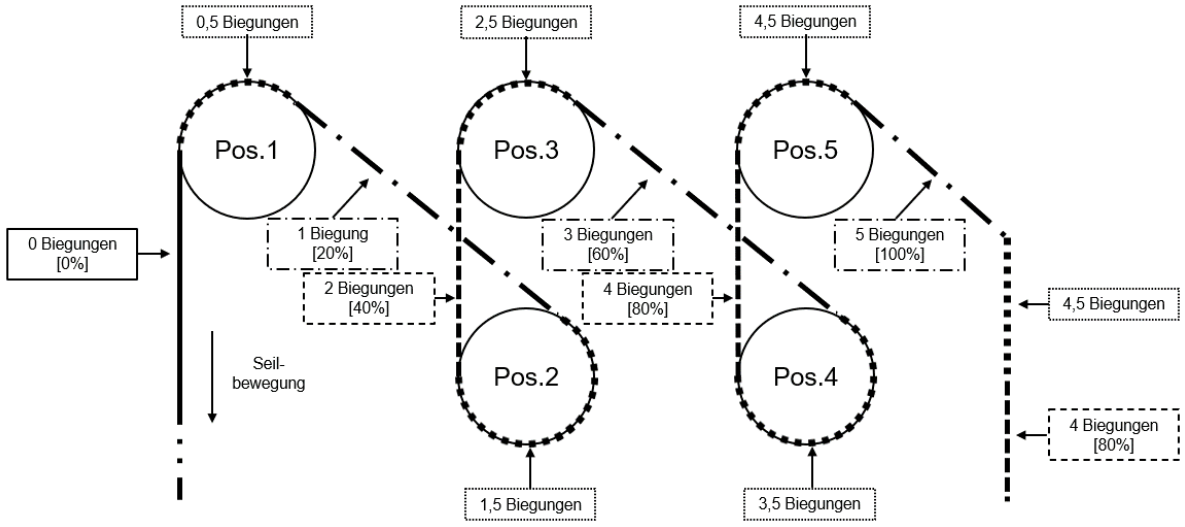


Abbildung 1: Aufbau der Biegeermüdungsmaschine

Diese spezielle Biegeermüdungsprüfmaschine ermöglicht die Prüfung von Seilen unter kontrollierten Bedingungen, wobei der Schwerpunkt, auf dem am stärksten beanspruchten Abschnitts des Seils liegt. In diesem Bereich wird das Seil zehn Mal pro Maschinenzyklus (100 %) umgelenkt, während die angrenzenden Bereiche eine abnehmende Anzahl von Umlenkungen (80 %, 60 %, 40 %, 20 %) erfahren, wie in **Abbildung 2** dargestellt.

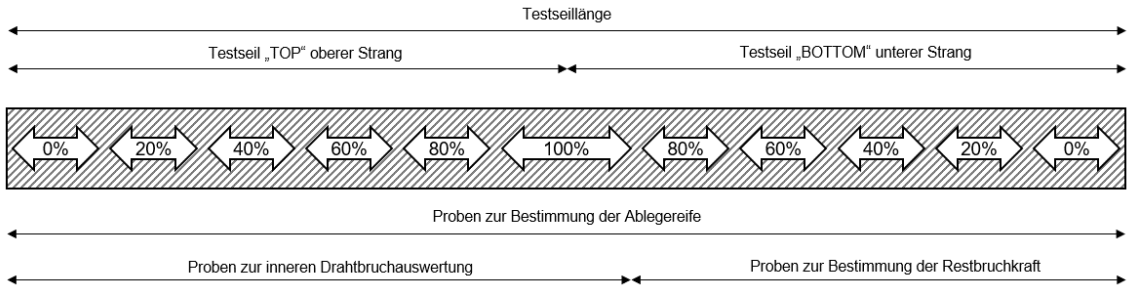


Abbildung 2: Schema der Biegeermüdungsprüfungsauswertung

Darüber hinaus ermöglicht die Konstruktion der Prüfmaschine eine kontinuierliche Messung verschiedener Seileigenschaften und eine detaillierte Analyse, sowohl der äußeren und inneren Seilschäden als auch der tatsächlichen Bruchkräfte der Seile in verschiedenen Phasen ihres Lebenszyklus. Eine detaillierte Beschreibung des Konzepts ist in [4] zu finden.

Die in der experimentellen Untersuchung angewandten spezifischen Prüfparameter, die verwendeten Prüfscheiben und die untersuchte Seilkonstruktion sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt (**Tabelle 1**):

Tabelle 1: Prüfmaterialien & Parameter

Seil			**Seilscheiben**		**Parameter**	
Konstruktion	8 x K26WS EPIWRC		Stahl	Kunststoff	Sicherheits-Faktor SF	8.33
Nennseil-durchmesser d	16 mm	Material	42CrMo4	PA66	Seil-geschwindig-keit v	1,15 m/s
Schlagrichtung	RHOL	Härte	53[1]	160/125[2]		
Veredelung	verzinkt	D/d-Verhältnis	20	20		
Nominelle Seilfestigkeit R_0	1960 N/mm²	r/d-Verhältnis	0.53	0.53		
RCN-Klasse	09	Öffnungs-winkel	60°	60°		
Ablegereife nach ISO 4309						
Anzahl erlaubter Drahtbrüche, Referenzlänge 6d	9					
Anzahl erlaubter Drahtbrüche, Referenzlänge 30d	18					

Ziel war es, die Testumgebung so realistisch wie möglich zu gestalten, um einen Vergleich mit dem Kabelkran aus **1** und vorhandenen internen Datensätzen zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurden die Versuchsparameter sorgfältig ausgewählt und angepasst. Die Seilkonstruktion des 8-litzigen Seils ist identisch mit jener des im ersten Kapitel beschriebenen Kabelkrans, wobei der Seildurchmesser speziell angepasst wurde, um eine optimale Kompatibilität mit der Peripherie der ausgewählten Testmaschine zu gewährleisten.

Die Materialien und die Geometrie der Prüfscheiben wurden sorgfältig an die in der Krananlage verwendeten angepasst. Das D/d-Verhältnis wurde von 38 auf einen Wert von 20 reduziert, um die Prüfzeit zu verkürzen und typische Krananwendungen widerzuspiegeln, bei denen D/d-Verhältnisse von etwa 20 üblich sind.

Dadurch war es möglich, sich auf das Hauptanliegen der Studie zu konzentrieren: den Einfluss der Position und der Anzahl von Stahl- und Kunststoffseilscheiben auf die Lebensdauer und die Betriebsdauer von Drahtseilen. Diese Fokussierung ist

[1] HRC

[2] $H_{358/30}$ nach ISO 2039-1

entscheidend, um spezifische Erkenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Seil und Seilscheiben zu gewinnen und damit ein tieferes Verständnis der Materialeigenschaften und Versagenskriterien zu erlangen.

Um dieses Ziel umfassend zu erreichen, wurden insgesamt sechs spezifische Versuche durchgeführt. Diese basierten auf den in **Tabelle 1** aufgeführten Materialien und Parametern sowie den in **Tabelle 2** bis **Tabelle 7** dargestellten Anordnungen der Seilscheiben in der Prüfmaschine.

Im ersten Ansatz wurde jeweils ein Versuch mit einer kompletten Seilscheibenanordnung nur aus Stahlseilscheiben (**Tabelle 3**) und nur aus Kunststoffseilscheiben (**Tabelle 4**) durchgeführt. Diese dienten als Referenzwerte hinsichtlich Seillebensdauer, Ablegereife, der inneren Schädigung und der Restbruchkraft der verschiedenen Lebensphasen des Seils für die weiteren Untersuchungen.

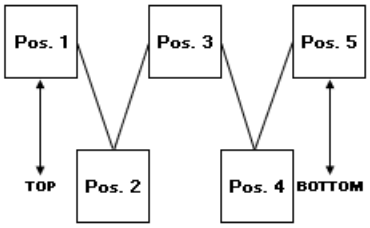
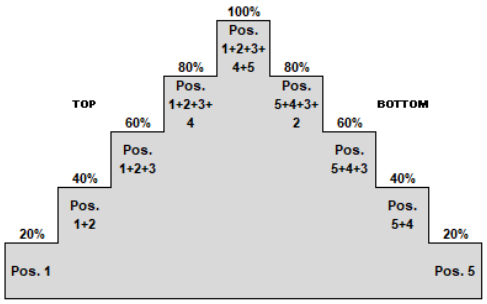
Anschließend wurde die Kunststoffseilscheibe in der Mitte (Pos. 3) durch eine Stahlseilscheibe ersetzt, um eine symmetrische Anordnung zu erhalten (**Tabelle 5**). Damit sollte ein Einscherungssystem simuliert werden, in dem einige Seilabschnitte ausschließlich über Kunststoffscheiben laufen, während andere Abschnitte, die zuvor durch die Kunststoffscheiben beschädigt wurden, anschließend über eine Stahlseilscheibe und weitere Kunststoffseilscheiben laufen.

In einem weiteren Versuchsaufbau (**Tabelle 6**) wurde die erste Kunststoffseilscheibe (Pos. 1) durch eine Stahlseilscheibe ersetzt, was zu einer asymmetrischen Anordnung führte. Somit wurde sichergestellt, dass das Seil während seiner gesamten Lebensdauer in allen Abschnitten durch eine Stahlscheibe beschädigt wird.

Die letzte Anordnung (**Tabelle 7**) unterscheidet sich von der vorhergehenden dadurch, dass auch die zweite Seilscheibe (Pos. 2) ebenfalls durch eine Stahlseilscheibe ersetzt wurde.

Dieser Ansatz erlaub eine Betrachtung der Seilscheibenanordnung als Gesamtsystem und als Individualsystem, jeweils in Abhängigkeit der Anzahl verwendeter Stahlseilscheiben.

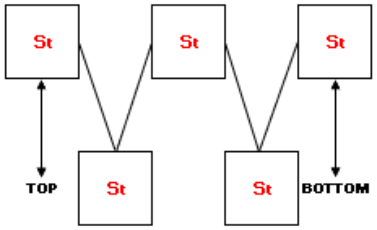
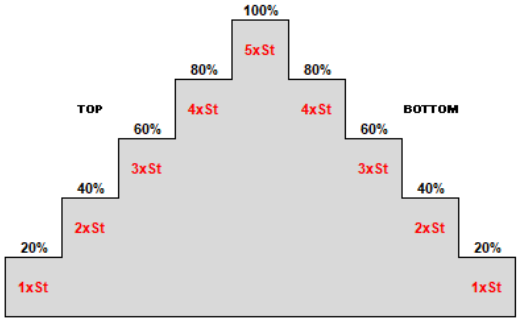
Tabelle 2: Allgemeine Test-Methodik

Seilscheibenanordnung	**Biegezonen**
	

Anzahl St.[3]	**% St.**[4]	**Anzahl Pl.**	**% Pl.**	**Lebensdauer**	**Biegefolge**[5]

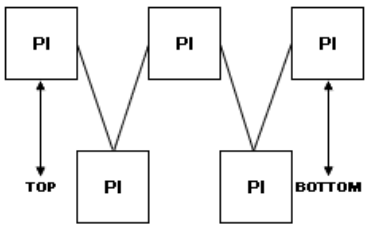
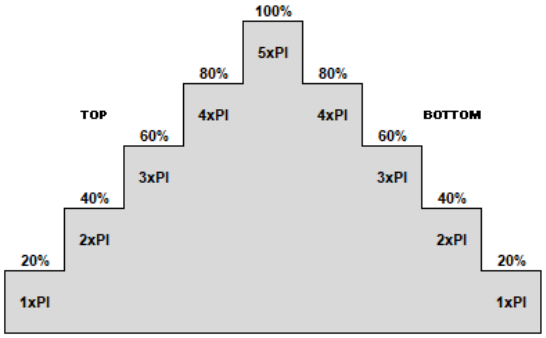
[3] St. = Seilscheiben aus Stahl
[4] Pl. = Seilscheiben aus Kunststoff
[5] je Maschinenzyklus 10 Biegewechsel

Tabelle 3: Test-Methodik Test 1

Seilscheibenanordnung (Test 1)	Biegezonen
	

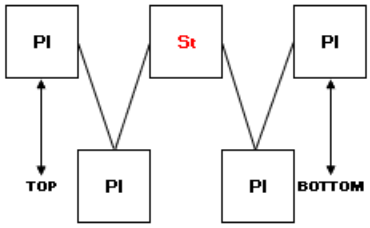
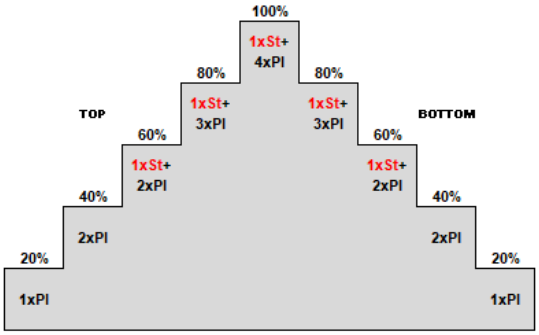
Anzahl St.	% St.	Anzahl Pl.	% Pl.	Lebensdauer		Biegefolge	
2	100%	0	0%	20%	-	St	St
4	100%	0	0%	40%	-	St-St	St-St
6	100%	0	0%	60%	-	St-St-St	St-St-St
8	100%	0	0%	80%	-	St-St-St-St	St-St-St-St
10	100%	0	0%	100%-100%		St-St-St-St-St-St-St-St-St-St	
8	100%	0	0%	-	80%	St-St-St-St	St-St-St-St
6	100%	0	0%	-	60%	St-St-St	St-St-St
4	100%	0	0%	-	40%	St-St	St-St
2	100%	0	0%	-	20%	St	St

Tabelle 4: Test-Methodik Test 2

Seilscheibenanordnung (Test 2)	Biegezonen
	

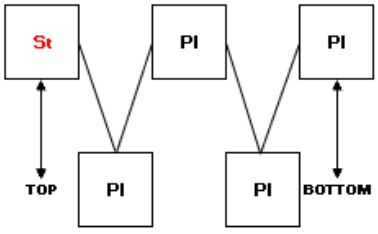
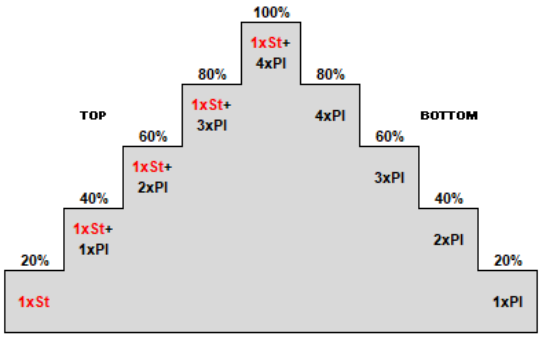
Anzahl St.	% St.	Anzahl Pl.	% Pl.	Lebensdauer		Biegefolge	
0	0%	2	100%	20%	-	Pl	Pl
0	0%	4	100%	40%	-	Pl-Pl	Pl-Pl
0	0%	6	100%	60%	-	Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl
0	0%	8	100%	80%	-	Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl
0	0%	10	100%	100%-100%		Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl	
0	0%	8	100%	-	80%	Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl
0	0%	6	100%	-	60%	Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl
0	0%	4	100%	-	40%	Pl-Pl	Pl-Pl
0	0%	2	100%	-	20%	Pl	Pl

Tabelle 5: Test-Methodik Test 3

Seilscheibenanordnung (Test 3)	Biegezonen
	

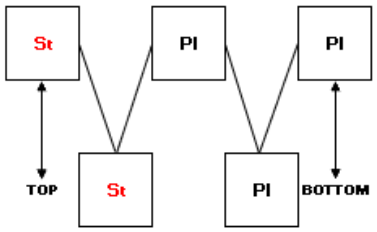
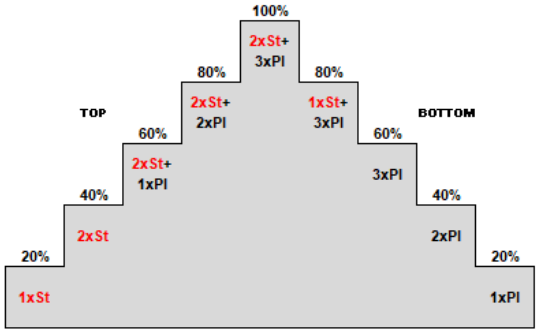
Anzahl St.	% St.	Anzahl Pl.	% Pl.	Lebensdauer		Biegefolge	
0	0%	2	100%	20%	-	Pl	Pl
0	0%	4	100%	40%	-	Pl-Pl	Pl-Pl
2	33,33%	4	66,67%	60%	-	Pl-Pl-St	St-Pl-Pl
2	25%	6	75%	80%	-	Pl-Pl-St-Pl	Pl-St-Pl-Pl
2	20%	8	80%	100%-100%		Pl-Pl-St-Pl-Pl-Pl-Pl-St-Pl-Pl	
2	25%	6	75%	-	80%	Pl-Pl-St-Pl	Pl-St-Pl-Pl
2	33,33%	4	66,67%	-	60%	Pl-Pl-St	St-Pl-Pl
0	0%	4	100%	-	40%	Pl-Pl	Pl-Pl
0	0%	2	100%	-	20%	Pl	Pl

Tabelle 6: Test-Methodik Test 4

Seilscheibenanordnung (Test 4)	Biegezonen
	

Anzahl St.	% St.	Anzahl Pl.	% Pl.	Lebensdauer		Biegefolge	
2	100%	0	0%	20%	-	St	St
2	50%	2	50%	40%	-	St-Pl	Pl-St
2	33,33%	4	66,67%	60%	-	St-Pl-Pl	Pl-Pl-St
2	25%	6	75%	80%	-	St-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-St
2	20%	8	80%	100%-100%		St-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-St	
0	0%	8	100%	-	80%	Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl
0	0%	6	100%	-	60%	Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl
0	0%	4	100%	-	40%	Pl-Pl	Pl-Pl
0	0%	2	100%	-	20%	Pl	Pl

Tabelle 7: Test-Methodik Test 5

Seilscheibenanordnung (Test 5)	Biegezonen
	

Anzahl St.	% St.	Anzahl Pl.	% Pl.	Lebensdauer		Biegefolge	
2	100%	0	0%	20%	-	St	St
4	100%	0	0%	40%	-	St-St	St-St
4	66,67%	2	33,33%	60%	-	St-St-Pl	Pl-St-St
4	50%	4	50%	80%	-	St-St-Pl-Pl	Pl-Pl-St-St
4	40%	6	60%	100%	-100%	St-St	Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-Pl-St-St
2	25%	6	75%	-	80%	Pl-Pl-Pl-St	St-Pl-Pl-Pl
0	0%	6	100%	-	60%	Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl
0	0%	4	100%	-	40%	Pl-Pl	Pl-Pl
0	0%	2	100%	-	20%	Pl	Pl

3. Ergebnisse

Diese, im vorigen Abschnitt erwähnte gründliche Vorgehensweise, sollte eine genaue und zuverlässige Auswertung der Untersuchung gewährleisten. Der primäre Fokus lag auf der Bestimmung des Einflusses der Positionierung und der Anzahl der Kunststoff- und Stahlseilscheiben auf die Betriebs- und Lebensdauer sowie auf die innere Schädigung des Seils.

Zu diesem Zweck wurde die Ermüdung des Seils in der gewählten Seilscheibenandordnung so lange aufrechterhalten, bis entweder ein Versagen einer Außenlitze festgestellt wurde oder eine signifikante Zunahme der Dehnung innerhalb einer vordefinierten Zeitspanne auftrat, was auf ein mögliches Versagen der Seileinlage hinweist.

Nach Abschluss der Prüfungen wurde eine sorgfältige Bewertung des allgemeinen Zustands des Seils vorgenommen und die verbleibende Bruchlast einiger Abschnitte bestimmt. Diese Bewertung basierte auf der Untersuchung der einzelnen Abschnitte, die in **Abbildung 2** dargestellt sind, und erfolgte in Übereinstimmung mit den Richtlinien der ISO 4309 [5].

Die aus den verschiedenen Versuchsanordnungen gewonnenen Ergebnisse der Biegeermüdung sind in **Tabelle 8** dargestellt:

Tabelle 8: Ergebnisse der Biegeermüdungsprüfungen (tabellarisch)

Biegefolge		Lebensdauer N	Ablegereife N_{A30d}[6]		Test Label[7]	Test Nr.
St-St-St-St-St	St-St-St-St-St	242590	127164	52%	1^T	1
			102320	42%	1^B	
Pl-Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl-Pl	632290	619644	98%	2^T, 2^B	2
Pl-Pl-St-Pl-Pl	Pl-Pl-St-Pl-Pl	433750	433750	100%	3-1^T, 3-1^B	3-1
		414930	402482	97%	3-2^T, 3-2^B	3-2
St-Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl-St	511000	112420	22%	4^T	4
St-St-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-St-St	411500	102875	25%	5^T	5

3.1. Betrachtung der einzelnen Versuchsaufbauten als Gesamtsystem

In den folgenden Abschnitten wird jede Versuchsanordnung als eigenständiges System betrachtet, d. h. als ob es sich um ein Kransystem handeln würde, welches mit der gleichen Anzahl von Seilscheiben und Materialien ausgestattet ist, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

Vergleich der verschiedenen Seilscheibenanordnungen

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der Versuche aus **Tabelle 8** in grafischer Form.

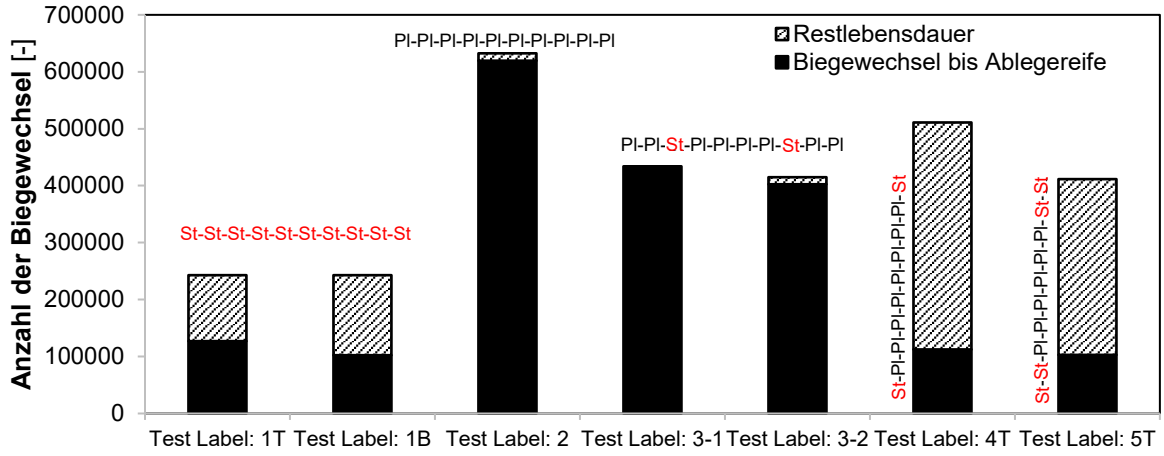


Abbildung 3: Ergebnisse der Biegeermüdungsprüfungen (grafisch)

Im Vergleich zum System mit nur Stahlseilscheiben (1T, 2T), erhöht sich die Lebensdauer des Seils bis zum Versagen um den Faktor 2,61 und die Zeit bis zum Erreichen der Ablegereife um den Faktor 5,40, wenn nur Kunststoffseilscheiben (2) verwendet werden. Zudem erreicht das Seil unter der ausschließlichen Verwendung von

[6] Betrachtet wird nur die Referenzlänge 30d
[7] ^{T} =TOP, ^{B} =BOTTOM nach Abbildung 2

Stahlseilscheiben eine durchschnittliche Restlebensdauer von 53 %, während das Seil, welches nur über Kunststoffseilscheiben umgelenkt wird, nur 2 % erreicht.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der ausschließlichen Nutzung von Kunststoffseilscheiben (2) mit jenen, bei denen die Stahlseilscheibe in der Mitte (3-1, 3-2) positioniert wurde, zeigt sich, dass die Restlebensdauer in beiden Konfigurationen nahezu nicht vorhanden ist, d. h., das Seil versagt plötzlich. Wenn die Seilscheibe in der Mitte (Position 3) durch eine Stahlscheibe ersetzt wird, verringert sich die Lebensdauer des Seils auf 67 %.

Bei jenen Konfigurationen, die sicherstellen, dass das Seil während der gesamten Lebensdauer durch mindestens eine Stahlscheibe in jedem Abschnitt beschädigt wird, erhöht sich die Lebensdauer des Seils um den Faktor 1,20 (4T) bzw. reduziert sich auf 97% (5T) und die Ablegereife der Seile konnte deutlich erkannt werden, verglichen mit der Konfiguration, in der die Kunststoffscheibe durch eine Stahlscheibe in der Mitte (3-1, 3-2) ersetzt wurde.

Weiterhin anzumerken ist hierbei, dass die Ablegereife des Seils bei beiden Seilscheibenanordnungen auf der/den Stahlseilscheibe zu erkennen ist.

Einfluss der Anzahl der Stahlseilrollen und ihrer Position

Abbildung 4 zeigt den Einfluss des prozentualen Anteils verwendeter Stahlseilscheiben im Gesamtsystem auf die ertragbaren Biegewechsel bis zum Ablegen und Versagen des Seils, basierend auf den Daten aus **Tabelle 8**.

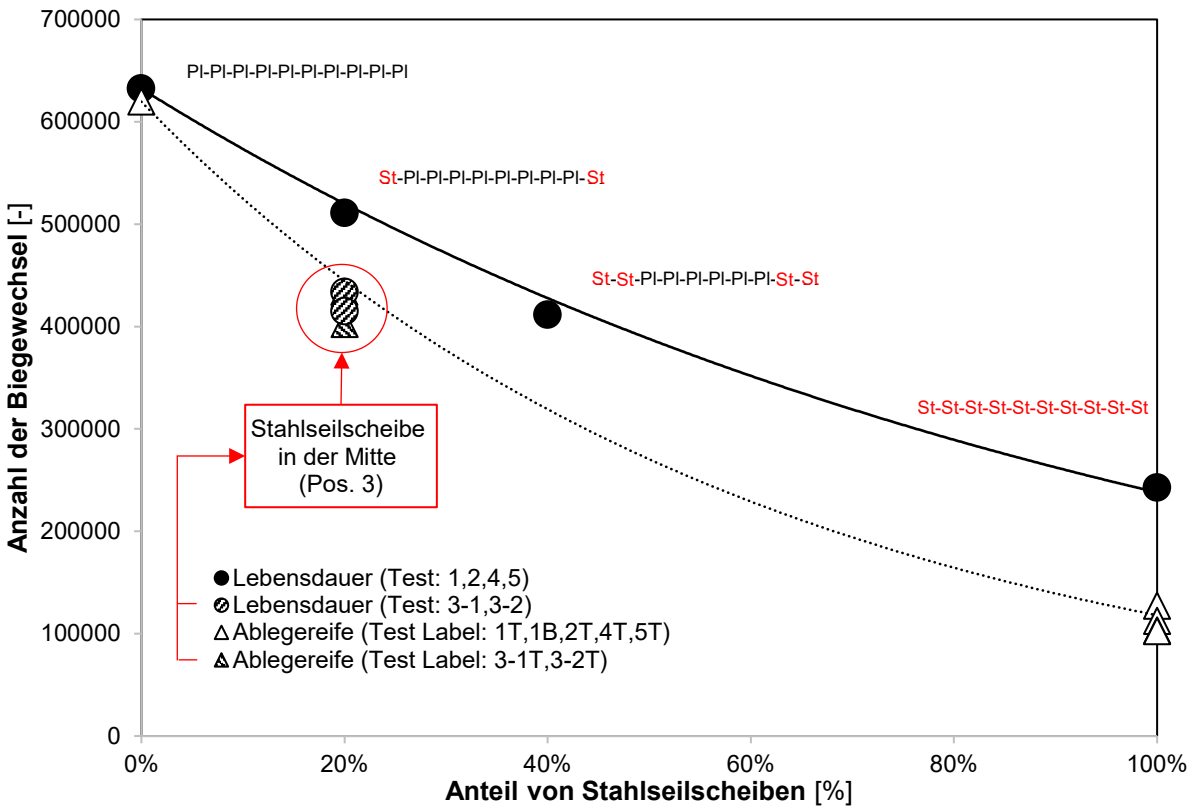


Abbildung 4: Betriebs- / Lebensdauer in Abhängigkeit der Anzahl (%) verwendeter Stahlseilscheiben

Aus diesen Daten lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ziehen:

– Mit zunehmender Anzahl an Stahlseilscheiben nimmt die Lebensdauer des Seils ab.
– Mit zunehmendem Anteil an Stahlseilscheiben nimmt die Betriebsdauer des Seils ab.
– Es lassen sich Korrelationen zwischen der individuell erreichten Lebensdauer und der Ablegereife des Seils in Abhängigkeit von verschiedenen Seilscheiben-anordnungen feststellen.
– Schon eine einzige Stahlscheibe im System, richtig platziert, kann den Seilbetrieb erheblich sicherer machen, indem sie die Restlebensdauer[8] erhöht.

Darüber hinaus ist festzustellen:

– Dass die Lebensdauer des Seils um etwa 17,50 % für jeden zusätzlichen Anteil von 20 % an Stahlseilscheiben im System abnimmt.
– Dass die Restlebensdauer des Seils mit jedem zusätzlichen 20-prozentigem Anteil an Stahlseilscheiben im System kontinuierlich ansteigt.

Somit lässt sich nachfolgende Beziehung ableiten:

$$Reduktionsfaktor\ Lebensdauer = e^{-0.959 * \frac{Anzahl\ Stahlseilscheiben}{Gesamtanzahl\ Seileilscheiben}} \quad (1)$$

$$Restlebensdauer = Lebensdauer * \left(1 - \left(0.98 * e^{-0.662 * \frac{Anzahl\ Stahlseilscheiben}{Gesamtanzahl\ Seilscheiben}}\right)\right) \quad (2)$$

Diese Korrelationen gelten für Seilscheibenanordnungen, bei denen das Seil durch eine Stahlscheibe vorgeschädigt wurde und diese in einer Reihe angeordnet sind.

Sie gelten jedoch nicht für die Anordnung, bei der die mittlere Kunststoffseilscheibe (Pos. 3) durch Stahl ersetzt wurde:

– Da bei beiden Tests, bei denen die Stahlscheibe in der Mitte platziert wurde (Pos. 3), eine um ca. 20 % kürzere Lebensdauer erreicht wurde, im Vergleich zu dem Test, bei dem die erste Scheibe (Pos. 1) durch Stahl ersetzt wurde, obwohl die Gesamtzahl der Stahlscheiben im System gleich war.

Dies führt zu der Annahme, dass die zu erwartende Seillebensdauer bis zum Ablegen und Versagen von der Position der Stahlscheibe abhängt.

Eine mögliche Erklärung für diese Abhängigkeit könnte in der Biegefolge der Seilscheiben bei der Betrachtung mehrerer aufeinanderfolgender Maschinenzyklen liegen, wie in **Tabelle 9** dargestellt, oder in der Art des Versagens/der inneren Beschädigung des Seils (vgl. **Tabelle 10**).

[8] die Anzahl der Biegewechsel zwischen Erreichen des Ablegereife und dem Seilversagen

Tabelle 9: Biegefolge nach drei Maschinenzyklen

Position der Stahlseil-scheibe	**Biegefolge nach drei Maschinenzyklen**					
Seilbewegung	vorwärts	rückwärts	vorwärts	rückwärts	vorwärts	rückwärts
Pos. 1	St-Pl-Pl-Pl-Pl-	Pl-Pl-Pl-Pl-St-	St-Pl-Pl-Pl-Pl-	Pl-Pl-Pl-Pl-St-	St-Pl-Pl-Pl-Pl-	Pl-Pl-Pl-Pl-St-
Pos. 3	Pl-Pl-St-Pl-Pl-	Pl-Pl-St-Pl-Pl-	Pl-Pl-St-Pl-Pl-	Pl-Pl-St-Pl-Pl-	Pl-Pl-St-Pl-Pl-	Pl-Pl-St-Pl-Pl-

Aufgrund der begrenzten Datenmenge kann die Ursache hierfür jedoch nicht schlüssig ermittelt werden, und die allgemeinen erläuterten Korrelationen sollten mit Vorsicht interpretiert werden.

3.2. Betrachtung der einzelnen Versuchsaufbauten als Individualsystem

In den folgenden Abschnitten wird jede Versuchsanordnung als individuelles System betrachtet gemäß **Tabelle 3** - **Tabelle 7**.

Innere Drahtbruchverteilung und Restbruchkraft

Tabelle 10 zeigt die Veränderung der Bruchkraft der einzelnen Seilabschnitte aus Versuchsaufbauten mit Vollstahl-, Vollkunststoff- und der durch Stahl ersetzten mittleren Seilscheibe (Pos. 3) nach den Biegeermüdungsversuchen.

Tabelle 10: Restbruchkraft und Drahtbruchverhältnis

Biegefolge		**Lebensdauer**	**ABL / MBL**[9]	**$B_{O\ 30d}$: $B_{I\ 30d}$**[10]	**Test Label**	**Test Nr.**
St	St	20%	2,7%	13:0		
St-St	St-St	40%	0,1%	≈2:1		
St-St-St	St-St-St	60%	-10,1%	≈2:1	1^B	1
St-St-St-St	St-St-St-St	80%	-26,4%	≈2:1		
St-St-St-St-St	St-St-St-St-St	100%	-100,0%	nicht zählbar		
Pl	Pl	20%	-20,5%	≈1:115		
Pl-Pl	Pl-Pl	40%	-16,2%	≈1:63		
Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl	60%	-9,2%	≈1:63	2^B	2
Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl	80%	-6,3%	≈1:55		
Pl-Pl-Pl-Pl-Pl	Pl-Pl-Pl-Pl-Pl	100%	-100,0%	nicht zählbar		
Pl	Pl	20%	-30,0%	≈1:53		
Pl-Pl	Pl-Pl	40%	-26,1%	≈1:16		
Pl-Pl-St	St-Pl-Pl	60%	-35,7%	≈1:11	$3\text{-}2^B$	3
Pl-Pl-St-Pl	Pl-St-Pl-Pl	80%	-36,0%	≈1:8		
Pl-Pl-St-Pl-Pl	Pl-Pl-St-Pl-Pl	100%	-100,0%	nicht zählbar		

[9] Tatsächliche Bruchkraft / Mindestbruchkraft
[10] Verhältnis von äußeren „sichtbaren“ zu inneren „unsichtbaren“ Drahtbrüchen auf 30xd

Es ist zu erkennen, dass das Seil nach dem Test, bei dem alle Seilabschnitte nur über Stahlscheiben umgelenkt wurden, signifikant mehr Seilschäden an der Seiloberfläche als im Inneren zeigt.

Weiterhin zeigt sich, dass die der Verteilung der Drahtbrüche in den Abschnitten, die nur über Kunststoffseilscheiben umgelenkt wurden, signifikant mehr Schäden im Seilinneren als auf der Seiloberfläche zeigen. Außerdem nimmt das Verhältnis von äußeren zu inneren Drahtbrüchen mit zunehmender Biegewechselzahl ab.

Ein ähnliches Verhalten der Seile kann bei der Versuchsanordnung mit der Stahlseilscheibe in der Mitte (Pos. 3) beobachtet werden. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass sich das Verhältnis der äußeren „sichtbaren“ zu den inneren „unsichtbaren“ Drahtbrüchen mit zunehmendem Prozentsatz der erreichten Lebensdauer im Vergleich zum vorgenannten Test ändert.

Das oben beschriebene Verhalten spiegelt sich auch in den Ergebnissen der ermittelten Restbruchkraft der einzelnen Seilabschnitte wider (**Abbildung 5**).

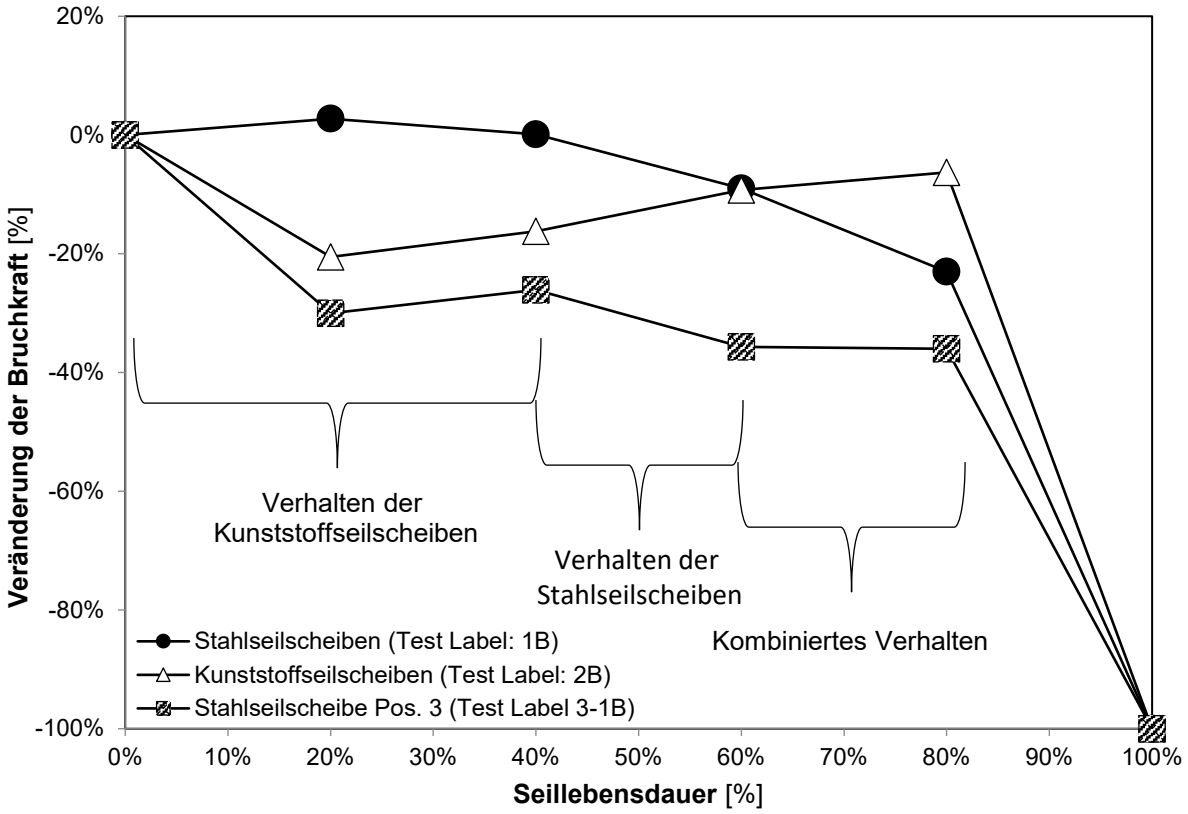


Abbildung 5: Veränderung der Bruchkraft nach der Biegeermüdungsprüfung (1)

Bei den Seilabschnitten, die nur über Stahlseilscheiben umgelenkt wurden, steigt die tatsächliche Bruchkraft des Seils zunächst leicht an und nimmt dann kontinuierlich ab. Wenn das Seil seine Ablegereife erreicht, ist die ursprüngliche Mindestbruchkraft noch vorhanden.

Dagegen fällt die tatsächliche Bruchkraft der Abschnitte, die ausschließlich über Kunststoffscheiben umgelenkt wurden, zunächst stark ab und steigt dann mit zunehmender Lebensdauer wieder an.

In dem Versuchsaufbau, bei dem die mittlere Seilscheibe (Pos. 3) durch eine Stahlseilscheibe ersetzt wurde, ist der Einfluss der Kunststoff-, der Stahlseilscheibe sowie der Kombination beider auf die verbleibende Bruchkraft sichtbar.

Auffällig ist, dass Seilabschnitte, die ausschließlich über Kunststoffscheiben gebogen werden, mit zunehmender Lebensdauer einen geringeren Verlust an Bruchkraft im Vergleich zur ursprünglichen Bruchkraft aufweisen, was einer weiteren Erklärung bedarf. Nach [4] wurde ein ähnliches Verhalten bei einem nicht geschmierten Seil beobachtet, welches nur über Stahlseilscheiben gebogen wurde, was auf Reibkorrosion im Inneren des Seils zurückgeführt wurde.

Da in der vorliegenden Versuchsreihe ebenfalls Reibkorrosion im Inneren der Seilabschnitte festgestellt wurde, die über Kunststoffseilscheiben gebogen wurden, könnte dies eine mögliche Erklärung für den atypischen Anstieg der Bruchkraft bei fortschreitender Lebensdauer sein.

Abbildung 6 zeigt, wie bereits vorherige, die Veränderung der Bruchkraft über die Lebensdauer des Seils, jedoch in Abhängigkeit von der Anzahl der Biegewechsel.

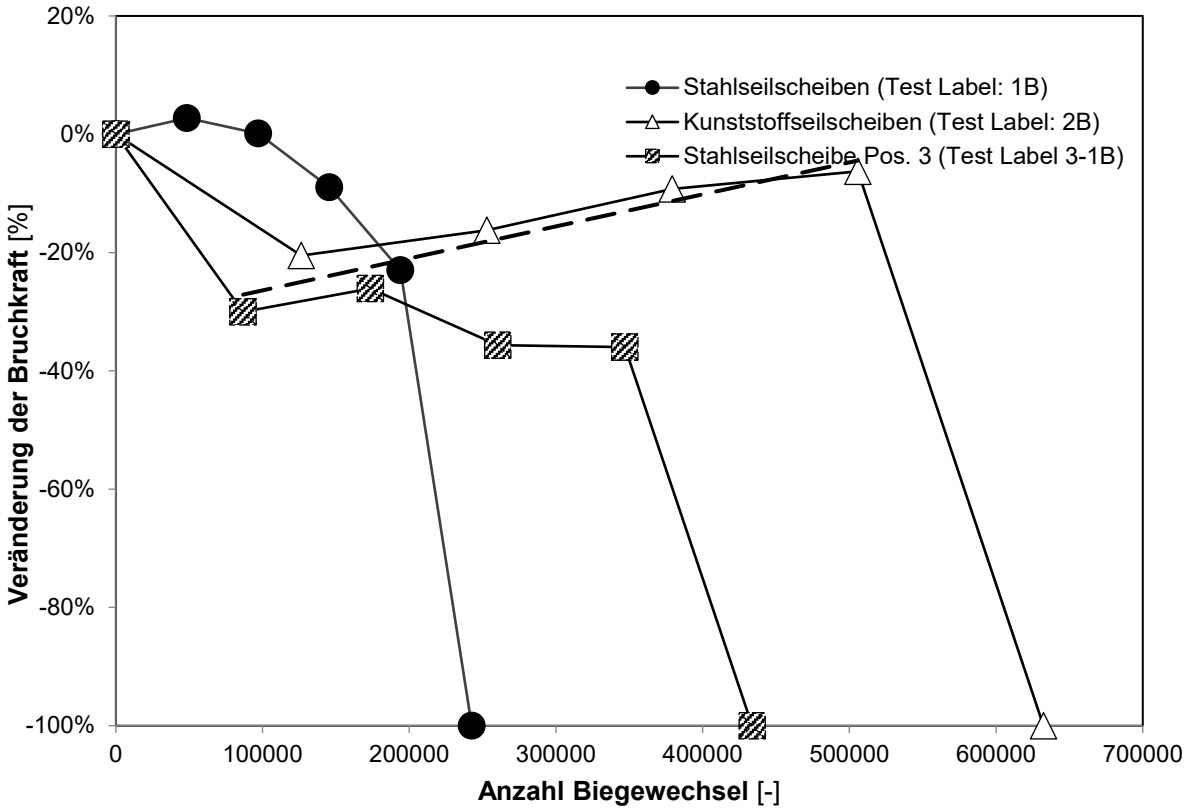


Abbildung 6: Veränderung der Bruchkraft nach der Biegeermüdungsprüfung (2)

Die gestrichelte Linie zeigt die Kombination der Bruchlastdaten aus der Versuchsreihe mit nur Kunststoffseilscheiben mit den Werten aus der Reihe, bei der die Kunststoffseilscheibe in der Mitte (Pos. 3) durch eine Stahlseilscheibe ersetzt wurde.

Diese zeigt ein lineares Verhalten, was die Vermutung stützt, dass bei Kunststoffseilscheiben im System die Bruchlast der Seilabschnitte nicht rein zufällig mit zunehmender Seillebensdauer zunimmt.

Äußere Drahtbruchverteilung

Abbildung 7 zeigt die Drahtbruchverteilung auf der Seiloberfläche, nach Auswertung der Ergebnisse aller Seilabschnitte, aus der Versuchsreihe über der Anzahl erfahrener Biegewechsel.

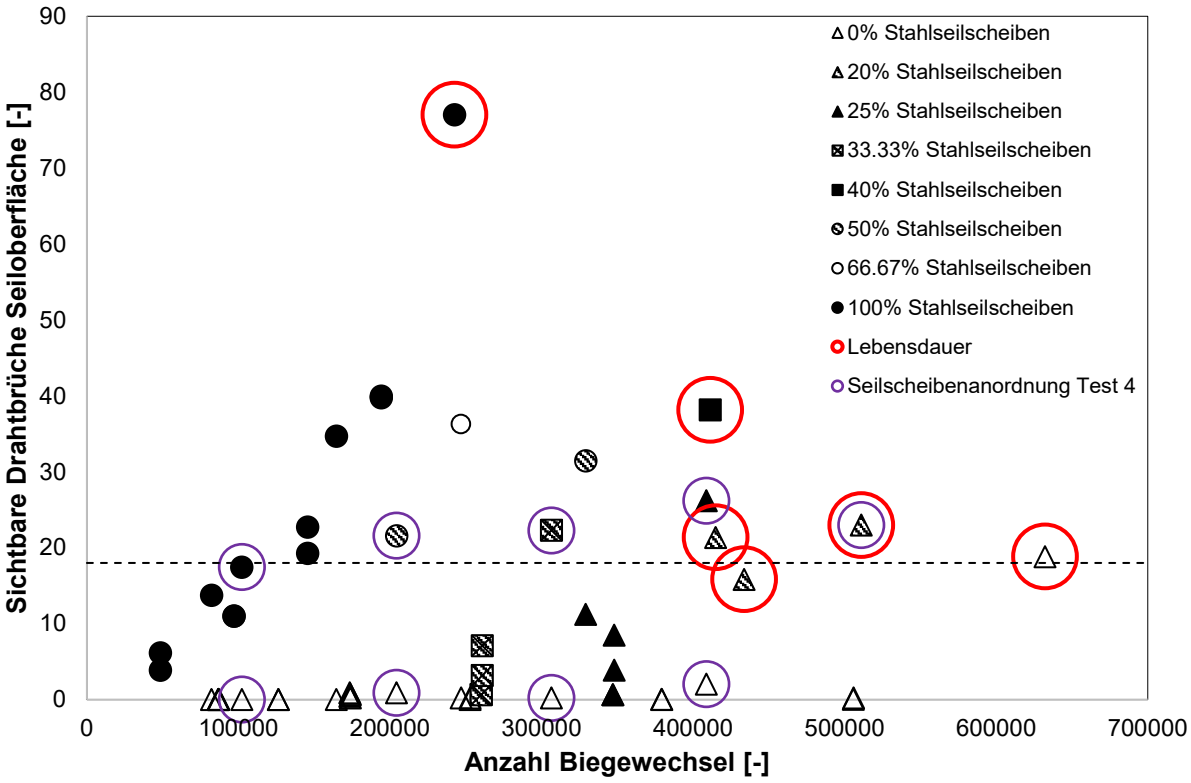


Abbildung 7: Drahtbruchverteilung der Individualsysteme

Die Anzahl der sichtbaren Drahtbrüche bei Erreichen der Lebensdauer ist entsprechend markiert um einen Bezug zu **Abbildung 4** herzustellen. Weiterhin wurden exemplarisch die Daten aus der Seilscheibenanordnung gemäß **Tabelle 6** markiert.

Das Ziel dieser Auswertestrategie besteht darin, allgemeingültige Lebensdauerprognosen für Systeme mit Stahlseilscheiben zu erstellen, indem die Abhängigkeit der Lebensdauer von der prozentualen Anzahl an Stahlseilscheiben in Einscherungssystemen vertieft untersucht wird. Zusätzlich sollen die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln bestätigt werden.

Allerdings sind die vorhandenen Datensätze noch zu begrenzt, um präzise Aussagen über den allgemeingültigen Einfluss der Anzahl an Stahlseilscheiben und deren Position auf die Betriebs- und Seillebensdauer treffen zu können. Es ist daher notwendig, weitere Daten zu sammeln und zusätzliche Analysen durchzuführen, um zuverlässige und breit anwendbare Prognosen entwickeln zu können.

4. Schlussfolgerungen

In der hier vorgestellten Studie wurden die Auswirkungen der Positionierung und Anzahl von Kunststoff- und Stahlseilscheiben auf die Lebensdauer und den Betrieb von Seilen untersucht, wobei verschiedene Seilscheibenanordnungen und ihre Auswirkungen auf die Betriebs- und Lebensdauer von Seilen verglichen wurden. Es wurden mehrere Biegeermüdungsversuche mit einer 8-litzigen Seilkonstruktion mit unterschiedlichen Anordnungen von Kunststoff- und Stahlseilscheiben durchgeführt. Jeder Versuchsaufbau wurde einzeln als Gesamtsystem und Individualsystem betrachtet und bewertet.

Es wurden Korrelationen zwischen der erreichten Lebensdauer und der Zeit bis zum Ablegen des Seils in Abhängigkeit von verschiedenen Seilscheibenanordnungen ermittelt. Der generelle Einfluss von Kunststoffseilscheiben auf die Lebensdauer und die Ablegereife von Seilen wurde bestätigt. Es zeigte sich, dass Kunststoffseilscheiben die Seillebensdauer um den Faktor 2,61 und den Zeitpunkt der Ablegereife um den Faktor 5,40 auf Kosten der Restlebensdauer erhöhen, die sich auf ein sehr niedriges Niveau reduziert. Es wurde festgestellt, dass mit zunehmender Anzahl von Stahlscheiben im System die Lebensdauer des Seils entsprechend abnimmt.

Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass die Lebensdauer des Seils um ≈17,50 % für jeden zusätzlichen 20 -prozentigen Anteil an Stahlseilscheiben im System abnimmt. Es konnte auch beobachtet werden, dass das Verhältnis zwischen Ablegereife und Seilversagen umso größer ist, je mehr Stahlscheiben in das System eingebracht werden, wenn sie in einer Reihe angeordnet sind.

Interessanterweise konnte sogar eine einzige Stahlscheibe, die korrekt im System platziert wurde, einen erheblichen Beitrag zur Anzeige der Ablegereife des Seils leisten, was die ursprüngliche Frage beantwortet, ob das Seilversagen des Seilkrans hätte vermieden werden können, wenn die Stahlseilscheibe im System in einem anderen Teil des Einscherungssystems positioniert worden wäre. Die Ursache für diesen Beitrag konnte jedoch nicht ausreichend ermittelt werden.

Außerdem wurde die Restbruchkraft der Seile nach Abschluss der Biegewechselversuche untersucht. Bemerkenswert war, dass Seile, die ausschließlich über Kunststoffseilscheiben laufen, mit zunehmender Lebensdauer einen geringeren Festigkeitsverlust bei der Bruchlast im Vergleich zur ursprünglichen Bruchlast aufweisen. Dies könnte auf ein Phänomen zurückzuführen sein, das bei nicht geschmierten Seilen über Stahlseilscheiben ebenfalls auftritt und auf innere Reibkorrosion beruht.

Um allgemeingültige Aussagen treffen zu können waren die Datensätze jedoch zu begrenzt. Künftige Forschungsarbeiten könnten die spezifischen Auswirkungen verschiedener Scheibenmaterialien und -anordnungen auf die Betriebs- und Seillebensdauer genauer untersuchen und so das Verständnis für diese Dynamik in industriellen Anwendungen erweitern.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Herrn Roland Verreet für seine wertvollen Kommentare bedanken. Des Weiteren möchten wir uns bei den Ingenieuren der KV R&D Center GmbH und der verope Service Center GmbH für die Durchsicht der Ausarbeitung bedanken.

Referenzen

[1] ISO 16625, Cranes and hoists – Selection of wire ropes, drums and sheaves, First edition 2013-07-01 (ISO, 2013)

[2] Feyrer K.: Wire Ropes – Tension, Endurance, Reliability. Springer Edition, 2. Edition, Heidelberg (Springer, 2015)

[3] Zhang D. et al.: Bending fatigue behavior of bearing ropes working around pulleys of different materials. Engineering Failure Analysis, 2013;33: 37-47. (Elsevier, 2013)

[4] Verreet R.; Teissier J.M.: A new innovative wire rope bending fatigue machine. Proceedings of the OIPEEC Conference 2011. (OIPEEC, 2011)

[5] ISO 4309, Cranes – Wire ropes – Care and maintenance, inspection and discard, Fifth edition 2017-11. (ISO, 2017)

© 2024 by the authors. Submitted to innoTRAC Journal for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)