

# Strahlenmodifizierte Kunststoffseilscheiben in Seiltrieben

## Radiation modified polymer sheaves in rope drives

Tobias Müller\*  
Thorsten Schmidt\*,  
Alexander Schaffrath\*\*  
Torsten Blum\*\*

\*Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden

\*\*EBF Dresden GmbH

**K**unststoffseilscheiben sind leichter als Stahl- oder Graugussseilscheiben, woraus sich insbesondere bei Auslegerkränen Vorteile in deren Konstruktion und Handling-Eigenschaften ergeben. Während die Betriebsdauer von Stahlseilen über metallische Seilscheiben gut bestimmbar ist, ist diese Bestimmung bei Verwendung von Kunststoffseilscheiben nur ungenau möglich. In einem AiF-ZIM-Forschungsprojekt wurden strahlenvernetzte sowie naturbelassene Kunststoffseilscheiben auf ihre veränderten Gebrauchseigenschaften untersucht und mit den Ergebnissen beim Lauf über Stahlseilscheiben verglichen.

[Schlüsselwörter: Kunststoffseilscheiben, Kunststoffvernetzung, Bestrahlung, Betriebsdauer]

**P**lastic sheaves are lighter than steel or cast iron sheaves, which is advantageous especially for boom cranes in their construction and handling characteristics. The service life of wire ropes on metal sheaves is well determined. However, the determination on plastic sheaves is only incorrectly possible. In an AiF-ZIM research project radiation crosslinked and natural plastic sheaves were examined for changes in performance characteristics and compared with the result when running over steel sheaves.

[Keywords: plastic sheaves, radiation crosslinking, service life]

### 1 EINLEITUNG

Die ersten grundlegenden Untersuchungen zur Wirkung von ionisierender Strahlung auf Polymere wurden u. a. von Charlesby, Miller, Adams, Charpio und Pinner in den 50-iger Jahren des vergangenen Jahrhunderts im Zusammenhang mit der Suche nach strahlenbeständigen Materialien für die zivile Nutzung der Kernenergie veröffentlicht [Vol11]. Das Bestrahlen der Kunststoffe mit energiereicher Strahlung kann die mechanischen und chemischen

Eigenschaften von Kunststoffen verbessern, sodass mitunter teurere und aufwändig zu verarbeitende Hochleistungskunststoffe ersetzt werden können [Int01].

Im abgeschlossenen Forschungsprojekt wurden elektronenbestrahlte und naturbelassene Seilscheiben aus Polyamid untersucht. Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Gewichtsoptimierung durch eine Festigkeitssteigerung der strahlenchemischen Modifikation des Polyamids sowie das Verhalten von Seil und Seilscheibe unter dem Einfluss modifizierter Kunststoffe. Weiterhin besteht das Problem, dass beim Lauf von Drahtseilen über Kunststoffseilscheiben die Drahtbrüche im Seilinneren entstehen [Bar00], wodurch die Betriebsdauer nicht genau abschätzbar ist. Eine Festigkeitssteigerung durch die Strahlenvernetzung lässt auf eine verbesserte Drahtbrucherkennung hoffen, die zu einer sichereren Bestimmung der Betriebsdauer des Drahtseils führen soll.

### 2 BESTRAHLEN VON POLYAMID

Als energiereiche Strahlung werden elektromagnetische Wellen, z. B. Gamma- oder Röntgenstrahlung, wie auch Korpuskularstrahlung, z. B. beschleunigte Elektronen (Beta-Strahlung), verwendet. Gamma-Strahlungen besitzen eine große Durchdringungsfähigkeit, aber eine geringe Strahlendosis. Elektronenstrahlen hingegen haben eine hohe Dosisleistung, aber eine niedrige Eindringtiefe. Aus der Dosisleistung resultiert die Zeit für den Bestrahlungsvorgang, der bei Verwendung der Gamma-Strahlung viele Stunden dauern würde, während Anlagen mit Elektronenbeschleuniger nur wenige Minuten benötigen. Demnach ist die Verwendung von Elektronenstrahlen beim Bestrahlen von Kunststoffen nicht nur wirtschaftlicher, sondern sie bietet auch technische Vorteile. Durch die Steuerung der Elektronenenergie sind Eigenschaftsgradienten innerhalb eines Werkstoffs möglich, was beim Bestrahlen mit Gamma-Strahlen nicht möglich ist. Die Dosis bestimmt da-

bei in erster Linie die gewünschte Eigenschaftsveränderung [Bro08, DIN02]. Wegen der wirtschaftlichen und technischen Vorteile fand im Forschungsprojekt ausschließlich die Bestrahlung der Kunststoffe mit Elektronenbeschleunigern statt.

## 2.1 WIRKMECHANISMEN BEIM BESTRAHLEN

Energiereiche Strahlen bewirken bei Kunststoffen eine chemische Veränderung, die zu einer permanenten Änderung bestimmter Materialeigenschaften führen können. Durch die energiereiche Strahlung werden die chemischen Verbindungen der angeregten Moleküle homolytisch gespalten. Abhängig von der chemischen Struktur des Kunststoffs können seitenständige Gruppen und Atome abgespalten oder auch Bindungen in der Hauptkette gespalten werden. Auf diese Weise entstehen freie Radikale, die mehrere Möglichkeiten zur weiteren Reaktion bieten, z. B. Reaktion mit benachbarten Molekülen zu Vernetzungen oder Umwandlung in andere Radikale.

Beim Bestrahlen von Kunststoffen treten folgende grundlegende Mechanismen auf [Ehr07]:

- Kettenspaltung,
- Kettenverzweigung und
- Vernetzung.

Die Kettenspaltung ist die zufällige Spaltung von Bindungen, die zum Abbau von Bindungen und damit zur Reduzierung von mechanischen Eigenschaften führt. Das Ergebnis dieses Mechanismus ist die Reduzierung der Molmasse. Dabei treten niedermolekulare Fragmente, Gasbildung und ungesättigte Bindungen auf.

Die Kettenverzweigung ist die Vorstufe zur Vernetzung. Sie führt bereits bei kleinen Strahlendosen zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften, während eine Vernetzung erst bei höheren Strahlendosen stattfindet.

Bei der Vernetzung werden Querverbindungen zwischen benachbarten Molekülen gebildet, die zu einem dreidimensionalen Netzwerk führen, wodurch verbesserte mechanische und thermodynamische Eigenschaften möglich sind.

## 2.2 STAND DER TECHNIK ZU STRAHLENVERNETZTEN POLYAMIDEN

Kunststoffseilscheiben werden bisher aus unbestrahlten Guss-Polyamiden hergestellt, beispielsweise aus PA 6-Guss oder PA 12-Guss. Diese Polyamide zeichnen sich durch ein sehr gutes mechanisches Eigenschaftsbild, eine besonders hohe Zähigkeit sowie durch ein ausgezeichnetes Gleit- und Verschleißverhalten aus. Weiterhin gehören sie zu den Massenkunststoffen, wodurch sie preiswert sind.

Das Bestrahlen von Kunststoffen stellt heute zwar eine gängige Aufbereitungstechnik dar, jedoch gibt es nur wenig Erfahrung mit bestrahlten Polyamiden. Die Bestrahlung von Kunststoffen erfolgt vorwiegend an Polyolefinen, z. B. Polyethylen zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Kabelisierungen, Rohren, Profilen und Hüftgelenken [Vol11, Int01].

Erfahrungen mit bestrahlten Polyamiden hat das Unternehmen BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG gesammelt. Das Polyamid wies nach dem Strahlungsprozess eine erheblich verbesserte Formbeständigkeit unter Wärmebelastung auf und zeigte auch oberhalb der Schmelztemperatur noch verlässliche mechanische Eigenschaften. Weitere Ergebnisse mit verbesserten Gebrauchseigenschaften nach der Strahlenvernetzung sind in [Ehr06] sowie [Bro08] und [BGS09] beschrieben. Demnach kann ein strahlenvernetztes Polyamid durchaus Duroplaste oder einen teuren Hochleistungskunststoff preiswert ersetzen [Int01].

Nicht immer führt die Strahlenvernetzung von Kunststoffen zu verbesserten mechanischen Eigenschaften. In [Int01] wird ein strahlenvernetztes Hüftgelenk aus Polyethylen vorgestellt, das zwar eine erheblich höhere Verschleißfestigkeit aufweist, was für medizinische Anwendungen sehr wichtig ist, jedoch verhalten sich Festigkeit und Härte gegenläufig zur Bestrahlung.

## 2.3 VERFAHREN UND ERGEBNISSE DER STRAHLENVERNETZUNG

Zunächst erfolgte eine Auswahl an Polyamiden, die für die Untersuchung in Seiltrieben infrage kommen. Allein auf Grundlage der unterschiedlichen chemischen Kettenbindungen ergeben sich innerhalb einer Werkstoffklasse Eigenschaftsunterschiede, welche die Polymere auf bestimmte Einsatzfelder konzentrieren. Einige Polyamide besitzen gezielte Einlagerungen oder Füllungen, z. B. Festschmierstoffe oder Öle, um sie direkt für den Anwendungsfall in Seiltrieben zu spezialisieren. Die Festigkeitsuntersuchungen ergaben, dass die untersuchten Polyamide 6 im Vergleich zum Polyamid 12 höhere Festigkeiten aufweisen, wodurch sie auf den ersten Blick geeigneter für den Einsatz in Seilscheiben erscheinen. Nachteilig hingegen zeigten sich die Ergebnisse der Untersuchungen zur Aufnahme von Feuchtigkeit. Sowohl das gefüllte als auch das ungefüllte PA 6 reagierte mit durchschnittlich 2% Feuchtigkeitsaufnahme deutlich stärker auf die Umgebungsbedingungen als PA 12, das nur 0,9 % Feuchtigkeitsaufnahme besitzt. Für potentielle Bauteile aus PA 6 bedeutet das einen Unsicherheitsfaktor, da eine Aufnahme von Wasser generell mit Volumenzunahme und dem Verlust von Festigkeit einhergeht [Bro08, Els08].

Bei den Festigkeitsuntersuchungen sowie Reib- und Verschleißtests an einem Rotationstribometer zeigten die PA 6-Gusspolyamide Sustaglide 6G und Lubramid 600T hervorragende Reib- und Verschleißkennwerte. Beide

Werkstoffe besitzen Festschmierstoffeinlagerungen, die am dynamisch beanspruchten Seil ein begünstigendes Verschleißverhalten erzielen sollen. Die ungefüllten sowie mit Öl gefüllten PA 6-Guss-Polyamide zeigten deutlich schlechtere tribologische Eigenschaften. Das Calaumid 1200, ein Vertreter des Polyamid 12, wies zwar niedrigere Festigkeiten und wesentlich schlechtere Reib- und Verschleißkennwerte auf, wurde aber aufgrund der geringen Feuchtigkeitsaufnahme mit in das Versuchsprogramm aufgenommen. Abbildung 1 zeigt die charakteristische Wabenstruktur der ausgewählten Kunststoffe unter dem Elektronenmikroskop, wobei die Festschmierstoffe in Abbildung 1b) und 1c) durch kleine Kugeln sichtbar sind.

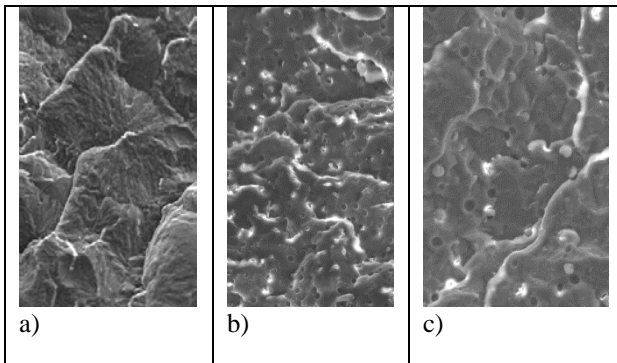


Abbildung 1. Wabenstruktur unvernetzter Kunststoffe unter dem Elektronenmikroskop a) 200-fache Vergrößerung des Calaumids b) 500-fache Vergrößerung des Sustaglides c) 500-fache Vergrößerung des Lubramids

Alle drei gewählten Kunststoffe wurden nun mit einem Elektronenbeschleuniger mit unterschiedlichen Energiedosen sowie unter verschiedenen Bedingungen bestrahlt und deren Bestrahlungsoptimum ermittelt. Die Einheit der Energiedosis wird in Kilogray angegeben und beschreibt den Differentialquotienten der absorbierten Energie aus der ionisierten Strahlung und der Masse der bestrahlten Materie [Kri09, DIN03]. Während die Festigkeiten bei einer Bestrahlung unter Luftsauerstoff bis zu einer Strahlendosis von 100 kGy nahezu linear anstiegen, zeigten die Reib- und Verschleißkennwerte eine negative Entwicklung auf. Eine weitere Erhöhung der Dosis führte zu keiner weiteren Festigkeitsverbesserung.

Die parallel durchgeführten Untersuchungen zur Bestrahlung unter Stickstoffatmosphäre hingegen liefern bessere Ergebnisse bezüglich Festigkeit, Reibung und Verschleiß. Die ermittelten E-Module zu den unterschiedlichen Bestrahlungsmodifikationen sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die strahlenchemische Vernetzung der ausgewählten Kunststoffe erbrachte eine Steigerung des E-Moduls gegenüber der unbehandelten Referenz beim Sustaglide um 62 %, beim Lubramid um 67 % und beim Calaumid um 73 %. Die Reibungs- und Verschleißkennwerte erzielten dabei nicht immer eine Verbesserung, jedoch wurde die leicht negative Entwicklung als unkritisch eingeschätzt. Eine Übersicht zu den Ergebnissen unter optimierten Bestrahlungsbedingungen, die auch den Werten der künftig bestrahlten Seilscheiben entsprechen, liefert Tabelle 1.

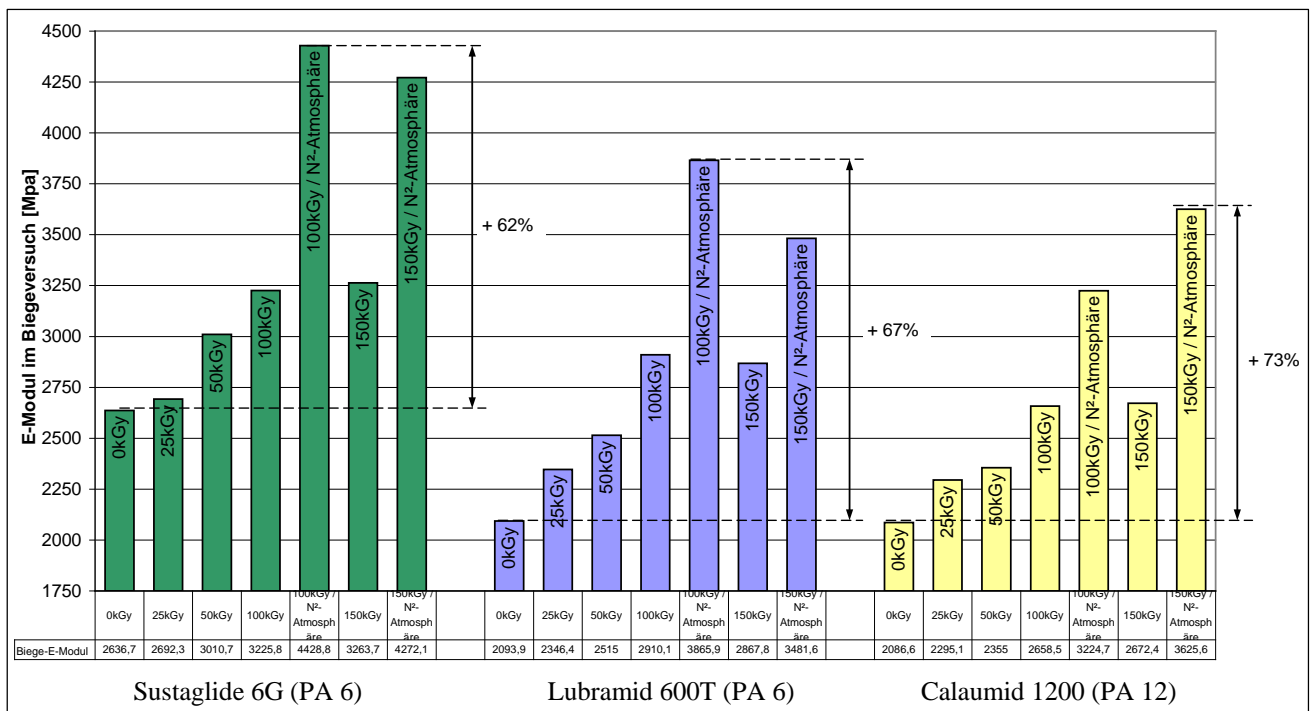


Abbildung 2. Einfluss unterschiedlicher Bestrahlungsmodifikationen auf den Biege-E-Modul

Tabelle 1: Gemessene Reibungs-, Verschleiß- und Festigkeitskennwerte der unbehandelten und strahlenchemisch optimierten Kunststoffe

Kunststoff	Modifikationsgrad	E-Modul [MPa]	Reibwert	Verschleißrate [mg/km]
Sustaglide 6G	0 kGy	2636,7	0,16	21
	100 kGy / N <sub>2</sub> -Atmosphäre	4428,8	0,1	8,1
Lubramid 600T	0 kGy	2093,9	0,1	1,3
	100 kGy / N <sub>2</sub> -Atmosphäre	3865,9	0,07	5
Calamid 1200	0 kGy	2086,6	0,32	253,3
	150 kGy / N <sub>2</sub> -Atmosphäre	3625,6	0,34	96,6

### 3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM SEILTRIEB

Die experimentellen Untersuchungen zur Reibpaarung Seil und Seilscheibe wurden zunächst mit kleineren Abmessungen sowie Seilkräften an Modellversuchen durchgeführt, später mit größeren Parametern an einem Großprüfstand. Die Ergebnisse wurden auf beiden Prüfständen mit Scheiben aus Stahl referenziert.

#### 3.1 MODELLVERSUCHE

##### 3.1.1 AUFBAU DER MODELLVERSUCHE

Die Modellversuche wurden mit einem wirksamen Scheibendurchmesser von 90 mm und einem Seildurchmesser von 6 mm in Dauerversuchen bis zur maximalen Betriebsdauer, der sogenannten Ablegereife, durchgeführt. Der Modellprüfstand ist ähnlich einem Aufzug aufgebaut, an dem eine im Reversierbetrieb arbeitende Treibscheibe zwei seitlich angeordnete Fahrkörbe antreibt. Die beiden Fahrkörbe wurden jeweils mit 200 kg belastet, an denen sich die zu prüfende Seilscheibe in der Anordnung einer losen Rolle befand. Die Seilkraft betrug damit ca. 1 kN. Die im Betrieb auftretenden Biegezonen geben Aufschluss über das dynamische Verhalten der Reibpaarung Seil und Seilscheibe. Jede Biegezone wurde so gestaltet, dass keine weiteren Führungselemente sie beeinflusste. Für jeden Versuch wurden neue Seilscheiben und ein neues Seil derselben Charge verwendet. Als Prüfseil wurde ein klassisches Aufzugseil (DRAKO STX 6,0 WSC 1960 U sZ) ausgewählt. Es besitzt eine Drahtlitzeneinlage und relativ große Außenlitzten, wodurch die beim Betrieb entstehenden äußeren Drahtbrüche gut erkennbar sind.

Vor Beginn der experimentellen Versuche wurde jede Seilrille mithilfe eines Linienlasers an verschiedenen Stellen der Seilscheibe vermessen, um am Versuchsende den

Verschleiß zu ermitteln. Abbildung 3 zeigt die Rillenvermessung der Seilscheiben mit dem Linienscanner, wobei Abbildung 3 a) den Messaufbau zur Rillenvermessung und Abbildung 3 b) die Seilscheibe im Messzustand darstellt.

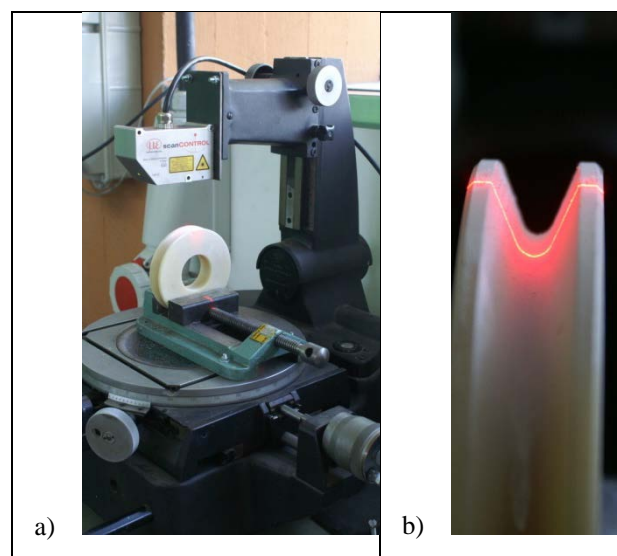


Abbildung 3. Rillenvermessung mit dem Linienscanner a) Messaufbau mit Linienscanner und Seilscheibe b) Seilscheibe im Messzustand

##### 3.1.2 ERGEBNISSE ZUM SEILVERSCHEISS

Sowohl bei den Versuchen mit unbestrahlten Kunststoffseilscheiben als auch mit strahlenmodifizierten Seilscheiben waren die Drahtbrüche vorwiegend im Seilinneren vorzufinden. Die äußerlichen Drahtbrüche wurden erst kurz vor der Ablegereife in Form von lokalen Konzentrationen sichtbar, die bei der Biegung des Seils um die Seilscheibe nach außen drangen, während der restliche Seilabschnitt nur wenige, äußere Drahtbrüche enthielt. Eine exemplarische Drahtbruchentwicklung für den Lauf über die Kunststoffseilscheibe liefert der Lubramid-Versuch in Abbildung 4. Die senkrechten Linien verdeutlichen die Ablegekriterien nach [DIN01] für die Bereiche 6-d und 30-d.

Es wurde beobachtet, dass bei den Versuchen mit naturbelassenen Kunststoffen die Drahtbrüche vorwiegend gegenüber der Lauffläche und nur teilweise auf den Seitenflächen zu beobachten waren. Bei den Versuchen mit modifizierten Kunststoffen waren die Drahtbrüche vorwiegend seitlich der Rillenflanke, einige auch auf der Außenfläche zu sehen. Bei beiden Versuchen waren keine bis nur wenige Drahtbrüche auf der Lauffläche des Seils beobachtet worden. Eine detaillierte Seilbegutachtung beim Auftreten einzelner Seillitzen zeigte, dass die Drahtlitzeneinlage sowie deren berührende Außenlitzten teilweise sehr viele Drahtbrüche in kurzen Abständen enthielten. In allen Versuchen trat gegen Ende der Seilnutzungsdauer eine erhöhte Rostbildung mit sehr vielen Verschleißpartikeln auf. Die Verschleißpartikel durchliefen dabei mehrere Stadien. Sie

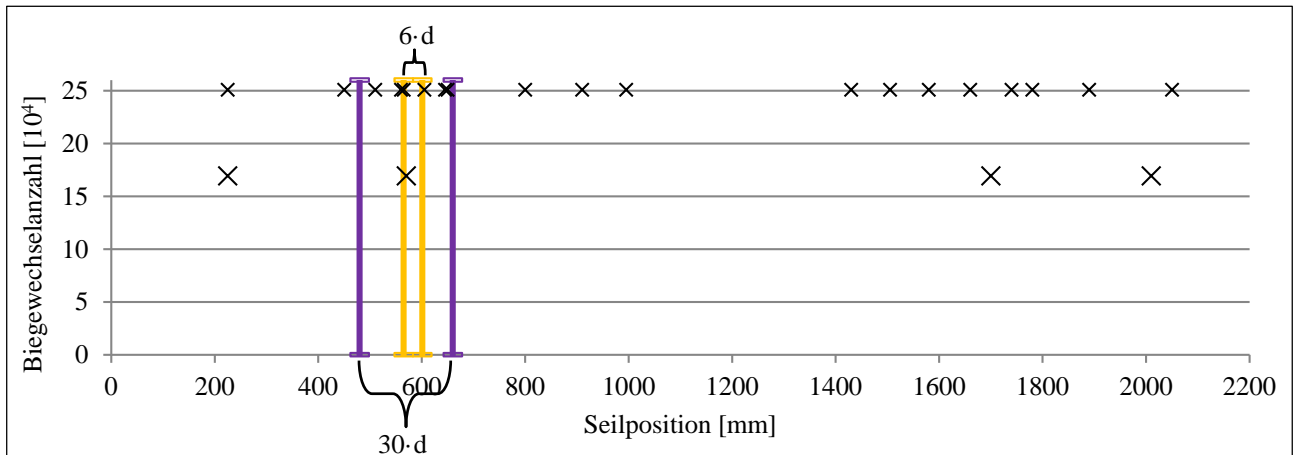


Abbildung 4. Drahtbruchentwicklung eines unbestrahlten Lubramid-Versuchs mit den Ablegekriterien 6-d und 30-d

traten zuerst sehr klebrig, zusammenhängend in sehr dunklem bis schwarzem Farbton auf, später gingen sie in einen feinen, pulverförmigen Zustand mit rotbrauner Färbung über. Der Schmierstoff verband sich mit Verschleißpartikeln von Seil und Seilscheibe und wurde aufgrund der Biegezahl aus dem Seil gewalzt. Der zunehmende direkte Kontakt der Litzen führte zur Kontaktkorrosion, wodurch sich die rotbraune Färbung erklärt. Vermutungen einer chemischen Reaktion des Seilschmierstoffs mit dem Kunststoff als Ursache für die Rosterscheinungen konnten nicht bestätigt werden.

Beim Referenzversuch mit Stahlseilscheibe gleicher Abmessungen waren die Drahtbrüche verhältnismäßig gleichmäßig ohne lokale Drahtbruchkonzentrationen längs der Biegezone verteilt. Am häufigsten entstanden die Drahtbrüche auf der Lauffläche, aber auch seitlich zur Rillenflanke waren Drahtbrüche vorhanden. Weiterhin entstanden bei beiden Versuchen mit der Stahlseilscheibe einige Seilschlaufen an der Kontaktfläche zur Rillenflanke, was beim Lauf über Kunststoffscheiben nicht beobachtet wurde.

Um die Betriebsdauern von Stahl und Kunststoff direkt miteinander vergleichen zu können, wurde der Versuch einmal mit unbestrahlten Lubramid-Seilscheiben und ein weiteres Mal mit strahlenvernetzten Lubramid-Seilscheiben wiederholt und nach erreichter Ablegereife des Stahlversuchs von 121.978 Biegezahl beendet. Beim unbestrahlten Lubramid-Versuch entstand 1 äußerer Drahtbruch, beim modifizierten Lubramid-Versuch war kein äußerer Drahtbruch zu sehen, während beim Lauf über die Stahlseilscheibe 145 sichtbare Drahtbrüche gezählt wurden. Beim Auftrennen der Seile zeigte die Seileinlage der beiden Lubramid-Versuche sehr viele Drahtbrüche mit Abplattungen an den Kontaktstellen zur Drahtlitzeinlage. Der Stahlseilscheibenversuch zeigte nach dem Auftrennen grundsätzlich ein ähnliches Zerstörungsbild, jedoch auch mit wenigen Drahtbrüchen in den Außenlitzen sowie im Kontaktbereich zur Drahtlitzeinlage. Die Seileinlage aller Versuche zeigte einen starken Rostbefall.

Eine exemplarische Drahtbruchentwicklung eines Modellversuchs beim Lauf über die Stahlseilscheibe zeigt Abbildung 5.

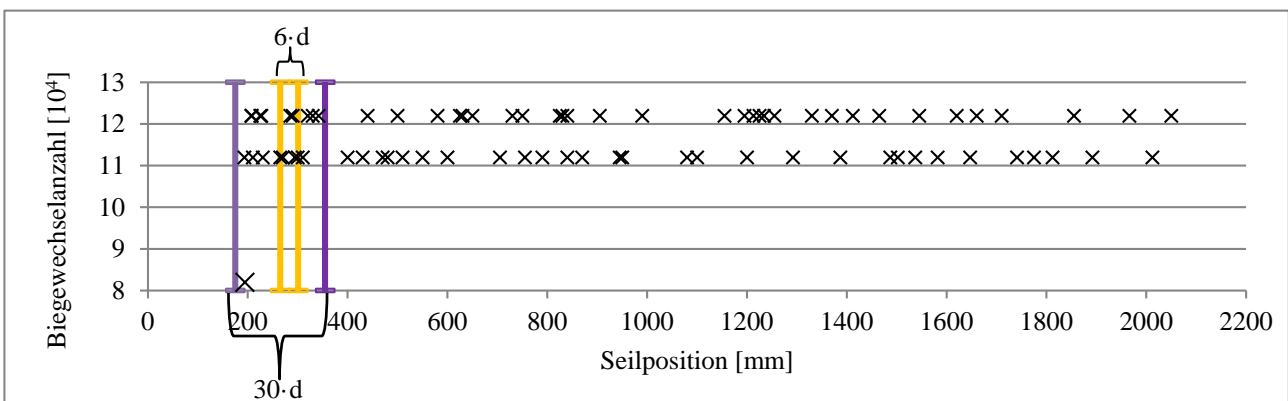


Abbildung 5. Drahtbruchentwicklung eines Versuchs mit Stahlseilscheibe mit den Ablegekriterien 6-d und 30-d

Werden die beiden Drahtbruchentwicklungen aus Abbildung 4 und 5 miteinander verglichen, so zeigt der Versuch über die Kunststoffseilscheibe eine deutlich höhere Biegewechselanzahl bei weniger sichtbaren Drahtbrüchen auf, wodurch die Gefahr eines plötzlichen Seilrisses hoch ist.

Abbildung 6 gibt einen Überblick zu den erreichten Biegewechseln der jeweiligen Versuche. Dabei beschreiben die Versuchsbezeichnungen in Großschrift die Versuche mit modifizierten Kunststoffen, mit nur einem Großbuchstaben am Anfang die Versuche mit dem naturbelassenen Polymer- bzw. Stahlwerkstoff.

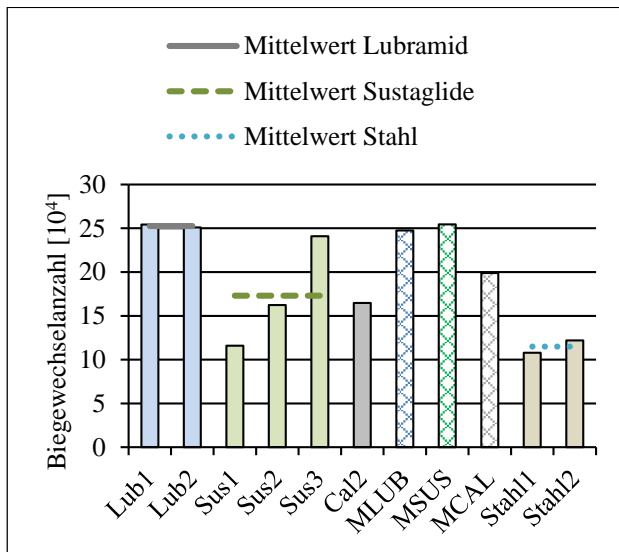


Abbildung 6. Erreichte Biegewechsel der Modellversuche bis zur Ablegereife

### 3.1.3 ERGEBNISSE ZUM SEILSCHEIBENVERSCHLEIß

Aus der Rillentieftendifferenz der beiden Scheiben, deren Tiefe vor und nach dem Versuch mit dem Linienlaser ermittelt wurde, sowie dem zurückgelegten Seilweg beim Überfahren der Seilscheibe bis zur Ablegereife, berechnet sich ein spezifischer Rillenverschleiß für jeden Versuch, der in Abbildung 7 dargestellt ist.

Wie bereits in den tribologischen Versuchen, tritt auch in den Modellversuchen beim Lubramid der kleinste Verschleiß auf. Ein nennenswerter Unterschied zum modifizierten Lubramid besteht nicht. Selbiges gilt auch für das Calaumid. Erhebliche Schwankungen liefert das Sustaglide. Werden die Abbildungen 6 und 7 miteinander verglichen, sind diese Schwankungen auch in der Anzahl der Biegewechsel zu sehen. Der Verschleiß der ersten beiden Sustaglide-Versuche war für Seil und Seilscheibe höher als beim dritten Versuch.

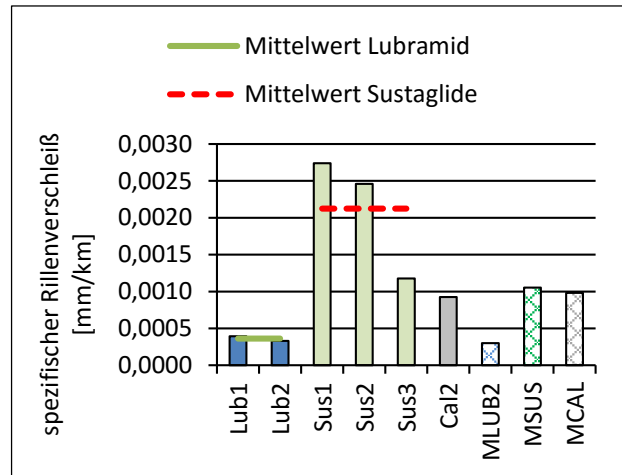


Abbildung 7. Seilrillenverschleiß der Modellseilscheiben

## 3.2 VERSUCHE AM GROSSPRÜFSTAND

### 3.2.1 VERSUCHSAUFBAU

Der Großprüfstand besteht aus 3 Seilscheiben des Versuchsmaterials mit einem wirksamen Scheibendurchmesser von 332 mm und wird über eine reversierende Treibscheibe angetrieben. Als Prüfseil wurde ein Aufzugsseil D915 CZ 1770 zZ mit einem Durchmesser von 16 mm verwendet, welches hydraulisch auf eine Seilkraft von 25 kN gespannt wurde. Anders als beim Modellprüfstand konnte beim Großprüfstand der Seiltrieb bis zum Seilbruch gefahren werden. Für einen Versuch wurden 3 Seilscheiben eingesetzt, wodurch sich 3 separate Biegezone ergaben. Der entsprechende Aufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.

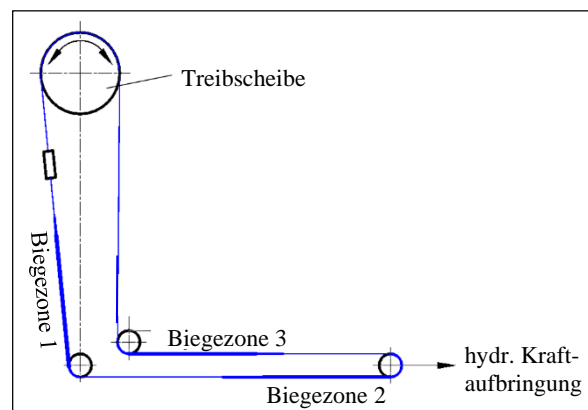


Abbildung 8. Versuchsaufbau des Großprüfstands

### 3.2.2 VERSUCHSERGEBNISSE AM GROSSPRÜFSTAND

Am Großprüfstand wurden bestrahlte Kunststoffseilscheiben aus Lubramid und Calaumid untersucht sowie ein Referenzversuch mit gehärteten Stahlseilscheiben durchgeführt. Eine Übersicht zu den erreichten Biegewechselanzahlen bis zur Seilabgereife und -lebensdauer liefert Abbildung 9.

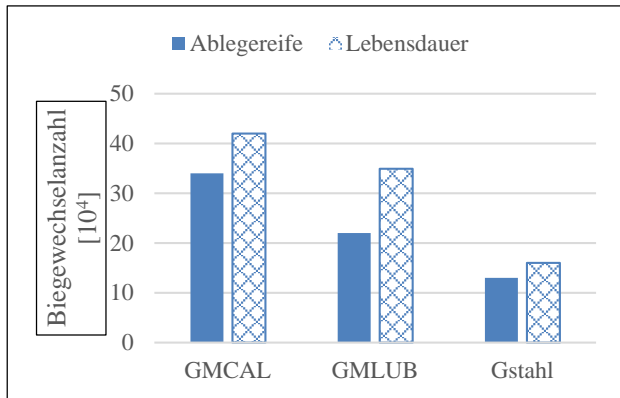


Abbildung 9. Anzahl der erreichten Biegewechsel der Versuche am Großprüfstand

Aufgrund der geometrischen Verhältnisse zeigt die Drahtbruchentwicklung am Großprüfstand ein deutlich ausgezogeneres Bild gegenüber dem Drahtbruchverlauf der Modellversuche. Auch war das Prüfseil am Großprüfstand beim Seilbruch in allen Versuchen noch mit ausreichend Schmierstoff versehen. Abbildung 11 zeigt am Beispiel des strahlenvernetzten Calaumids die Drahtbruchentwicklung für die Versuche mit Kunststoffseilscheiben.

In den beiden Versuchen mit Kunststoffseilscheiben entstanden nur wenige Drahtbrüche auf der Lauffläche. Die meisten Drahtbrüche traten seitlich und auf der Außenseite auf. Wie auch bei den Untersuchungen am Modellprüfstand entstanden die Drahtbrüche vorwiegend im Seilinneren.

ren, nur in einem Fall war ihre Entstehung äußerlich. Gegen Ende der Seillebensdauer drangen die inneren Drahtbrüche nach außen und wurden, insbesondere bei der Biegung des Seils, sichtbar bzw. führten an vereinzelt Stellen zu Litzenablösungen.

Bei den Kunststoff-Versuchen waren nach dem Erreichen der Seillebensdauer oftmals sehr viele Drahtbrüche auf den Außenlitzen zusehen, mit zum Teil mehreren Litzenablösungen. Die Begutachtung des Seilinneren zeigte an einigen Abschnitten lokale Drahtbruchkonzentrationen mit derart vielen Drahtbrüchen auf, bei denen die Seileinlage förmlich zerstükkelt wurde. Um einen Schädigungsvergleich heranzuziehen, wurden die Drahtbrüche gezählt und auf den betrachteten Seilabschnitt normiert. Die Seilschädigung der jeweiligen Biegezonen der Versuche ist in Abbildung 10 dargestellt.

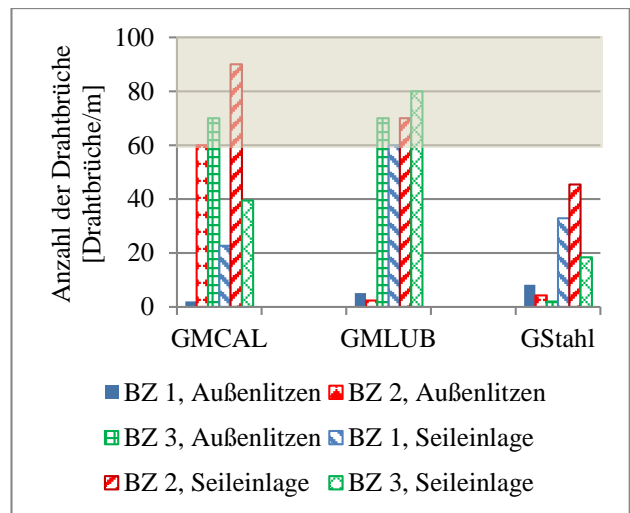


Abbildung 10. Schädigungsbeurteilung nach Erreichen der Seillebensdauer, normiert auf Drahtbrüche je Meter

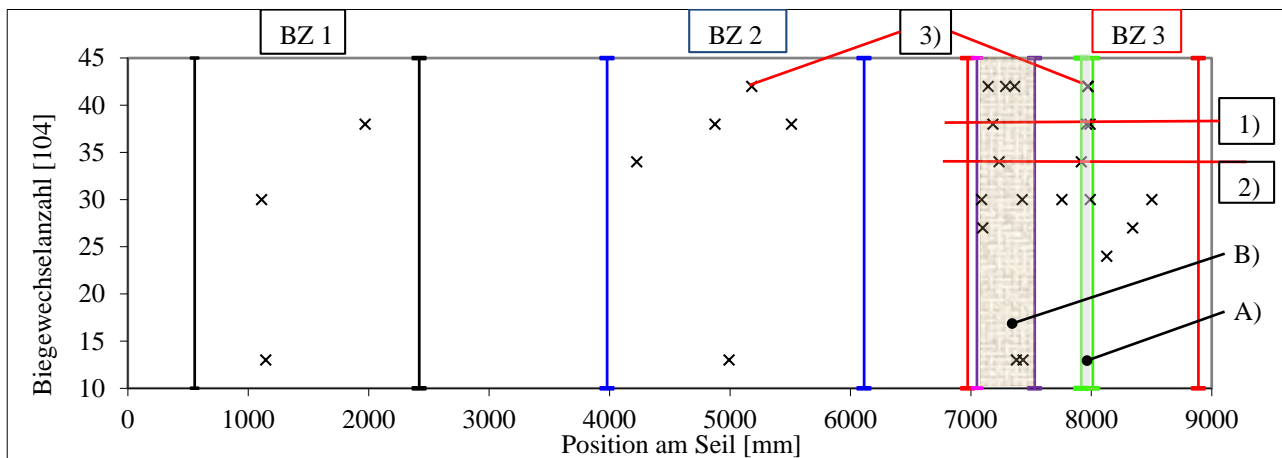


Abbildung 11. Drahtbruchentwicklung des strahlenvernetzten Calaumidversuchs mit den drei Biegezonen BZ 1, BZ 2 und BZ 3; 1) Ablegereife für den Bereich 6-d; 2) Ablegereife für den Bereich 30-d; 3) Litzenbruch; A) Bereich 6-d; B) Bereich 30-d

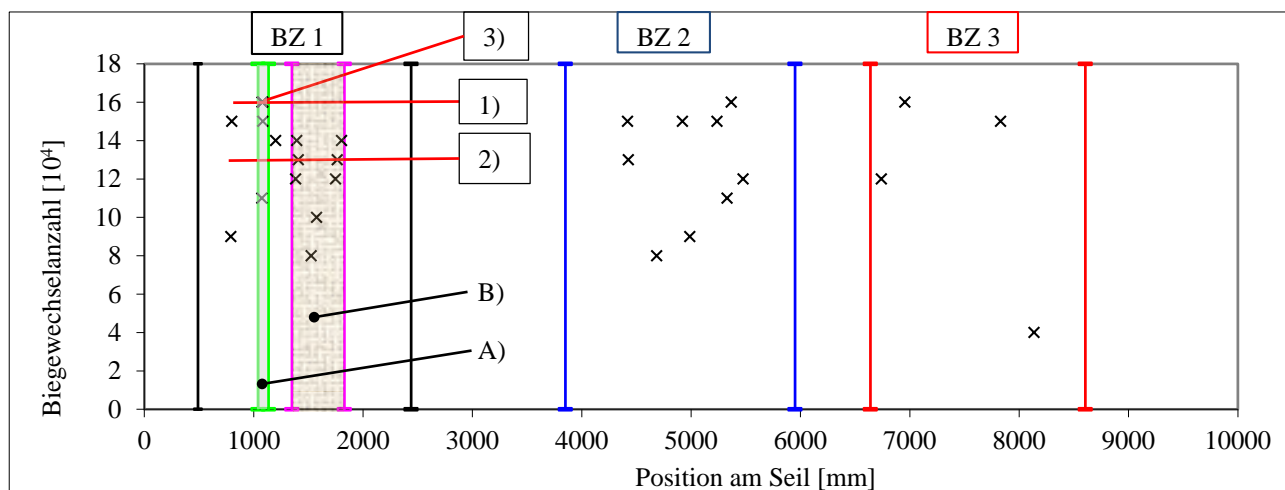


Abbildung 12. Drahtbruchentwicklung des Stahlscheibenversuchs mit den drei Biegezonen BZ 1, BZ 2 und BZ 3; 1) Ablegereife für den Bereich 6-d; 2) Ablegereife für den Bereich 30-d; 3) Litzenbruch; A) Bereich 6-d; B) Bereich 30-d

In den Seilabschnitten, bei denen eine quantitative Drahtbruchermittlung aufgrund der hohen Schädigung nicht möglich war, wurde in Abbildung 10 die Drahtbruchanzahl fiktiv auf 60 Drahtbrüche je Meter gesetzt und reicht abhängig von ihrer qualitativen Schädigungsbeurteilung bis maximal 90 Drahtbrüche je Meter.

Aus Abbildung 10 geht hervor, dass die äußeren und inneren Drahtbrüche beim Versuch über die Stahlscheibe quantifizierbar sind, während die Versuche über die bestrahlten Kunststoffseilscheiben oftmals nur qualitativ ermittelbar sind. Die Drahtbruchentstehung findet beim Lauf über Kunststoffseilscheiben vorrangig im Seilinneren statt und liefert nach dem Erreichen der Seillebensdauer eine zerstückelte Seileinlage. Darum stellen die Versuche mit Kunststoffseilscheiben einen Unsicherheitsfaktor für die Betriebsdauer sowie eine Gefahr für einen plötzlichen Seilriss dar.

Beim Referenz-Versuch mit der Stahlseilscheibe wurden beim Erreichen der Ablegereife bei 130.000 Biegewechseln insgesamt 15 äußere Drahtbrüche registriert. Im Vergleich zu den Versuchen mit den Kunststoffseilscheiben am Großprüfstand waren bei 130.000 Biegewechseln beim Calamid-Versuch 4 Drahtbrüche, beim Lubramid-Versuch 5 Drahtbrüche auf dem gesamten Seil sichtbar. Beim Stahlscheiben-Versuch ist die Biegezone 1 äußerlich am meisten geschädigt worden und führte letztlich durch den Litzenbruch zum Versuchsabbruch. Abbildung 12 zeigt die Drahtbruchentwicklung des Versuchs mit der gehärteten Stahlseilscheibe auf dem Großprüfstand.

### 3.2.3 SEILSCHEIBENVERSCHLEISS AM GROßPRÜFSTAND

Die Verschleißbeurteilung der Kunststoffseilscheiben am Großprüfstand erfolgte aus messtechnischen Gründen

nur qualitativ. Während das Lubramid in den Modellversuchen ausgezeichnete Ergebnisse zum Rillenverschleiß wie auch in den vorangegangenen tribologischen Untersuchungen zeigte, kam es am Großprüfstand zu hohem abrasiven Verschleiß der Seilrille. Viele kleine Kunststoffpartikel lösten sich in der Kontaktzone zwischen Seil und Seilscheibe, möglicherweise durch das spröde Verhalten des strahlenvernetzten Lubramids unter dem Einfluss vieler Biegewechsel bei hoher Belastung. Die Seilscheibe in Biegezone 3 wurde dabei am meisten betroffen, was auch auf die größere Anzahl an äußeren Drahtbrüchen in dieser Biegezone zurückzuführen sein könnte. Beim strahlenvernetzten Calamid konnten diese Ereignisse nicht beobachtet werden.

## 4 MASSENOPTIMIERUNG DER KUNSTSTOFFSEILSCHEIBEN

Anhand der Festigkeitseigenschaften erfolgte eine von der Seilkraft abhängige massenoptimierte Scheibengeometrie. Als Konstruktionsvarianten kamen Seilscheiben mit Steg, Verstrebungen oder Bohrungen in Frage. Bis auf die Außen- und Innendurchmesser sowie die Breite der Scheibe und dem Rillendurchmesser wurden die entsprechenden Maße für Steg, Bohrung oder Verstrebung als Variablen in die Datenbank eingegeben. Mit gewählten Seilkräften von 5 kN bis 40 kN, einem zulässigen Seilablenkwinkel von  $12^\circ$  und einem gleichmäßigen Hexaedernetz wurden die FEM-Simulationen für die Scheibenkonstruktionen durchgeführt. Mithilfe des Programms Matlab wurden die Belastungsmatrizen errechnet und als APDL in die Datenbank von Ansys Workbench eingegeben. Für den Sicherheitsnachweis wurden die Berechnungsgleichungen von indirekten Output-Parametern, welche die Randbedingungen von Sicherheiten beschreiben und auf Grundregeln der Technischen Mechanik basieren, ermittelt. Die Lösung dieser Berechnung wurde über eine



direkte Schnittstelle einem CAD-Programm übertragen, aus dem ein dreidimensionales Bauteil folgte.

Die Optimierung betrachtet jede Konstruktionsvariante einzeln. Dabei werden die konstruktiven Merkmale dieser Varianten, beispielsweise die Anzahl und Größe der Verstrebungen, automatisch berechnet. Nach erfolgter Massoptimierung stellt sich für die entsprechende Variante ein Gewichtsverlauf abhängig von der Seilkraft ein. Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Regressionskurven für die Konstruktionsvariante mit Verstrebungen aller drei Kunststoffe, wobei das Calaumid die geringste Masse bezogen auf die ertragbare Seilkraft aufweist.

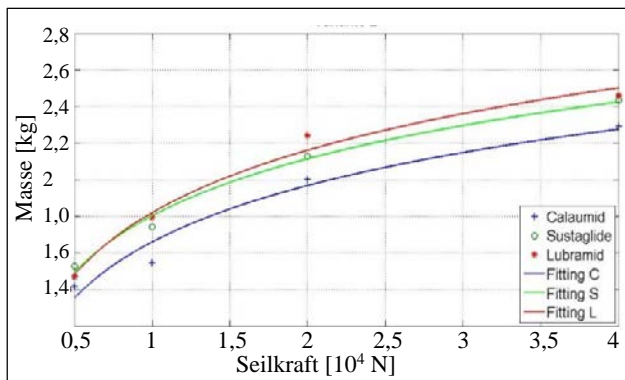


Abbildung 13. Gewichtsoptimierung der Seilscheibenvariante mit Verstrebungen abhängig von der Seilkraft

Aufgrund dieser Kurvenverläufe können die jeweiligen Werkstoffe und Varianten untereinander verglichen sowie durch deren mathematische Beschreibung weitere Gewichtsprognosen getroffen werden. Im Ergebnis erwies sich das modifizierte Calaumid mit der Scheibenkonstruktion mit Verstrebungen als das Gewichtsoptimum. In Abbildung 14 ist das CAD-Modell der favorisierten Scheibenkonstruktion für eine Seilkraft von 40 kN dargestellt.

Abhängig vom Werkstoff ist die Variante mit Verstrebungen im Vergleich zu den Bohrungen ca. 20 % bis 30 %, bei der Variante mit Steg um ca. 6 % bis 10 % leichter. Gegenüber der unbestrahlten und konstruktiv unveränderten Calaumid-Seilscheibe aus dem Großprüfstand erbrachte die beste Variante eine Gewichtsreduzierung von 33 %.

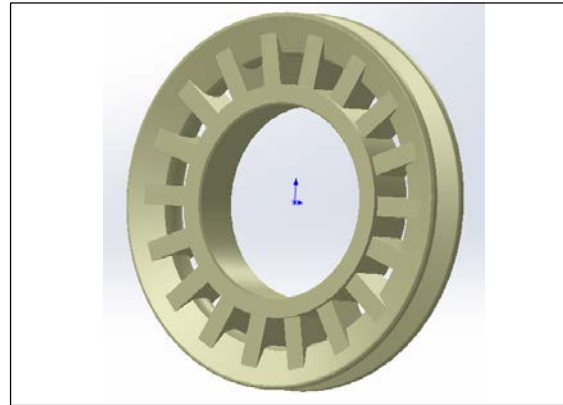


Abbildung 14. CAD-Modell der optimierten Calaumid-Seilscheibe mit den berechneten Verstrebungen für eine Seilkraft von 40 kN

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Die strahlenchemische Vernetzung der gewählten Kunststoffe Calaumid, Sustaglide und Lubramid erbrachte eine deutliche Festigkeitserhöhung bei vermindertem oder nahezu unverändertem Verschleißverhalten. Die optimale Bestrahlungsmodifikation zeigte sich unter Stickstoffatmosphäre.

Das Sustaglide sowie auch das Lubramid besitzen Festschmierstoffeinlagerungen, die in Versuchen mit dem Rotationstribometer mit Abstand die besten reibungs- und Verschleißkennwerte erreichten. In den Biegewechselversuchen mit dem Seil wiesen die Versuche mit diesen Kunststoffen zwar leicht höhere Biegewechselanzahlen bis zur Ablegereife auf, aber keine wesentliche Verschleißreduzierung der Seilrille. Unter hoher Belastung am Großprüfstand zeigte das modifizierte Lubramid sogar eine negative Verschleißentwicklung gegenüber dem modifizierten Calaumid.

Die erreichte Festigkeitserhöhung der bestrahlten Kunststoffseilscheiben erbrachte keine signifikante Änderung des zeitlichen Auftretens der sichtbaren Drahtbrüche. Die Ablegereife konnte somit nicht sicherer bestimmt werden als beim Lauf über Seilscheiben mit unbestrahltem Kunststoff. Insgesamt weisen die Versuche mit Kunststoffseilscheiben wesentlich höhere Biegewechselanzahlen als beim Lauf des Drahtseils über Stahlseilscheiben auf. Die durchgeführten Referenzversuche bei gleicher Biegewechselanzahl zeigten, dass die Seile der Stahlseilscheibenversuche insgesamt mehr geschädigt wurden als die Seile der beiden Lubramid-Versuche.

Aufgrund der Festigkeitserhöhung durch das Bestrahlen der Kunststoffseilscheiben ist eine Weiterführung des Leichtbaus möglich, indem die Kunststoffseilscheibe durch eine leichtere Scheibenkonstruktion ausführbar ist.

## LITERATUR

- [Bar00] Barthel, T.: *Betriebsdauer von Drahtseilen beim Lauf über Kunststoff-Seilrollen*. Dresden: Technische Universität, Dissertation, 2010.
- [BGS09] BGS-GmbH: *Hart im Nehmen – Strahlenvernetzung für hohe Temperaturen*. In: *Kunststoff Magazin online* (2009), S.46 - 47
- [Bro08] Brocka-Krzeminska, Z.: *Werkstoff und Einsatzpotential strahlenvernetzter Thermoplaste*. Erlangen-Nürnberg, Universität, Dissertation, 2008
- [DIN01] DIN ISO 4309: *Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage*. Juni 2013
- [DIN02] DIN 6814-2: *Begriffe in der radiologischen Technik, Strahlungsphysik*. Juli 2000
- [DIN03] DIN 6814-3: *Begriffe in der radiologischen Technik, Dosimetrie*. März 2014
- [Els08] Elsner, P.: *Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [Ehr06] Ehrenstein, G. W.; Brocka, Z.: *Strahlenvernetzung von Polyamid zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens*. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik* (2006)
- [Ehr07] Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S.: *Beständigkeit von Kunststoffen*. Band 1. München: Carl Hanser Verlag, 2007
- [Int01] [http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/26441625/26604208/Zwei-Fliegen-mit-einer-Klappe/art\\_co\\_INSTANCE\\_0000/maximized/](http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/26441625/26604208/Zwei-Fliegen-mit-einer-Klappe/art_co_INSTANCE_0000/maximized/)
- [Kri09] Krieger, H.: *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlungsschutzes*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2009
- [Vol11] Volke, S.: *Modifizierung der Werkstoffeigenschaften von Polypropylen-Kompositen durch eine Hochtemperatur-Elektronenbehandlung*. Dresden. Technische Universität, Dissertation, 2011

**Dipl.-Ing. Tobias Müller**, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Tobias Müller is research assistant at the chair of logistics engineering since 2010. Between 2004 and 2010 he studied mechanical engineering at the Universität Dresden. During the time as research assistant, he accompanied projects for industrial trucks, wire ropes and fatigue tests. His current research areas are the design of machinery components for material handling systems, improving the stage mast in industrial trucks and finite element analysis.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.

Phone: +49 351 463 33510

Fax: +49 351 463 35499

E-Mail: [Tobias.Mueller@tu-dresden.de](mailto:Tobias.Mueller@tu-dresden.de)

**Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt**, Head of the Chair of Logistics Engineering, Director of the Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Logistics Engineering in the Mechanical Engineering faculty since 2008. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dortmund and a Master degree in industrial engineering from the Georgia Institute of Technology. He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His research areas are the design and optimization of facility logistics and production systems including a focus on the machinery and components involved. He currently works on energy efficient control strategies in material flow, fast approximation in early planning stages by means of standard design modules, online data analysis, formal verification of control logic, performance analysis of decentral and selfcontrolled systems, lightweight structures in material handling and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respectively.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.

Phone: +49 351 463 32538

Fax: +49 351 463 35499

E-Mail: [thorsten.schmidt@tu-dresden.de](mailto:thorsten.schmidt@tu-dresden.de)

**Dipl.-Ing. (BA) Alexander Schaffrath**, Project engineer in the department of plastics, plastic modification and plastic testing at EBF Dresden GmbH.

Alexander Schaffrath studied from 2001 to 2004 Environmental and Radiation Engineering at the State Academy Riesa. Since 2004 he is a project engineer at EBF Dresden GmbH and he is busy superficial with issues of application-oriented design of plastics, their modification and their testing in the laboratory and industrial scale. The focus of his work is concerned with the industrial use of high-energy radiation for physical crosslinking of thermoplastics. In current research topics Mr. Schaffrath investigate possibilities to reactive decomposition of rubber wastes based on high-energy radiation to return them to a reprocessing process.

Address: EBF Dresden GmbH, Clara-Zetkin-Straße 31, 01159 Dresden, Germany.

Phone: +49 351 422 9124

Fax: +49 351 422 9119

E-Mail: [alexander.schaffrath@ebf-dresden.de](mailto:alexander.schaffrath@ebf-dresden.de)

**Dipl.-Ing. Torsten Blum**, Managing Director of EBF Dresden GmbH.

Torsten Blum is Managing Director of the EBF Dresden GmbH since 2007. His company is engaged in the material and component development focusing on lightweight construction of fiber composites and thermoplastics. He studied from 1988 to 1993 electrical engineering at the Technical University of Dresden. From 1993 to 1997 he was a researcher at the Institute of Semiconductur and Systems Engineering at the Technical University of Dresden. From 1994 to 2007, he was Managing Director of Ostec Oberflächen- und Schichttechnologie GmbH.

Address: EBF Dresden GmbH, Clara-Zetkin-Straße 31, 01159 Dresden, Germany.

Phone: +49 351 422 9112

Fax: +49 351 422 9119

E-Mail: [torsten.blum@ebf-dresden.de](mailto:torsten.blum@ebf-dresden.de)