

Endverbindungen für dynamisch belastete textile Zugmittel

Fibre Rope Terminations to be used in Dynamic Applications

David Holschemacher
Peter Streubel
Markus Michael

*Technische Universität Chemnitz
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Professur Fördertechnik –
Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente*

Hochfeste Faserseile sind aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit prädestiniert für dynamische Anwendungen in der Fördertechnik. Der Kenntnisstand über die Zeitfestigkeit zugehöriger Endverbindungen zur Kraffteinleitung ist jedoch unzureichend. Gegenstand der vorgelegten Arbeit ist die Entwicklung einer für die Anwendung von hochfesten Faserseilen geeigneten Prüfvorschrift sowie die vergleichende Untersuchung bekannter Endverbindungen für hochfeste Faserseile im Zug-schwellversuch.

[Schlüsselwörter: hochfeste Faserseile, Endverbindung, Zug-schwellversuch, dynamisch, Fördertechnik]

High-strength fibre ropes are, due to their high specific strength, predestined for being used in dynamically loaded applications in conveying engineering. Admittedly, the state of knowledge regarding needed rope terminations and for adequate force transmission is insufficient. Main subject of the presented work is the development of a test method suitable for high-strength fibre ropes, and further a competitive investigation of the performance of common rope terminations for high-strength fibre ropes under tension-tension loading.

[Keywords: high-strength fibre ropes, rope terminations, tension-tension test, dynamic load, conveying engineering]

1 EINLEITUNG FASERSEILE IN DER FÖRDERTECHNIK

Moderne textile Maschinenelemente werden in der Fördertechnik unter anderem in Form von geflochtenen Seilen aus hochfesten, hochmoduligen Polymerfasern verwendet. Der Anwendungsbereich erstreckt sich dabei vorrangig auf Anschlagen, Heben und Fördern von Lasten, also das Übertragen von Zugkräften. Die Bruchkräfte von Seilen aus hochfesten Polymerfasern sind vergleichbar mit denen von Stahldrahtseilen gleichen Nenndurchmessers.

Zudem besitzen textile Maschinenelemente aus Hochleistungsfasern typische Vorzüge wie eine hohe spezifische Festigkeiten (bei etwa 1/5 bis 1/7 der Dichte von Stahl), günstige Biegeeigenschaften sowie Medienbeständigkeit. So haben heutzutage geflochtene Seile aus hochfesten Fasern bereits in einigen Anwendungen das Stahlseil abgelöst. Bekannt sind zum Beispiel Aufzugseile aus Aramidfasern, Schlepp- und Aufstiegswinden mit textilen Seilen im Forstsektor und in der Landwirtschaft, aber auch ein- und mehrlagige Windenanwendungen im Bergbau-, Offshore- und Kranbereich. Dennoch werden in aktuellen Anwendungen der Fördertechnik vorrangig Stahlseile eingesetzt, da der vergleichsweise unzureichende Untersuchungs- und Erkenntnisstand im Vergleich zum Stahlseil eine sichere und anwendungsgerechte Dimensionierung noch nicht für alle Einsatzbedingungen zulässt.

Es besteht jedoch besonders für die Anwendung als Antriebselement in hochdynamischen Förderanlagen, wie Shuttle-Anlagen oder Verfahrwagen, durch den Einsatz hochfester synthetischer Faserseile ein Energieeinsparpotenzial. Die hohe spezifische Festigkeit im Vergleich zu Stahldraht kann hier zu einer signifikanten Verringerung der bewegten Massen und in der Folge zu einer Reduktion des Energiebedarfes führen.

2 STAND DER TECHNIK UND GRUNDLEGENDE TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN ENDVERBINDUNGEN FÜR DYNAMISCH BELASTETE TEXTILE MASCHINENELEMENTE

Eine zentrale Problemstellung beim Einsatz hochfester synthetischer Faserseile besteht in der Einleitung der zu übertragenden Kräfte. Die Kraffteinleitung in ein Seil erfolgt durch die Seilendverbindung. Diese ermöglicht eine zweckgerichtete Verbindung (Anseilen) bzw. Fixierung (Anschlagen) und folglich auch die Nutzung in technischen Anwendungen. Zur Kraftübertragung von einem Seil auf

andere Konstruktionselemente müssen Kräfte aus den verhältnismäßig dünnen Litzen an den Seilenden in möglichst kurze Verankerungen ein- und ausgeleitet werden. Grundlegende Anforderung an eine Seilendverbindung ist die Übertragung statischer und dynamischer Beanspruchungen. Hinzu kommen weitere Forderungen, wie z.B. ein geringer Platzbedarf, eine leichte und preiswerte Herstellung, die Möglichkeit der Konfektionierung vor Ort, Temperatur- und Medienbeständigkeit, Lösbarkeit sowie einfache Handhabung.

Seilendverbindungen können hinsichtlich verschiedener Merkmale klassifiziert werden. Im Wesentlichen unterscheidet man zunächst nach dem physikalischen Wirkprinzip. So können die Endverbindungen in die Gruppen Kraftschluss, Form- und Kraftschluss sowie Kraft- und Stoffschluss unterteilt werden. Bei kraftschlüssigen Endverbindungen differenziert man zudem hinsichtlich der Art der Normalkrafterzeugung. Resultiert die Normalkraft aus der Stranglast z.B. durch den Einsatz eines Keiles oder Kegels oder durch Nutzen des charakteristischen Zusammenziehens der Textilstruktur unter Last, handelt es sich um einen aktiven Kraftschluss. Eine stranglastabhängige Normalkraft führt dabei in der Regel zu Selbsthemmung. Wird die Normalkraft jedoch durch externes Klemmen oder Pressen aufgebracht, entsteht ein passiver Kraftschluss. Ein Überschreiten der Reibkraft führt hier zum Lösen und damit zum Versagen der Verbindung.

Der Untersuchungsstand zu Faserseilen und damit einhergehend von zugehörigen Endverbindungen ist unzureichend. Dies spiegelt sich auch im Normungsstand nieder. DIN EN ISO 2307 [ISO 2307] beschreibt Methoden zur Bestimmung physikalischer und mechanischer Eigenschaften von Faserseilen und stellt damit die einzige internationale und allgemeingültige Norm für Faserseile dar. Für den hier beschriebenen statischen Zugversuch zur Bestimmung der Seileigenschaften sind als Endverbindungen der Augspieß sowie Schlingscheiben (Cours de Chasse) zugelassen. Die Vorgehensweise ist dennoch für vergleichende statische Zugversuche für Endverbindungen im Allgemeinen geeignet. Die einzige genormte Endverbindung für Faserseile ist der Spleiß. DIN 83319 [DIN 83319] beschreibt die Ausführung verschiedener Spleißvarianten zur Herstellung einer Seilschleife, einer Endlosschlinge sowie zur Verbindung zweier Seilenden. Ein normgerecht ausgeführter Spleiß erreicht im statischen Zugversuch mindestens 90% der Seil-Mindestbruchkraft. Hinsichtlich dynamischer Belastbarkeit werden keine Aussagen getroffen. Für Stahldrahtseile sind zudem nach DIN EN 13411 die Endverbindungstypen Spleißen von Seilschleifen für Anschlagseile [DIN 13411-2], Pressklemmen [DIN 13411-3], Vergüssen [DIN 13411-4], Bügelklemmen [DIN 13411-5] und Seilschlösser [DIN 13411-6, DIN 13411-7] sowie Stahlfittinge und Verpressungen [DIN 13411-8]

genormt. Die Norm beschreibt zudem einen für die Endverbindungstypen Pressklemme, Verguss Seilverschluss und Stahlfitting gültigen Dauerschwingversuch. Dabei ist eine zyklische Kraft von 15 % bis 30 % der Mindestbruchkraft des Seiles entlang der Seilachse aufzubringen. Die Endverbindung muss 75 000 Lastwechsel ertragen und anschließend eine Restbruchkraft von 80 % der Seil-Mindestbruchkraft ertragen. Für den Einsatz eines Flämischen Auges als Sonderform der Pressklemme für Hubseile für Krane ist zudem ein Dauerschwingversuch mit einer zyklischen Kraft zwischen 2,5 % und 20 % der Mindestbruchkraft des Seiles beschrieben. Für eine vergleichende Untersuchung der Eignung verschiedener Endverbindungen für den Einsatz von hochfesten Faserseilen bei dynamischer Beanspruchung steht folglich bisher kein genormtes, allgemein gültiges Prüfverfahren zur Verfügung.

Zugschwellbeanspruchte Seile mit Vergüssen als Seilendverbindung von Stahldrahtseilen erzielen regelmäßig die größten Schwingenspielzahlen und gewährleisten in der Regel ein Versagen auf der freien Seillänge. Daher gilt der Verguss für Stahldrahtseile als Referenzendverbindung. Für Faserseile gilt gleiches bei statischer Belastung für den Spleiß. Für dynamische Belastungen hat sich noch keine Endverbindung als Referenz etabliert.

Die Wahl einer geeigneten Endverbindung für hochfeste synthetische Faserseile ist abhängig von Konstruktion, Material und Nutzung. Der Einsatz herkömmlicher, für das Stahldrahtseil entwickelter und genormter Seilendverbindungen bringt in der Anwendung mit hochfesten synthetischen Faserseile gewisse Probleme mit sich, da Faserseile grundsätzlich andere Eigenschaften als Stahldrahtseile aufweisen. Entsprechend des jetzigen Entwicklungsstandes können mit diesen Endverbindungen die statischen und dynamischen Festigkeiten im Einsatz mit synthetischen Faserseilen nur teilweise ausgereizt werden. Dies ist mit der material- und konstruktionsbedingten im Vergleich zum Stahlseil deutlich geringeren Quersteifigkeit und Abrasionsbeständigkeit zu begründen. Hier besteht besonderer Entwicklungsbedarf, aber auch ein hohes Potenzial.

Die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Zugmittel und Endverbindung führen besonders bei dynamischen Beanspruchungen zu technischen Herausforderungen hinsichtlich der Krafteinleitung. Der Übergang der Materialsteifigkeiten im Bereich der Endverbindung erfolgt nicht kontinuierlich. Daraus resultieren örtliche Spannungsspitzen, die zu einem Materialversagen an der Endverbindung führen können. Im Bereich der Endverbindung erfährt das Seil ein Belastungskollektiv aus einer schwelenden Zugkraft, Pressung sowie innerer und äußerer Reibung. Zudem haben interne Faserinteraktionen, wie Scherung, Abschneidung, axiale Kompression und Knickung einen erheblichen Einfluss auf die Dauerfestigkeit des Sei-

les unter Zugbeanspruchung. Die Endverbindung beeinflusst folglich die Lebensdauer eines textilen Maschinenelementes erheblich.

3 AUFSTELLEN EINER ANWENDUNGSNAHEN VERGLEICHBAREN PRÜFVORSCHRIFT, DIE DEN BESONDEREN CHARAKTERISTIKEN TEXTILER MASCHINENELEMENTE AUS HOCHFESTEN FASERN UND DEREN ANWENDUNG RECHNUNG TRÄGT.

Während die Lebensdauer von hochfesten Faserseilen unter Biegewechselbeanspruchung in zahlreichen Untersuchungen erforscht wurde, gibt es für ausschließlich durch schwellende Zugkraft belastete Faserseile keine vergleichbaren Untersuchungen. Die Deutung von Zugschwellversuchen ist aufgrund fehlender Prüfvorschriften zudem schwierig. Es fehlt eine belastbare Auswertemethode, die den zahlreichen Einflussfaktoren wie Amplitude und Mittelspannung, aber auch dem Einfluss von Fasermaterial und Seilkonstruktion Rechnung trägt. Da dynamische Belastungen auch in sicherheitstechnisch relevanten Anwendungen auftreten, ist die Kenntnis über die zu erwartende Lebensdauer des Gesamtsystems Seil und Endverbindung elementar. Bis dato fehlen dazu gesicherte Daten zur Ermittlung der lebensdauerbestimmenden Seil- und Belastungsparameter. Die anwendungsnahe Prüfung von hochfesten Faserseilen ist jedoch der Ausgangspunkt für eine Abschätzung der Eignung für den Einsatz in der Fördertechnik. Um Faserseile in der Breite der Anwendungen einsetzen zu können, sind Versuche mit verschiedenen Endverbindungen notwendig. Um verschiedene Endverbindungen im qualitativen und quantitativen Vergleich untersuchen zu können, wurde die im Folgenden aufgeführte Prüfmethodik entwickelt und herangezogen.

Die Dimensionierung des Systems Seil und Endverbindung richtet sich vor allem nach der Art des möglichen Versagens. Das Versagen des Systems Seil und Endverbindung geht mit dem Verlust seiner Funktion einher. Dies tritt dann ein, wenn das Seil oder die Endverbindung beschädigt ist (unzulässige Verformung, Gewaltbruch, Dauerbruch, ggf. Risse, mechanische Abnutzung usw.) oder es zu einem Durchrutschen des Seils an der Endverbindung kommt. Für die Auslegung muss demnach gewährleistet sein, dass die inneren Beanspruchungen, die aus den äußeren Belastungen resultieren, mit einer ausreichenden Sicherheit gegen das Versagen aufgenommen werden können. Einzelne Belastungsspitzen können dabei ein Vielfaches der Nennbelastung betragen und sind oft das Resultat von einzelnen Sonderereignissen wie Losbrechmomente, Anfahrtschläge oder Kurzschlussmomente und sind damit für den dynamischen Festigkeitsnachweis vernachlässigbar. Folglich ist es notwendig zusätzlich einen statischen Festigkeitsnachweis zu erbringen.

Die dynamischen Betriebsbeanspruchungen auf Seile und in der Folge auch auf deren Endverbindungen treten zumeist zufallsartig und in unterschiedlicher Größe und Häufigkeit auf. Ziel der Prüfvorschrift soll sein, diese Beanspruchungen möglichst wirklichkeitsnah abzubilden. Um eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen wird eine idealisierte dynamische Beanspruchung in Form eines sinusförmigen periodischer Beanspruchungs-Zeit-Verlaufes für die Zug-Schwell-Versuche gewählt. Die Beanspruchungsart ist dabei eine reine Schwellbeanspruchung. Dies bedeutet, dass das Spannungsverhältnis κ , welches sich als Quotient aus der Unter- und der Oberspannung berechnet gleich Null ist. Während eines jeden Zyklus der Prüfung wird das System Seil und Seilendverbindung folglich völlig entlastet. Dieses Vorgehen gewährleistet das Abdecken eines breiten Anwendungsspektrums. Zum einen stellt ruckartiges Belasten aus dem unbelasteten Zustand oft eine kritische Situation für eine Endverbindung dar. Dies betrifft vor allem jene Endverbindungstypen die den aktiven Kraftschluss nutzen. Zum anderen kann auf diese Weise mit einer vergleichsweise hohen Belastungsamplitude geprüft werden. Um dabei die technischen Grenzen von Steuerung und Kraftsensoren der Prüftechnik nicht zu überschreiten wird hierzu in Anlehnung an DIN 13411 [DIN 13411-3] für die Schwellunterkraft ein Toleranzbereich bis maximal 2,5 % der Seil-Mindestbruchkraft festgelegt.

Ermittelt wird die ertragbare Schwingenspielzahl N . Entsprechend der typischen Anwendungsfelder für hochfeste Faserseile sollen die Endverbindungen hinsichtlich einer endlichen Lebensdauer von maximal zwei Millionen Lastwechseln ausgelegt werden. Folglich gilt dieser Wert auch als Abbruchkriterium des Zug-Schwellversuches. Für weiterreichende Vergleiche kann anschließend die Restbruchkraft herangezogen werden. Aufgrund der helixartigen Seilstruktur kann es während der Versuchsdurchführung zu einer Erwärmung der Fasern kommen. Um signifikante Einflüsse durch Temperaturentwicklung in Folge von Reibung auszuschließen, wird die maximal zulässige Frequenz in Anlehnung an DIN 13411 [DIN 13411-3, DIN 13411-4, DIN 13411-6, DIN 13411-7, DIN 13411-8] mit 5 Hz festgelegt. Die Prüfung der Endverbindungen im Zug- und Zugschwellversuch erfolgte wie beschrieben im System mit dem geprüften Seil unter Laborbedingungen. Geprüft wurde dementsprechend mit vergleichsweise kleinen freien Seillängen und ohne äußere Umwelteinflüsse.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Ziel der experimentellen Untersuchungen war die vergleichende Eignungsprüfung bekannter Endverbindungen für hochfeste Faserseile für dynamische Anwendungen. Die experimentellen Untersuchungen erfolgten für eine unveränderte Seilkonstruktion aus Aramidfasern. Diese sind in Tabelle 1 dargestellt. Für die Seilkonstruktion wurde

nach DIN EN ISO 2307 [ISO 2307] eine Bruchkraft $F_B = 31,5$ kN ermittelt.

Tabelle 1: Herstellungsparameter der verwendeten Seilkonstruktion

Werkstoff	Aramidfaser Technora® T221
Durchmesser	6 mm
Machart	Rundgeflecht, 12 Litzen
Flechtlänge	43 mm
Zwirnaufbau	11x1670 dtex bei 20 m ⁻¹ gezwirnt 6xS und 6xZ
Ermittelte Bruchkraft	$F_B = 31,5$ kN

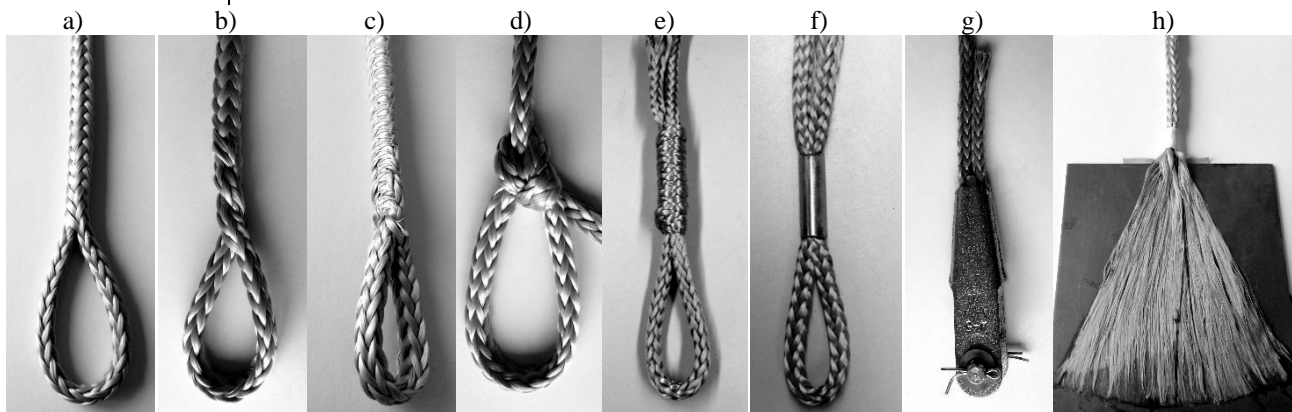


Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Endverbindungen: a) Augspleiß, b) Brummel Lock, c) vernähter Spleiß, d) Palstek, e) Henkerschlinge, f) Pressklemme, g) sym. Seilschloss, h) Klebverbindung

Spleiße im Allgemeinen sind manuell hergestellte, nicht lösbare Endverbindungen, bei denen die dauerhafte Verbindung durch Verflechten der einzelnen Seilstränge entsteht. Der Spleiß hält allein durch den aktiven Kraftschluss zwischen den Litzen. Die Normalkraft resultiert dabei aus der Bestrebung der Seilstruktur sich unter Last zu verjüngen. Die Prüfung erfolgte für drei Spleißvarianten. Der untersuchte Augspleiß wurde normgerecht nach DIN 83319 [DIN 83319] als Einsteckspleiß hergestellt. Weiterhin untersucht wurde der Brummel Lock, eine Spleißvariante, bei der sich der tote und der lebende Strang wechselseitig durchqueren. In der Folge sichert neben dem spleißtypischen Kraftschluss der entstehende Formschluss die Verbindung gegen ein belastungsbedingtes Lösen. Zudem erfolgte die Untersuchung einer hybriden Endverbindung aus Spleiß und Naht. Bei dem so entstehenden vernähten Spleiß erfolgt die Krafteinleitung in das Seil mittels Kraftschluss. Die Naht dient dabei der Sicherung der Litzen des toten Seilstrangs gegen Herausrutschen. Für alle untersuchten Spleißvarianten erfolgte die Prüfung für eine Spleißlänge von 20d. Der tote Strang wurde dabei über eine Länge von 6d fachmännisch ausgedünnt.

Untersucht wurden konventionelle Endverbindungen zur Herstellung einer Endverankerung am Seilende für Faserseile (Spleiß und Knoten), sowie jene, die konventionell vorrangig für Stahldrahtseile eingesetzt werden (Pressklemme und Seilschloss). Hinzu kommen eine hybride Lösung in Form eines vernähten Spleißes und eine geklebte Endverbindung. Die Prüfung der schlaufenbildenden Endverbindungen erfolgte dabei ohne Kauschen. Abbildung 1 zeigt die untersuchten Endverbindungen.

Aus der Endverbindungsgruppe der Knoten wurden der Palstek aufgrund seiner weit verbreiteten Anwendung sowie die Henkerschlinge untersucht. Letztere konnte im Rahmen von Vorversuchen zur Knotenfestigkeit bei hochfesten Faserseilen an der Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente der TU Chemnitz gute Festigkeitswerte erzielen. Knoten beruhen ebenso wie Spleiße auf aktivem, d.h. stranglastabhängigem, Kraftschluss. Die Verwindungen des Seiles im Knoten führen jedoch zu kleinen Biegeradien und in der Folge zu einer ungünstigen, überlagerten Beanspruchung der Struktur.

Die Pressklemme und das symmetrische Seilschloss sind konventionell für Stahldrahtseile eingesetzte Endverbindungen, bei denen unter Zuhilfenahme von Hilfsfügeteilen das ungewollte Lösen durch Kraftschluss verhindert wird. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in Anlehnung an DIN 13411 [DIN 13411-3]. Bei Pressklemmen wirkt eine statische Klemmkraft infolge plastischer Verformung einer Hülse. Demnach ist die Pressklemme die einzige untersuchte mechanische Verbindung bei der kein direkter

Zusammenhang zwischen Stranglast und Verbindungsfestigkeit besteht. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden Aluminiumpresshülsen verwendet. Aufgrund der geringen Quersteifigkeit von hochfesten Faserseilen erfolgte die Untersuchung des symmetrischen Seilsschlusses anhand eines nach DIN 13411 [DIN 13411-6] gefertigtes Seilsschloss für 4-5mm dicke Stahlseile.

Die untersuchte Klebeverbindung stellt als stoffschlüssige Endverbindung die Vorstufe zum Verguss dar und soll dabei Aufschlüsse über die mittels Adhäsion und Kohäsion erreichbare Verbindungsfestigkeit liefern. Dazu wurde die helixartige Seilstruktur besenartig aufgefächert und auf eine Stahlplatte geklebt (vgl. Abbildung 1 h). Hierzu wurde ein Zweikomponenten-Mischpolymer mit einer Topfzeit von 30 min verwendet.

4.1 STATISCHER FESTIGKEITSNACHWEIS

Zunächst wurde der statische Festigkeitsnachweis nach DIN EN ISO 2307 [ISO 2307] für die zu untersuchenden Endverbindungen erbracht. Die Prüfung erfolgte normgemäß mit einer Prüfgeschwindigkeit von $v_{\text{Prüf}} = 250$ mm/min und mit einer freien Seillänge $l_0 = 400$ mm. Hierzu wurde die Material-Prüfmaschine Z150 des Herstellers Zwick/Roell verwendet. Je Endverbindung wurden 10 Versuche durchgeführt. Die Ermittlung der Seilbruchkraft erfolgte mittels Seilchlingscheiben (Cors des Chasse) mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 20$. Die Klemmung der Seile am Auslauf der Seilchlingscheiben erfolgte mittels

hydraulisch betätigten Spannbacken. Die erreichten Bruchkräfte der untersuchten Endverbindungen sind in Tabelle 2 und Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 2: Ermittelte Bruchkräfte im statischen Zugversuch

Endverbindung	Bruchkraft F_B in N	Standardabweichung s in N	Varianzkoeffizient in %
Augspleiß	30.900	635,4	2,2
Brummel Lock	30.912	591,9	1,9
Vernähter Spleiß	31.020	973,1	3,0
Palstek	9.300	967,2	7,6
Henkerschlinge	12.420	732,8	5,9
Pressklemme	8.737	243,3	2,8
Sym. Seilsschloss	12.570	806,6	6,4
Klebeverbindung	19.286	2378,0	12,3

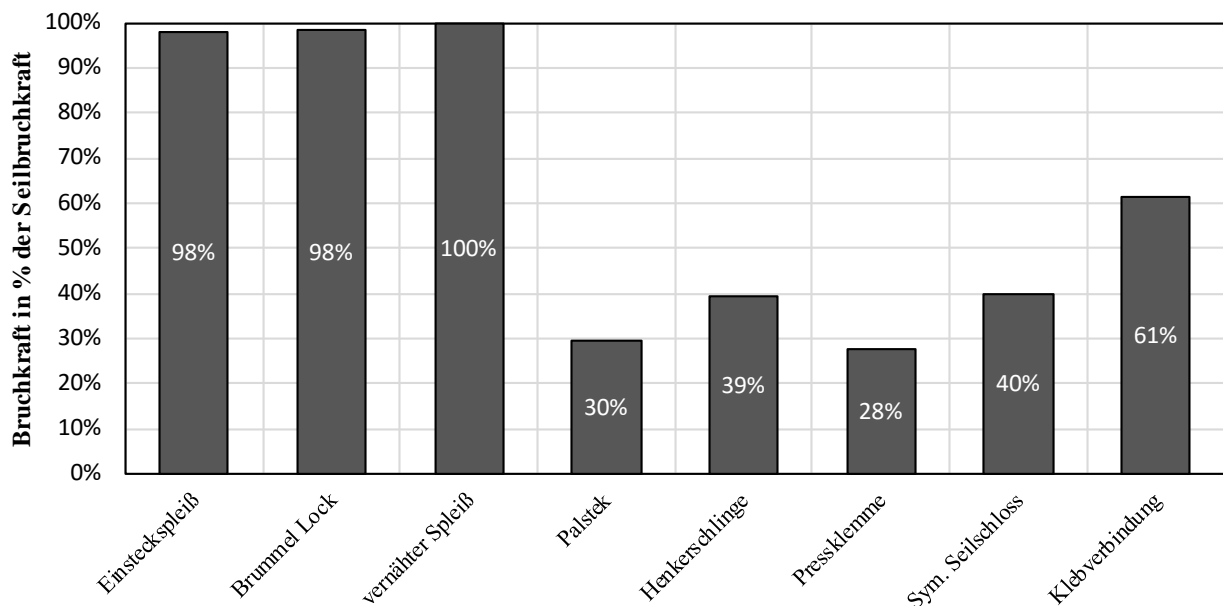


Abbildung 2: Ermittelte Bruchkräfte der untersuchten Endverbindungen im statischen Zugversuch in % der Seilbruchkraft

Der statische Festigkeitsnachweis zeigt das Potenzial bzw. die Eignung der untersuchten Endverbindungen einzelne Belastungsspitzen aufzunehmen. Die untersuchten Spleißvarianten übertreffen wie in DIN 83319 [DIN 83319] gefordert eine Bruchkraft von mehr als 90 % der Seilbruchkraft. Der Spleiß im Allgemeinen ermöglicht folglich für einzelne Belastungsspitzen die Bruchkraft des Seiles fast vollständig auszunutzen und bietet dementsprechend das größte Potenzial einzelne, große Lastspitzen aufzunehmen. Bei allen Varianten konnte ein Versagen durch Litzenbruch auf der freien Seillänge festgestellt werden.

Mit einer Bruchkraft von 61% der Seilbruchkraft folgt die geklebte Endverbindung. Trotz der ungünstigen geometrischen Bedingungen, die bei der Klebung einer dreidimensionalen Struktur auf eine Ebene entstehen, können einzelne Belastungsspitzen aufgenommen werden, die dem dreifachen Wert der in der Prüfvorschrift für Zugschwellversuche festgelegten Oberkraft entsprechen. Das Versagen erfolgte durch Abschälen der Fasern sowie Litzenbrüche im Bereich der Klebeverbindungen.

Für die untersuchten Knoten und mechanischen Endverbindungen wurden mit Bruchkräften zwischen 28 % und 40 % der Seilbruchkraft vergleichsweise geringe Festigkeiten ermittelt. Diese Endverbindungen bieten kaum Potenzial für einzelne Belastungsspitzen, was bei der Auswahl und Dimensionierung zu berücksichtigen ist. Sowohl beim Palstek als auch bei der Henkerschlinge konnte ein Versagen durch Litzenbruch im Knoten beobachtet werden. Das Versagen der Pressklemme resultierte durch Überschreiten der Klemmkraft. Der lasttragende Strang wurde in der Folge aus der Pressklemme herausgezogen. Äußere Beschädigungen der Litzen konnten visuell nicht festgestellt werden. Bei den Versuchen mit symmetrischem Seilschloss erfolgte das Versagen am Radius des Keils. In Folge der Ovalisierung des Seils gleitet dieses aus der in den Keil eingebrachten Führungsrille. Dies führt zu örtlichen Spannungsspitzen und in der Folge zum Versagen des Seils. Bei der Anwendung von Seilschlössern besteht folglich ein ungenutztes Potenzial, das durch eine Optimierung der Keilgeometrie speziell für die Anwendung mit hochfesten Faserseilen erschlossen werden kann.

4.2 VERSUCHSERGEBNISSE DYNAMISCHER ZUGVERSUCH

Die Durchführung der Zugschwellversuche erfolgte gemäß der zuvor beschriebenen Prüfvorschrift. Dazu stand ein servohydraulischer Pulsator des Typs 8501 des Herstellers Instron mit einer maximalen dynamischen Oberlast $F_O = 100$ kN zur Verfügung. Tabelle 3 zeigt die verwendeten Parameter des Zugschwellversuchs.

Tabelle 3: Prüfparameter der durchgeführten Zugschwellversuche

Schwingungsparameter	in N	in % der Seilbruchkraft
Oberkraft F_O	6200	20,0
Mittellkraft F_M	3350	10,8
Unterkraft F_U	500	1,6
Amplitude F_A	2850	9,2

Während des Zugschwellversuchs wird auf die unbelasteten, nicht vorgestreckten Prüfseile kraftgeregelt ein sinusförmiges Belastungskollektiv aufgebracht. Beendet wurde der Versuch, wenn die Versuchskraft in Folge von Schädigung der Endverbindung bzw. des Seiles nicht mehr aufgebracht werden konnte oder die Abbruchschwingspielzahl von $N = 3 \times 10^6$ 0 Schwingspielen erreicht wurde. Die Prüffrequenz betrug für alle Versuche 5 Hz. Je Endverbindung wurden 3 Versuche durchgeführt.

Tabelle 4: Ermittelte Schwingenspielzahlen im Zugschwellversuch

Endverbindung	Schwingenspielzahl N	Standardabweichung s	Varianzkoeffizient in %
Augspleiß	1.928	84	4
Brummel Lock	3×10^6	0	0
Vernähter Spleiß	3×10^6	0	0
Henkerschlinge	117.617	4.750	4
Pressklemme	944	85	9
Klebeverbindung	578.921	45.467	8

Die Endverbindungen Brummel Lock und vernähter Spleiß erreichten in allen Versuchen das Abbruchkriterium von $N = 3 \times 10^6$ Schwingspielen und haben damit das Prüfprogramm erfolgreich absolviert. Es konnten visuell keine Beschädigungen der Litzen festgestellt werden, sodass diese Endverbindungen gemäß der Prüfvorschrift als dauerhaft bezeichnet werden können. Einzig im Scheitelpunkt der Schlaufe wurden infolge des Belastungskollektivs aus Querkraft und Abrasion einzelne Fasern an der Seiloberfläche durchtrennt. Im Anschluss an die Zugschwellversuche

wurden zudem die Restbruchkräfte der Verbindungen ermittelt.

Die Klebeverbindung erreichte im Mittel eine Schwingspielzahl von $N = 578.921$. Die hier ermittelte Zeitfestigkeit unter Berücksichtigung des anspruchsvollen Prüfprogramms zeigt, dass Klebeverbindungen ein enormes Potenzial aufweisen. Es ist davon auszugehen, dass für vergleichbare Anwendungen mit geringerer Oberkraft eine Dauerfestigkeit erzielt werden kann. Während der Versuche konnte ein verzögertes Versagen festgestellt werden. Die besenartig aufgefächert verklebten Fasern des Seiles schälen in Folge der exzentrischen Krafteinleitung im Verlauf des Versuches zunehmend ab. Mit dem Abschälen der Fasern verringert sich die Klebfläche. In der Folge steigt die Scherbeanspruchung in der Klebeverbindung an. Dies führt dazu, dass Faserpakete litzenweise komplett abgeschält werden. Die Anzahl der lasttragenden Fasern sinkt bis schließlich das Versagen durch Faserbruch eintritt. Die Abschälvorgänge konnten sowohl zwischen Klebstoff und Stahlplatte, als auch zwischen Klebstoff und Fasern beobachtet werden. Optimierungspotenzial besteht folglich in der Reduktion der Exzentrizität der Krafteinleitung.



Abbildung 3: Versagensabbildung einer Klebeverbindung

Die Henkerschlinge erreichte im Mittel eine Schwingspielzahl von $N = 117.617$. Die Verbindung zieht sich unter Zugbeanspruchung zusammen, sodass eine Selbsthemmung entsteht. Das Versagen im Schwingspielversuch tritt in Form von Litzenbrüchen im Knoten auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Seilfasern im Knoten stark ungleichmäßig belastet werden. Die Fasern erfahren eine Überlagerung von Streckung, Quetschung, Reibung sowie eine Belastung durch sehr kleine Biegeradien. Dies führt zu einer Verringerung der Tragfähigkeit und in der Folge zum Litzenbruch.



Abbildung 4: Versagensabbildung des Seiles einer nach der Prüfung gelösten Henkerschlinge

Augspleiß und Pressklemme erreichten vergleichsweise geringe mittlere Schwingspielzahlen von $N = 1.928$ bzw. $N = 944$. Beim Augspieß besteht die Problematik durch die geringe Unterkraft. Eine wiederholte Ruckbelastung aus dem unbelasteten Zustand zieht die Litzen des toten Seilstrangs schrittweise aus der Spleißverbindung. Für die Pressklemme besteht die Problematik dagegen in der zu großen Oberkraft, welche ebenso zum schrittweisen Durchrutschen führt. In beiden Fällen übersteigt das während der Zugschwellversuche aufgebrachte Belastungskollektiv die dynamische Festigkeit der Endverbindung. Daher wurden zusätzliche Versuchsvarianten (vgl. Tabelle 5) für diese beiden Endverbindungen durchgeführt. Die Pressklemme wurde mit einem sinusförmigen Belastungskollektiv mit einer reduzierten Oberkraft $F_O = 4.650$ N beaufschlagt und erreichte für diese Versuchsparameter die Abbruchschwingspielzahl von $N = 3 \times 10^6$. Für den Augspieß wurde ebenso das Belastungskollektiv angepasst. Eine Erhöhung der Mittelkraft bei gleichzeitiger Reduktion der Amplitude, sodass keine Entlastung während des zeitlichen Versuchsverlaufs eintritt, resultiert im Erreichen der Abbruchschwingspielzahl von $N = 3 \times 10^6$. Für beide Endverbindungen konnte für die geänderten Versuchsparameter keine visuelle Beschädigung an den Fasern festgestellt werden. An den Pressklemmen konnte vereinzelt ein Gewaltbruch im Austrittsbereich der Seilschlinge festgestellt werden (vgl. Abbildung 5). Anhand der Versuchsergebnisse konnten zunächst keine Auswirkungen der Schädigung der Pressklemme festgestellt werden.

Tabelle 5: Ermittelte Schwingspielzahlen im Zugschwellversuch mit geänderten Parametern

Endverbindung	Schwingspielzahl N	Ober- und Unterkraft F_O und F_U in N	Ober- und Unterkraft F_O und F_U in % der Seilbruchkraft
Augspleiß	3×10^6	4.650 – 9.300	15 - 30
Pressklemme	3×10^6	500 – 4.650	0 – 15



Abbildung 5: Gewaltbruch an einer Presshülse eines Dauerläufers in Folge des Zugschwellversuchs

Tabelle 6 zeigt die erreichten Restbruchkräfte der Dauerläufer. Brummel Lock und vernähter Spleiß, die nach der entwickelten Prüfvorschrift getestet wurden erzielen nach den Zugschwellversuchen noch ca. 80 % ihrer Ausgangsfestigkeit. Das heißt, dass auch nach 3×10^6 Lastwechseln noch einzelne Spitzenlasten von bis zu 80% der Seilbruchkraft ertragen werden können. Die erreichte Restbruchkraft lässt darauf schließen, dass die untersuchten Endverbindungen für die durch das Versuchsprogramm abgedeckten Anwendungsbereiche als dauerhaft beschrieben werden können.

Augspleiß und Pressklemme, die die Abbruchschwingspielzahl nur unter angepassten, d.h. erleichterten Versuchsbedingungen erreichten, weisen ebenfalls eine Restbruchkraft von über 80% ihrer Ausgangsfestigkeiten. Auch hier lässt die erreichte Restbruchkraft darauf schließen, dass die untersuchten Endverbindungen für die durch das Versuchsprogramm abgedeckten Anwendungsbereiche als dauerhaft beschrieben werden können.

Tabelle 6: Übersicht der erreichten Restbruchkräfte der Dauerläufer

Endverbindung	Restbruchkraft in N	Restbruchkraft in % der Ausgangsfestigkeit
Augspleiß	26,526	85,8
Bummel Lock	25.016	80,7
Vernähter Spleiß	25.884	82,2
Pressklemme	7.284	83,4

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit den durchgeführten Untersuchungen ist es gelungen bekannte Endverbindungen für hochfeste Faserseile hinsichtlich ihrer Zeitfestigkeit unter dynamischer Zugschwellbelastung vergleichend zu bewerten.

Dazu gelang es zunächst, eine vergleichbare, speziell für die Anwendung von hochfesten Faserseilen ausgelegte Prüfvorschrift zu entwickeln. Die Untersuchungen zeigen, dass besonders die Spleißvarianten Brummel Lock und vernähter Spleiß für ein breites Anwendungsgebiet als dauerhaft angesehen werden können.

Für eine erstmals getestete Klebverbindung konnte ein gutes Potenzial nachgewiesen werden. Weitere Entwicklungen mit optimierten Geometrieverhältnissen versprechen eine weitere Steigerung der ermittelten Zeitfestigkeit. Hierzu wird derzeit ein spezieller Klebdorn an der Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente an TU Chemnitz entwickelt.

Weitere Experimente sind erforderlich, um Einflussvariablen wie Seilmaterial, Seilkonstruktion, Mittelspannung und Amplitude zu untersuchen, sodass eine Auswertung der Versuchsergebnisse mittels Regressionsmodellen zur Ermittlung von Berechnungsmodellen herangezogen werden kann. Die Zielstellung ist dabei, eine sichere und zugleich wirtschaftliche Auslegung zu ermöglichen.

LITERATUR

- [ISO 2307] DIN EN ISO 2307:2011-01, Faserseile - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, Berlin: Beuth
- [DIN 83319] DIN 83319:2013-04, Faserseile - Spleiße - Begriffe, sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung, Berlin: Beuth
- [DIN 13411-2] DIN EN 13411-2:2009-02, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 2: Spleißen von Seilschlaufen für Anschlagseile, Berlin: Beuth
- [DIN 13411-3] DIN EN 13411-3:2011-04, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 3: Pressklemmen und Verpressen, Berlin: Beuth
- [DIN 13411-4] DIN EN 13411-4:2011-06, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 4: Vergießen mit Metall und Kunstharz, Berlin: Beuth
- [DIN 13411-5] DIN EN 13411-5:2009-02, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 5: Drahtseilklemmen mit U-förmigem Klemmbügel, Berlin: Beuth

- [DIN 13411-6] DIN EN 13411-6:2009-04, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 6: Asymmetrische Seilschlösser, Berlin: Beuth
- [DIN 13411-7] DIN EN 13411-7:2009-04, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 7: Symmetrische Seilschlösser, Berlin: Beuth
- [DIN 13411-8] DIN EN 13411-8:2011-12, Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht - Sicherheit - Teil 8: Stahlfittinge und Verpressungen, Berlin: Beuth

Dipl.-Ing. David Holschemacher, Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente, Professur Fördertechnik, Technische Universität Chemnitz.
David Holschemacher wurde 1986 in Guben, Deutschland geboren. Von 2005 bis 2013 studierte er Maschinenbau/Produktionstechnik an der TU Chemnitz.

Adresse: Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente, Professur Fördertechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
Tel.: +49 371 531-34248, Fax: +49 371 531-834248,
E-Mail: david.holschemacher@tu-chemnitz.de