

Untersuchung der Quersteifigkeit geflochtener hochfester Faserseile

Karl Stange¹, Christoph Müller^{1*}, Markus Golder¹

¹ Fakultät für Maschinenbau, Professur Förder- und Materialflusstechnik, TU Chemnitz, 09126 Chemnitz, Deutschland

* Correspondence: christoph.mueller@mb.tu-chemnitz.de; Tel.: +49-371-531 37989

Received 30 June 2022; Accepted 30 July 2022; Available online 15 December 2022

© 2022 by K. Stange et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The INNOTRAC logo and third-party content are excluded from this.

KURZFASSUNG Zunehmend ersetzen Seile aus hochfesten synthetischen Fasern in ausgewählten Bereichen der Fördertechnik Drahtseile. Die axialen Eigenschaften der Faserseile sind wohlbekannt. Jedoch sind deren Eigenschaften in Querrichtung noch nachrangig Gegenstand der Untersuchungen. Dementsprechend wurden geflochtene Faserseile hinsichtlich ihrer Quersteifigkeit in Abhängigkeit von deren axialer Vorspannung bis zu einem Sicherheitsfaktor von 7 untersucht.

SCHLAGWORTE Faserseil, UHMWPE, Quersteifigkeit, Wicklung, Kontakt

1. Einführung

Faserseile erobern zunehmend, wenn auch noch nahezu ausschließlich in speziellen Anwendungsfällen, Marktanteile in Anwendungen der Fördertechnik. Häufig eingesetzt sind Faserseile aus ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE). In fördertechnischen Anlagen und Geräten dienen sie als Zug- oder Tragmittel zum Heben und Fördern. Vor allem werden sie dort eingesetzt, wo Stahldrahtseile durch ihr Eigengewicht an technische Grenzen stoßen oder das Handling der Seile ein entscheidendes Faktum ist. Die Bruchkräfte solcher Seile aus hochfesten Polymerfasern sind vergleichbar mit Stahldrahtseilen gleichen Durchmessers [2]. Einige Vorzüge solcher Faserseile sind:

- Die hohe absolute und eigengewichtsbezogene Festigkeit,
- geringe Dichte,
- einfache Handhabung,
- gute Dauerbiegeeigenschaften sowie
- Medienbeständigkeit [1], [3].

In der Praxis werden diese hochfesten Faserseile z.B. im Forstsektor und in der Landwirtschaft in einer Vielzahl von Seilwinden genutzt. Aber auch im Kranbereich, in Personenaufzügen oder als Stahlseil-hybride in der Schachtförderung sind

Entwicklungen bekannt. Größter Nachteil der Faserseile in diesen Anwendungen ist jedoch das noch nicht abschließend gelöste Problem der zerstörungsfreien Verschleißbewertung im Betrieb.

2. Grundlagen

2.1. Normung

Die Normung zu Faserseilen mit Anwendung in der Fördertechnik ist noch im Aufbau begriffen. So werden in DIN EN ISO 1968 [4] grundlegende Begriffe für Faserseile und Tauwerke aufgelistet. In DIN EN ISO 2307 [5] werden Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften Feinheit, Schlag-/Flechtlänge, Dehnung und der Bruchkraft für unterschiedliche Seilarten festgelegt. DIN EN ISO 9554 [6] legt allgemeine Eigenschaften von Faserseilen und deren Werkstoffen fest. Weiterhin sind Angaben über die Verwendung, Überprüfung und Ablegekriterien von Faserseilen enthalten. Für Spleiße an Faserseilen sowie deren sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen ist DIN 83319 [7] als Nachschlagewerk zu verwenden. Nach [2] sind Spleiße die einzige genormte Endverbindung spezifisch für Faserseile. DIN EN 1492-4 [8] legt die Anforderungen an die Sicherheit bzw. die Verfahren zur Bewertung sowie Prüfung an verschiedenen Faserseilen fest. ISO 16839 [9] hingegen legt eine einheitliche Prüfmethode fest, wie die Quersteifigkeit von Stahldrahtseilen bestimmt werden soll. Der darin enthaltene Prüfaufbau bildet die Verformung von Stahldrahtseilen in der Mehrlagenwicklung nach (vgl. Abbildung 1).

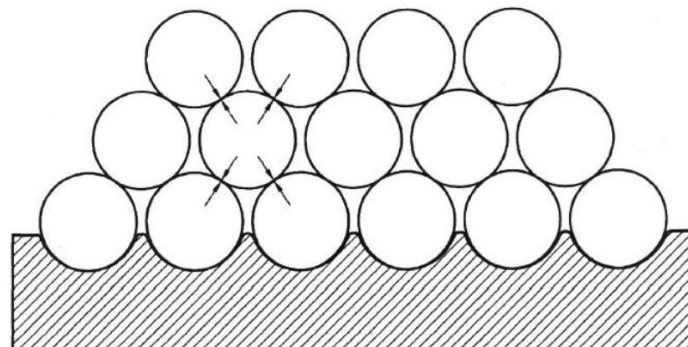


Abbildung 1 Druckkontaktstellen im Seilquerschnitt einer Mehrlagenwicklung nach [9].

Bei der Mehrlagenwicklung entsteht ein Kontakt zwischen dem betrachteten Seil und den benachbarten Wicklungen mit insgesamt vier Kontaktstellen. Die im entsprechend vorgeschlagenen Prüfaufbau verwendeten Prüfbacken sind mit einer V-förmigen Nut ausgestattet. Diese V-förmige Nut soll die Linienkontaktstellen nachbilden. Im Prüfaufbau werden zwei dieser Prüfbacken gegenüberliegend am Seil angeordnet. Durch das Aufbringen der Querkraft F_Q kann die Aufweitung des Seils, beidseitig in x-Richtung gemessen werden. Die Messeinrichtung in y-Richtung zeigt den Weg der Verringerung des Seildurchmessers (vgl. Abbildung 2).

Mit dieser Prüfmethode wird der Widerstand gegen die seitliche Verformung von Stahldrahtseilen bestimmt. Als Ergebnis wird der Verformungsgrad des Seils in Prozent berechnet. Die in der Norm festgelegte Bestimmung zur Quersteifigkeit von Stahldrahtseilen erfolgt jedoch ohne die Einbringung einer axialen Kraft ins Seil. In der Normung sind bisher keine Aussagen über die Bestimmung der Quersteifigkeit von Faserseilen zu finden.

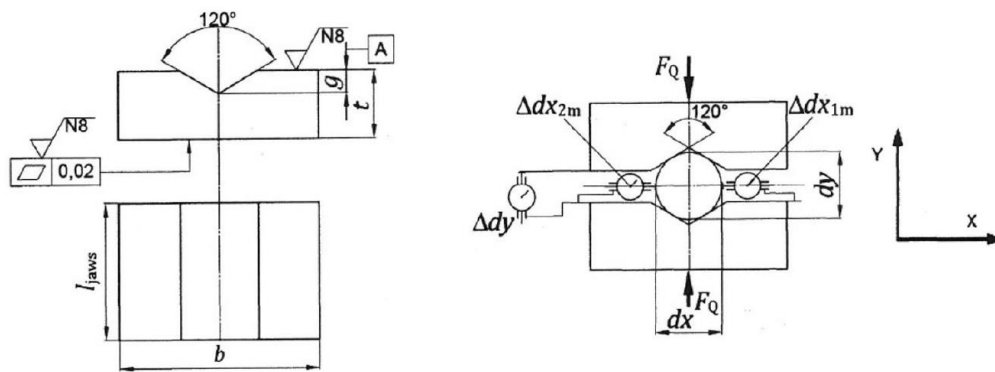


Abbildung 2: links: Prüfbacke, rechts: Prüfaufbau, nach Norm ISO 16839 [9].

2.2. Bekannte Prüftechnik

Im Jahr 1998 wurde am Institut für Maschinenwesen an der TU Clausthal ein Prüfstand zur Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens von Drahtseilen in Betrieb genommen (vgl. Abbildung 3) [10]. Mit diesem Prüfstand ist es möglich, horizontal eingelegte Drahtseile gleichzeitig mit einer Zug- und Querkraft zu belasten. Durch verschiedene Anordnungsmöglichkeiten, wie parallel oder pyramidenförmig eingelegte Seile, wird eine bewickelte Seiltrommel simuliert. Es können Draht-, Faser- und Hybridseile [11] unterschiedlicher Art mit einem Durchmesser von 7 mm bis 32 mm geprüft werden. Die Bestimmung des Querelastizitätsmoduls wird damit realisiert. Für die Versuche werden Prüfbacken mit oder ohne Rillengeometrie eingesetzt.

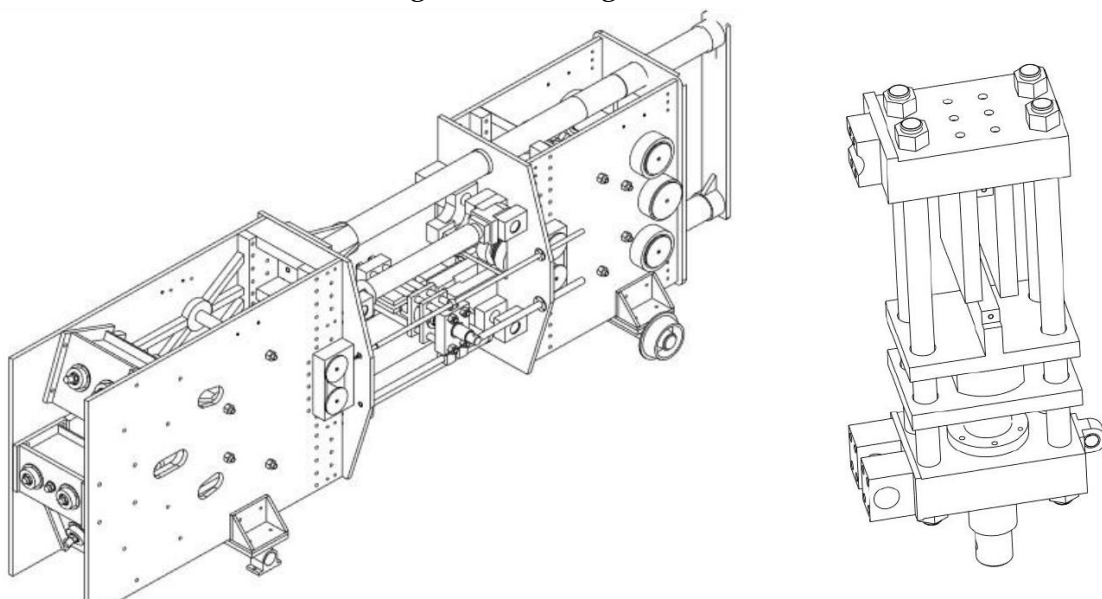


Abbildung 3: links: Gesamtaufbau Prüfstand, rechts: Querkraftbaugruppe, [10].

In [12] wurde im Jahr 2015 ein Konzept für einen Versuchsstand zur Ermittlung des Querelastizitätsmoduls von Faserseilen entworfen. Der Schwerpunkt lag darauf, Längs- und Querkraften auf einer Seilscheibe in das Faserseil einzuprägen, um den Anwendungsfall der Treibscheibe nachbilden zu können. Dazu wird das Versuchsseil auf zwei gegenüberliegend angeordneten Seilscheiben aufgelegt. Diese sind über Flansche mit einer Zugprüfmaschine verbunden. Durch die Vergrößerung des Achsabstandes der Seilscheiben wird das Versuchsseil gegen diese gezogen. Anhand der Zugkraft und der Berührungsfläche zwischen Seil und Seilscheibe kann die Querspannung geschätzt werden. Dabei wird vereinfachend eine gleichverteilte Spannung über der Berührungsfläche angenommen. Die in das Seil eingebrachte Zugkraft wird durch die Zugprüfmaschine ermittelt. Ein in den Versuchsstand flexibel integrierter Triangulationslaser erfasst gleichzeitig die Querdehnung.

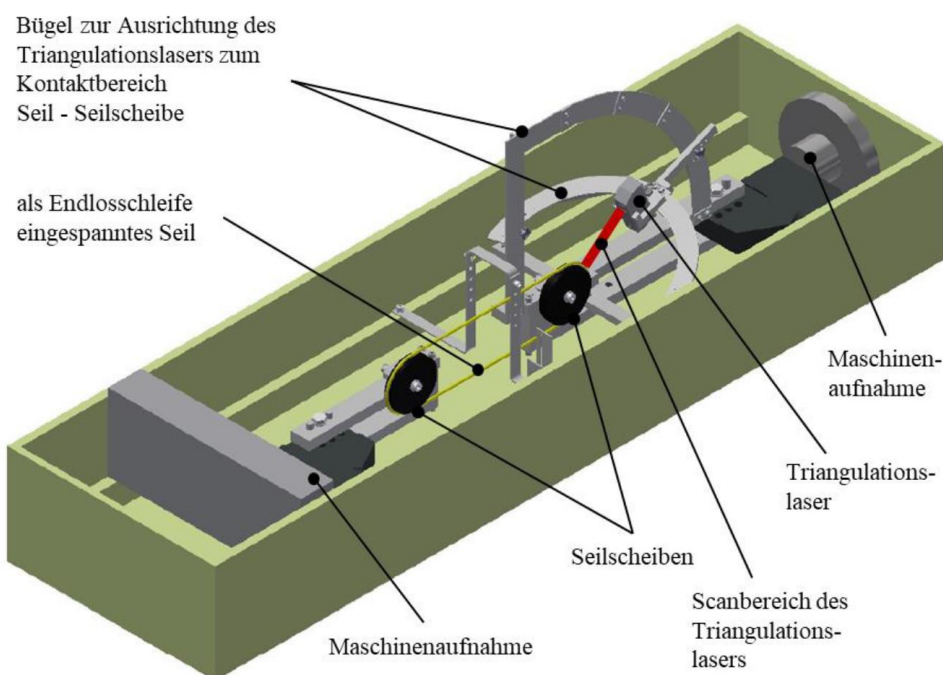


Abbildung 4: Konzept eines Versuchsaufbaus als CAD-Modell zur Bestimmung der Querelastizitätsmoduls [12].

2.3. Publierte Untersuchungen

An der TU Clausthal wurden Versuche zum Querelastizitätsmodul von Faserseilen durchgeführt. Dabei wurden Rundgeflechte ohne Mantel mit 12 Litzen aus den Materialien Dyneema® SK75, Technora® T221 und Vectran® T150 untersucht. Die Faserseile wurden mit Nenndurchmessern von 6 mm und 12 mm untersucht. Durch das Festlegen eines geeigneten Längskraftverhältnisses und einem Querkraftverhältnis von 0,1 wurden Querelastizitätsmoduln ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass der Querelastizitätsmodul der untersuchten Fasereile viel geringer als das von Stahlseilen ist. Es wird weiterhin aufgezeigt, dass diese Faserseile durch den geringeren

Querelastizitätsmodul eine im Vergleich zum Stahlseil verminderte Spulbarkeit auf Windentrommeln aufweisen. [13]

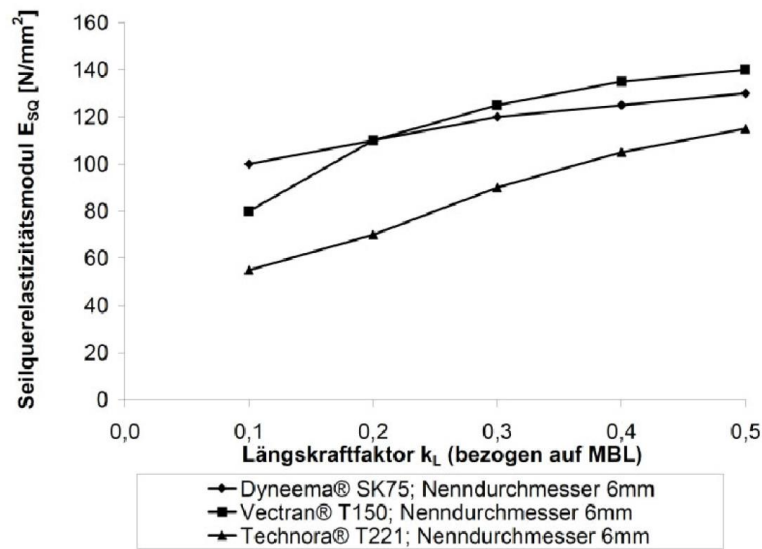


Abbildung 5: Ergebnisse zur Untersuchung des Querelastizitätsmoduls von Faserseilen, TU Clausthal [13].

In [14] werden unter anderem Querdruckversuche an Faserseilen durchgeführt. Dabei wird eine mehrlagig bewickelte Seiltrommel simuliert. Die Versuche finden am horizontal eingespannten Seil statt, dies stellt dabei die wesentliche Vereinfachung bei der Nachbildung der Mehrlagenwicklung auf einer Seiltrommel dar. Die Untersuchungen geben Aufschluss über die reversible und irreversible Deformation des Seilquerschnitts für einzelne Lastkombinationen. Dabei wurde nach dem Querkrafteintrag eine deutliche Veränderung des Seildurchmessers im Vergleich zum ebenfalls geprüften Stahlseil festgestellt. Weiterhin wurde festgestellt, dass das gewählte Querspannungsverhältnis einen Einfluss auf das Querelastizitätsmodul hat. Für verschiedene Betriebspunkte kann mit diesen Erkenntnissen die irreversible Deformation durch eine Gleichung rechnerisch vorherbestimmt werden. Somit kann der hohe Aufwand der praxisnahen Wickelversuche minimiert werden. [14]

3. Methoden

3.1. Entwicklung eines geeigneten Prüfaufbaus

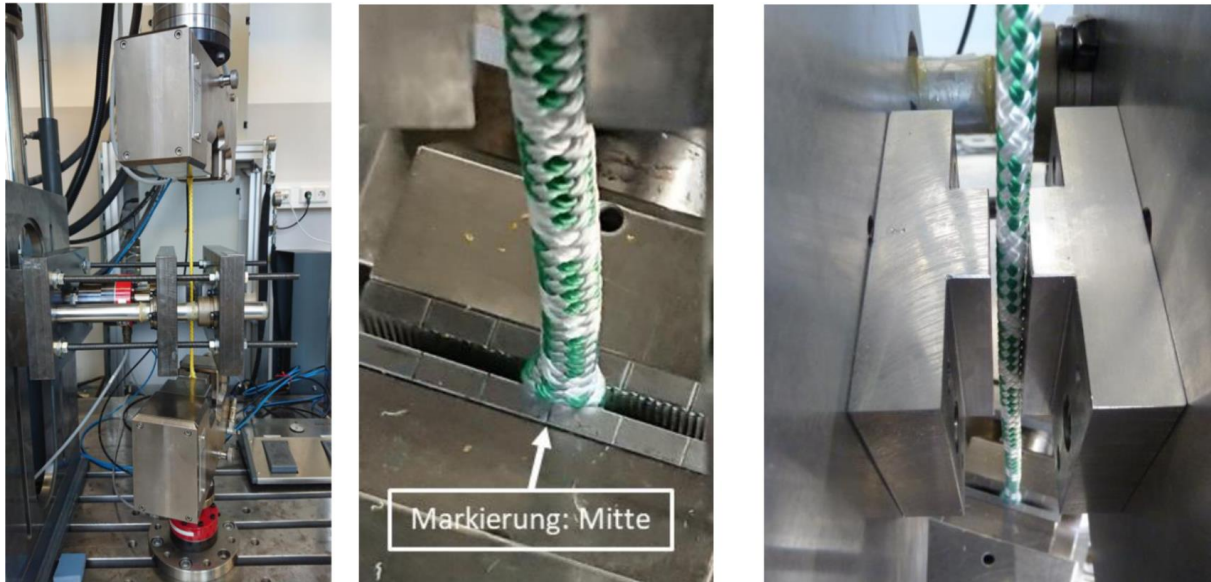


Abbildung 6: Prüfaufbau, geklemmtes Seil und Prüplatten für Quersteifigkeitsmessung

Um Faserseile in einer vorhandenen mehrachsigen Universalprüfmaschine prüfen zu können, musste ein Prüfmodul entwickelt werden. Als Grundlage für das Querkraftprüfmodul (vgl. Abbildung 6) wurde ein Säulenführungsgestell modifiziert. Bei diesem Säulengestell (vgl. Abbildung 7) sind die beiden Platten C und D auf den Säulen F axial frei verschiebbar. Die Platte B ist mit den Säulen F fest verpresst. In den beiden Platten C und D sind jeweils zwei Führungsbuchsen H und G mit Bund verbaut. Diese bestehen aus dem Werkstoff Sintereisen und wurden zusätzlich zur Senkung des Reibverschleißes karbonitriert. Das Säulengestell wurde waagrecht am Aufnahmewinkel der Prüfmaschine befestigt. Weiterhin wurde eine Durchgangsbohrung zur Durchführung des Querdruckzylinders gefertigt. Vor dem endgültigen Festziehen der Schrauben ist die Platte B mit einem Prüfgerät achsparallel zur Prüfzylinder-Wirklinie auszurichten. Es hat sich gezeigt, dass ohne eine präzise Ausrichtung das Säulengestell im späteren Verlauf zum Klemmen neigt. In vier Feingewindebohrungen werden die Gewindespindeln E verschraubt. Sobald die Platte B mit den verpressten Säulen F am Aufnahmewinkel verschraubt ist, kann die Kraftmessdose am horizontalen Zylinder befestigt und die mittlere Platte C auf die Säulen geschoben werden. An der Platte C werden vor der Prüfung die austauschbaren Prüfplatten befestigt. Danach kann die Platte D auf die Säulen geschoben und befestigt werden. Während des Betriebes hat sich der Einsatz von zusätzlichem Schmiermittel an den Gleitlagern der Platte C positiv auf das Laufverhalten ausgewirkt.

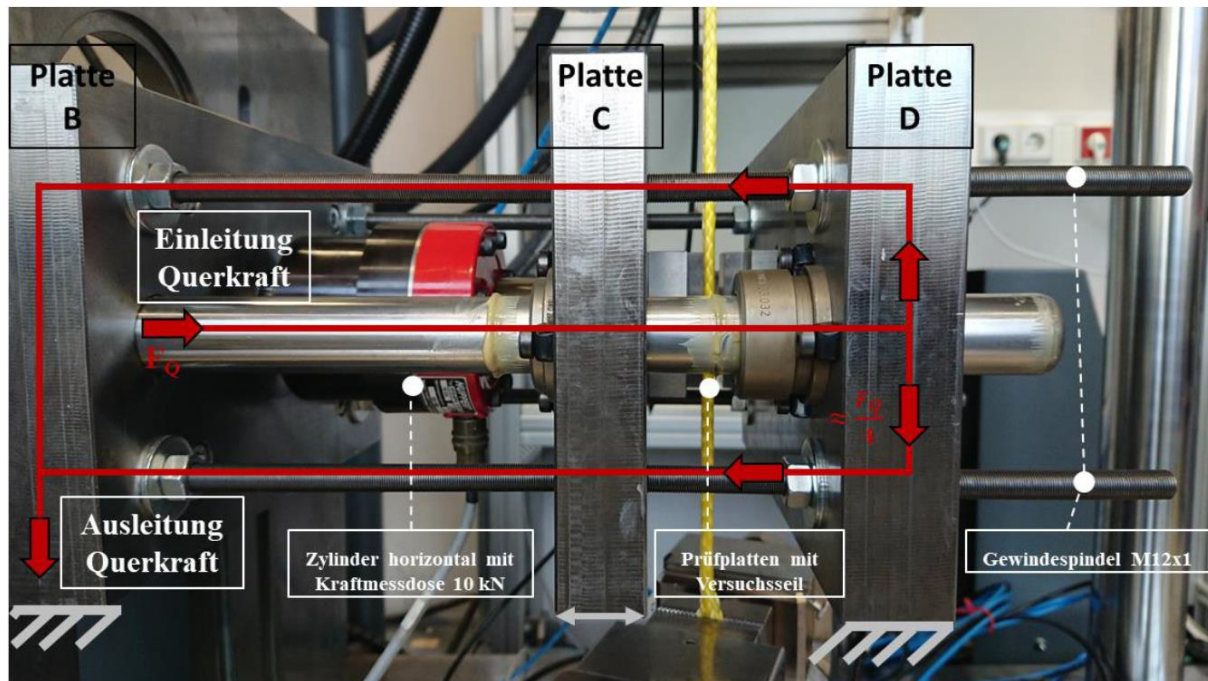


Abbildung 7: Prüfaufbau Seitenansicht

Der Ablauf der Prüfung gliedert sich in fünf Phasen und ist in Abbildung 8 anschaulich dargestellt.

- Phase 1: Das lastfrei eingespannte Versuchsseil wird durch den vertikalen Zylinder der Universalprüfmaschine mit der jeweiligen für das Versuchsseil maximalen Zugkraft belastet. Die dafür vorgegebene Zeitdauer beträgt 15 s. Der horizontale Zylinder befindet sich lastfrei in der Startposition.
- Phase 2: Nachdem die eingestellte Zugkraft erreicht wurde, wird das Versuchsseil innerhalb von 10 s auf eine Vorkraft von 500 N entlastet.
- Phase 3: Im Anschluss wird das Versuchsseil in einer Zeitspanne von 20 s mit der eingestellten Prüf-Zugkraft belastet.
- Phase 4: Sobald die eingestellte Prüf-Zugkraft erreicht wurde, wird der horizontale Zylinder das Versuchsseil mit der jeweils eingestellten Querkraft belasten. Die für diese Phase voreingestellte Zeitspanne beträgt 30 s. Während dieser Versuchszeit soll der vertikale Zylinder die eingestellte Zugkraft nachführen.
- Phase 5: Beide Zylinder fahren in ihre Ausgangsposition zurück sobald der horizontale Zylinder die eingestellte Querkraft erreicht hat.

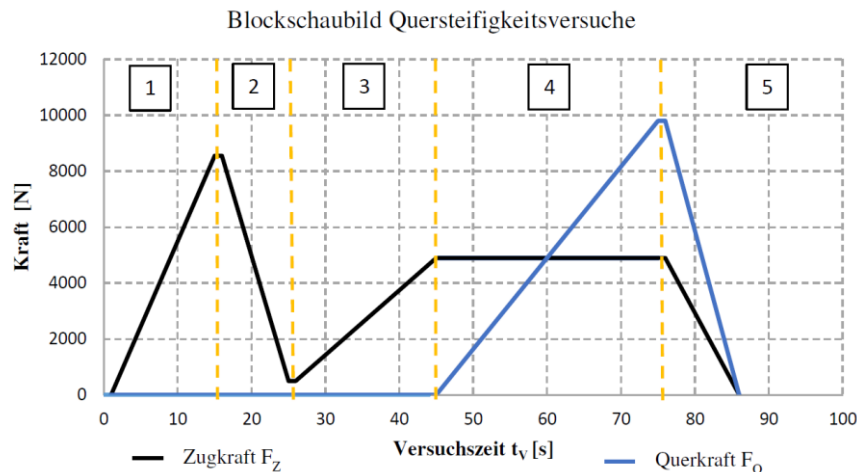


Abbildung 8: Kraftverlauf des vertikalen und horizontalen Zylinders der Universalprüfmaschine für den Quersteifigkeitsversuch, Darstellung beispielhaft für das Versuchsseil A mit einer Vorreck-Zugkraft von 8.550 N und einer Prüf-Zugkraft von 4.900 N.

3.2. Realisierung verschiedener Kontaktzustände

Für die Nachbildung der Anwendungsfälle einer Ein- oder Mehrlagenwicklung wurden verschiedene Prüfplatten konstruiert und gefertigt. Durch die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten dieser Prüfplatten kann der nachgebildete Kontaktbereich zwischen Seil und Seiltrommel oder Seil und Seil erreicht werden (vgl. Abbildung 9). Die Prüfplatten wurden in Anlehnung an ISO 16839 hergestellt (vgl. Abbildung 10). Für den Versuchsaufbau wurde eine Prüfflächenlänge von 72 mm und eine Breite 30 mm gewählt. Die Prüfflächen wurden mit Schleifpapier und Polierpaste bearbeitet. Mit Hilfe von Oberflächenvergleichsplatten für den Tast- und Sichtvergleich konnte annähernd eine Rauheit von $Ra = 3,2 \mu m$ ermittelt werden. Das Polieren der Prüfflächen soll die Reibung zum Versuchsseil auf ein Minimum reduzieren. Die Prüfplatte bei der die Prüffläche eine Ebene ist, trägt die eingeschlagene Zahl 2. Die Prüfplatte mit der eingeschlagenen Zahl 1 besitzt als Prüffläche eine V-förmige Kerbe mit 120° Öffnungswinkel. In Anlehnung an DIN 15061-2 [15] ist eine weitere Prüfplatte mit einem Rillenprofil als Prüffläche hergestellt worden. Das Rillenprofil besitzt nach [15] einen Rillenradius von 4,2 mm. Diese Prüfplatte trägt die eingeschlagene Zahl 3. Die Prüfplatten wurden passend zueinander paarweise gefertigt. Zum Einsatz im Versuch kamen die folgenden Prüfplattenkombinationen:

- 2 – 2 (Prüffläche: Ebene – Ebene), Anwendungsfall der Einlagenwicklung auf einer Seiltrommel mit ebener Wickelfläche ohne Rillenprofil.
- 3 – 2 (Prüffläche: Rillenprofil – Ebene), Anwendungsfall Seiltrommel mit Rillenprofil
- 2 – 1 (Prüffläche: Ebene – V-Kerbe) Mehrlagenwicklung auf ebener Seiltrommel, unterste Wicklung
- 3 – 1 (Prüffläche: Rillenprofil – V-Kerbe), Mehrlagenwicklung auf gerillter Seiltrommel, unterste Wicklung
- 1 – 1 (Prüffläche: V-Kerbe – V-Kerbe), Mehrlagenwicklung ab 2ter Lage

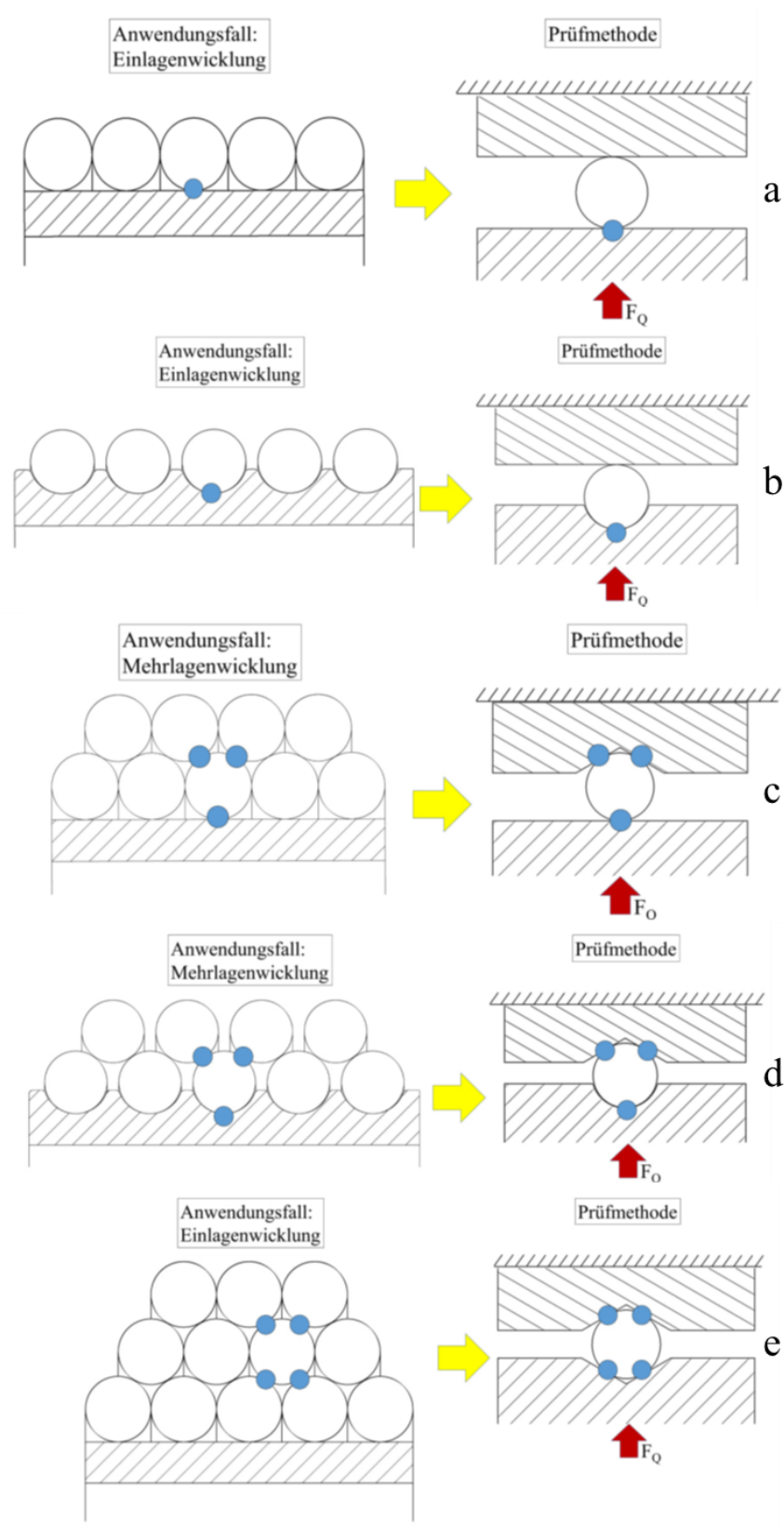


Abbildung 9: Anwendungsfälle und abstrahierte Prüfmethoden mit den jeweiligen Prüfplattenkombinationen



Abbildung 10: Prüfplatten: obere Reihe: Stirnansicht mit der jeweiligen Schlagzahl Nr., Links unten: Prüffläche – Ebene – Nr.2, mitte: Prüffläche - V-Kerbe - Nr.1, rechts: Prüffläche - Rillengeometrie - Nr.3.

3.3. Verwendete Versuchseile

Es wurden fünf geflochtene Seile in der Versuchsreihe untersucht (vgl. Tabelle 1). Die Seile A und B wurden an der TU Chemnitz hergestellt. Ziel war es, ein Hochleistungsfaserseil herzustellen, welches als Zugmittel in Windenanwendungen geeignet ist. Bei den Typen A und B handelt es sich um ein mantelloses Kernseil (Rundgeflecht) mit einem Nenndurchmesser von 8 mm. Beide Seile sind thermofixiert und besitzen 12 Litzen. Zur Herstellung wurde der Werkstoff Dyneema®SK75 verwendet. Beide Seile unterscheiden sich nur in der Beschichtung mit der das Versuchseil B nachträglich ausgerüstet wurde. Die Versuchseile C, D und E sind kommerzielle geflochtene Kernmantelseile verschiedener Macharten. Insofern Informationen zur Machart verfügbar waren, sind diese in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der verwendeten Versuchseile

	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Type E
Hersteller	TU Chemnitz	TU Chemnitz	Hersteller 1	Hersteller 2	Hersteller 2
Art	Kernseil	Kernseil	Kernmantelseil	Kernmantelseil	Kernmantelseil
Durchmesser (Seil/Kern)	8 mm / 8 mm	8 mm / 8 mm	8 mm / 6 mm	8 mm / 6 mm	8 mm / 7 mm
Flechtlänge (Kern)	48 mm	48 mm	40 mm	40 mm	41 mm
Flechtwinkel (Kern)	45°	45°	40°	40°	41°
Fasertyp (Kern/Mantel)	Dyneema® SK75	Dyneema® SK75	Dyneema® SK78/ Technora®+ Dyneema®	Dyneema®/ Polyester	Polyester / Polyester
Litzenanzahl (Kern/Mantel)	12	12	12 / 24	12 / 24	8 / 12
Bindung (Kern)	12-12/1	12/2-1	12-2/1	12-2/1	8-1/4
Gewicht / 100 m	3.454 g	3.636 g	4.000 g	4.182 g	4.909 g
Bruchkraft (Soll / Ist)	62,5 kN	59,7 kN	30 kN / 25,7 kN	18 kN / 20,5 kN	18 kN / 21,6 kN

3.4. Durchgeführte Parametervariation

Da die ausgewählten Versuchsseile unterschiedliche Bruchkräfte aufweisen, mussten einheitliche Zugkraftniveaus für die Versuchsdurchführung gefunden werden. Hierzu wurden global Zugkraftniveaus festgelegt, sodass sich ein minimal zu prüfender Sicherheitsfaktor von ~ 7 ergibt. Die resultierenden Sicherheitsfaktoren ergeben sich aus Tabelle 2.

Tabelle 2: Aus den gemittelten individuellen Zugkraftniveaus der Versuchsseile festgelegte axiale Zugkräfte und resultierende Sicherheitsfaktoren

Type	Bruchkraft	festgelegte axiale Zugkräfte					
		640 N	1.120 N	2.440 N	3.040 N	4.900 N	8.550 N
A	62.454 N	97,6	55,8	25,6	20,5	12,7	7,3
B	59.741 N	93,3	53,3	24,5	19,7	12,2	7,0
C	35.687 N	55,8	31,9	14,6	11,7	7,3	
D	20.488 N	32,0	18,3	8,4	6,7		
E	21.598 N	33,7	19,3	8,9	7,1		

Zur Parametervariation wurde jede Faktorvariation dreimal nacheinander mit dem entsprechenden Zugkraftniveau und mit der jeweiligen Prüfplattenkombination geprüft. Die Querdruckkraft wurde jeweils bis 9.800 N aufgebracht und die resultierenden Zeitreihen aufgezeichnet. Es wurde festgelegt, dass für jeden Versuch ein neues Versuchsseil verwendet wird. Der Spanndruck der Pneumatik-Probenhalter betrug 6 bar. Die Prüftemperatur wurde im Prüfraum der Universalprüfmaschine überwacht und betrug über den gesamten Zeitraum $\sim 20^\circ\text{C}$. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Parametervariationen.

Tabelle 3: In den Messreihen durchgeführte vollständige Parametervariationen

Faktorstufen	1 Zugkraft (längs)	2 Prüfplattenkombinationen
	640 N: Versuchsseile A, B, C, D; E	Nr. 1 – 1 (V-Kerbe – V-Kerbe)
	1.120 N: Versuchsseile A, B, C, D; E	Nr. 2 – 2 (Ebene – Ebene),
	2.440 N: Versuchsseile A, B, C, D; E	Nr. 2 – 1 (Ebene – V-Kerbe),
	3.040 N: Versuchsseile A, B, C, D; E	Nr. 3 – 1 (Rillengeometrie – V-Kerbe)
	4.900 N: Versuchsseile A, B, C	Nr. 3 – 2 (Rillengeometrie – Ebene),
	8.550 N: Versuchsseile A, B	

3.5. Ermittlung der Quersteifigkeitswerte

Zur Überwindung der Reibkräfte in der Führung der Prüfvorrichtung zum Anlegen der Prüfbacken an das Seil wurde ein Vorkraft von 200 N gewählt. Die berechneten Quersteifigkeiten ergeben sich jeweils aus den von diesem Vorkraftniveau ausgehenden maximalen Verformungen und Belastungen in Querrichtung. Der infolge dieser Linearisierung auftretende Fehler kann als gering und für den Vergleich der Versuchsseile als nicht schädlich eingeschätzt werden. Für die Bestimmung von Bauteilsteifigkeiten zu Berechnungszwecken erscheint aber eine detailliertere Analyse geboten. Es wurde eine Maschinenkennlinie ermittelt und die Maschinenverformung aus den Verformungswerten des Querweges herausgerechnet. Als Ergebnis wird zunächst stets eine Bauteilsteifigkeit angegeben, da eine Umrechnung in ein Steifigkeitsmodul an der nur ungenau bestimmbaren Querschnittsfläche vor allem der Kern-Mantel-Seile scheitert. Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Querkraft über den Querweg exemplarisch für das Versuchsseil A. Der Verlauf ist für alle Versuchsseile ähnlich, progressiv und streng monoton steigend.

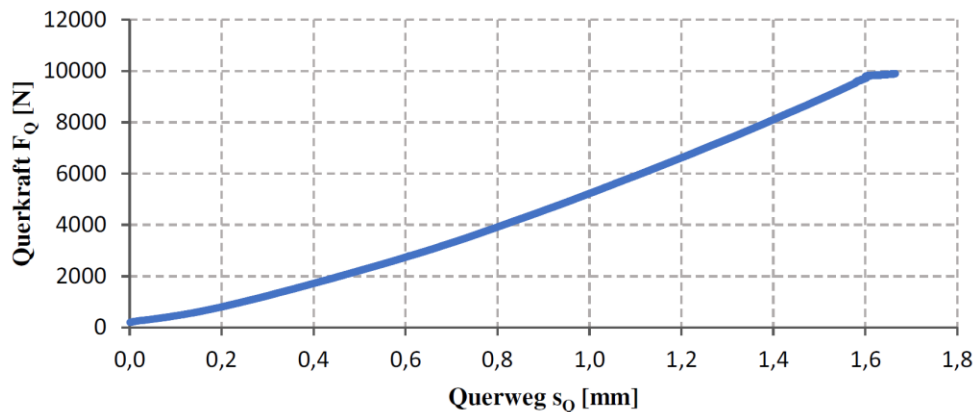


Abbildung 11: Exemplarischer Querkraft-Weg Verlauf für das Versuchsseil A

4. Ergebnisse

Aus Vorversuchen zeigte sich ein deutlicher Anstieg der errechneten Federkonstante bei wiederholter Quersteifigkeitsprüfung an identischer Stelle. Aus diesem Grund wurden die weiteren Versuche immer mit einem neuwertigen Versuchsseil durchgeführt. Es wurden jeweils drei Wiederholungen der gleichen Faktorstufe durchgeführt. Abbildungen Abbildung 12 bis Abbildung 16 zeigen die Querkraftverläufe für die Versuchsseile A – E über die verschiedenen zur Anwendung gebrachten axialen Zugkraftniveaus und Prüfplattenkombinationen.

Das Versuchsseil A zeigt bei der Prüf-Zugkraft 640 N, unter Verwendung der Prüfplattenkombination Nr. 2 – 2 (Ebene – Ebene) geringere Werte der Federkonstanten als bei der Prüf-Zugkraft 8.550 N (vgl. Abbildung 12). Die Zunahme der Quersteifigkeit beträgt dabei 54 %, bezogen auf den jeweiligen Mittelwert der Federkonstanten bei 640 N und 8.550 N. Die Prüfplattenkombination Nr. 2 – 1 (Ebene – V-Kerbe) zeigt bei allen Prüf-Zugkräften die geringsten Federkonstanten unter den fünf Prüfplattenkombinationen. Dies wird durch die rote Punkt-Punkt Regressions-Linie verdeutlicht. Die Prüfplattenkombinationen Nr. 3 – 2 (Rillenprofil – Ebene), Nr. 1 – 1 (V-Kerbe – V-Kerbe) und Nr. 3 – 1 (Ebene – V-Kerbe) zeigen ebenfalls bei der Prüfzugkraft 640 N geringere Werte der Federkonstanten als bei der Prüf-Zugkraft 8.550 N.

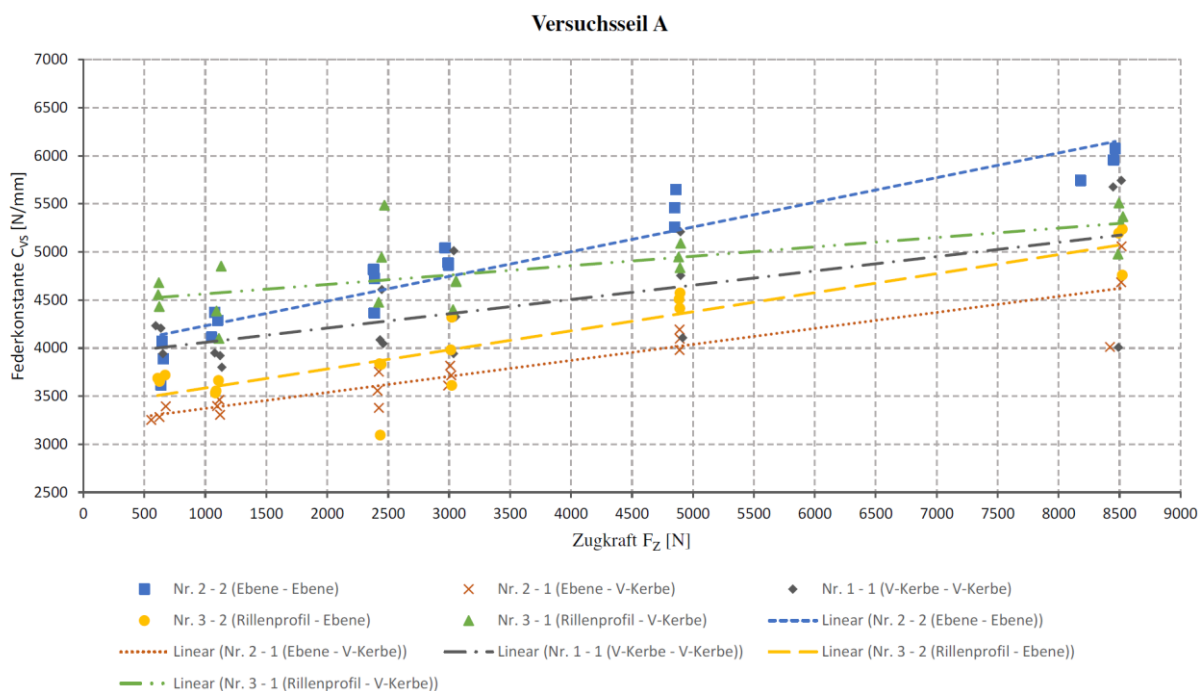


Abbildung 12: Quersteifigkeiten über axialer Zugkraft und Prüfplattenkombinationen, Versuchsseil A

Das Versuchsseil B zeigt zum Versuchsseil A ähnliche Verläufe der Quersteifigkeiten (vgl. Abbildung 13). Die Werte der Federkonstanten sind dabei leicht erhöht. Jedoch zeigt die Prüfplattenkombination Nr. 2 – 2 bei der Prüf-Zugkraft 640 N die geringsten und bei 8.550 N die höchsten Werte der Federkonstanten. Die Steigerung der Quersteifigkeit beträgt dabei 81 %. Das Versuchsseil B erreicht bei der Prüf-Zugkraft 8.550 N mit der Prüfplattenkombination Nr. 2 – 2 die höchsten Federkonstanten unter den Prüfplattenkombinationen. Weiterhin zeigt die Prüfplattenkombination Nr. 2 – 1 die geringsten Federkonstanten für dieses Versuchsseil. Die Prüfplattenkombination Nr. 1 – 1 und Nr. 3 – 2 haben einen ähnlichen Verlauf der Quersteifigkeiten. Es ist zu erkennen, dass die Federkonstanten bei der Prüf-Zugkraft 8.550 N der Prüfplattenkombinationen Nr. 3 – 1, Nr. 3 – 2, Nr. 1 – 1 und 2 – 1 im Bereich von $4.375 \text{ N/mm} \geq C_{VS} \leq 5.471 \text{ N/mm}$ dicht bei einander liegen. Die Prüf-Zugkraft 640 N entspricht rund 1 % und die Prüf-Zugkraft 8.550 N entspricht rund 14 % des Mittelwertes der Seilbruchkraft des jeweiligen Versuchsseiles A bzw. B.

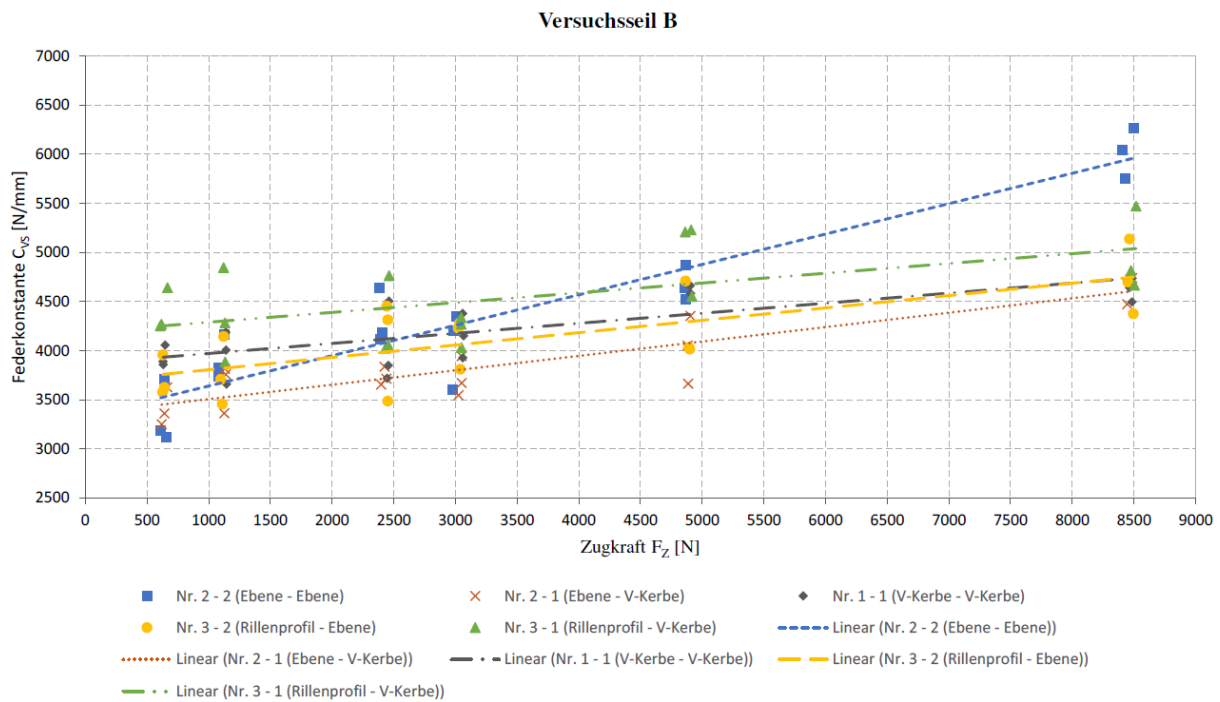


Abbildung 13: Quersteifigkeiten über axialer Zugkraft und Prüfplattenkombinationen, Versuchsseil B

Das Versuchsseil C zeigt die höchsten Federkonstanten bei der Verwendung der Prüfplattenkombination Nr. 3 – 1 (vgl. Abbildung 14). Die zweit höchsten Federkonstanten werden mit der Prüfplattenkombination Nr. 1 – 1 erreicht. Mit der Prüfplattenkombination Nr. 2 – 2 werden die geringsten Federkonstanten erreicht. Im Vergleich zum Versuchsseil A und B werden mit dem Versuchsseil C in Verbindung mit den Prüfplattenkombinationen Nr. 3 – 1 oder Nr. 1 – 1 höhere Federkonstanten ermöglicht. Im Vergleich zu den anderen Prüfplattenkombinationen zeigt Nr. 2 – 2 geringere Federkonstanten. Die Prüf-Zugkraft 640 N für das Versuchsseil C entspricht rund 2 % und die Prüf-Zugkraft 4.900 N entspricht rund 14 % des Mittelwertes der Seilbruchkraft.

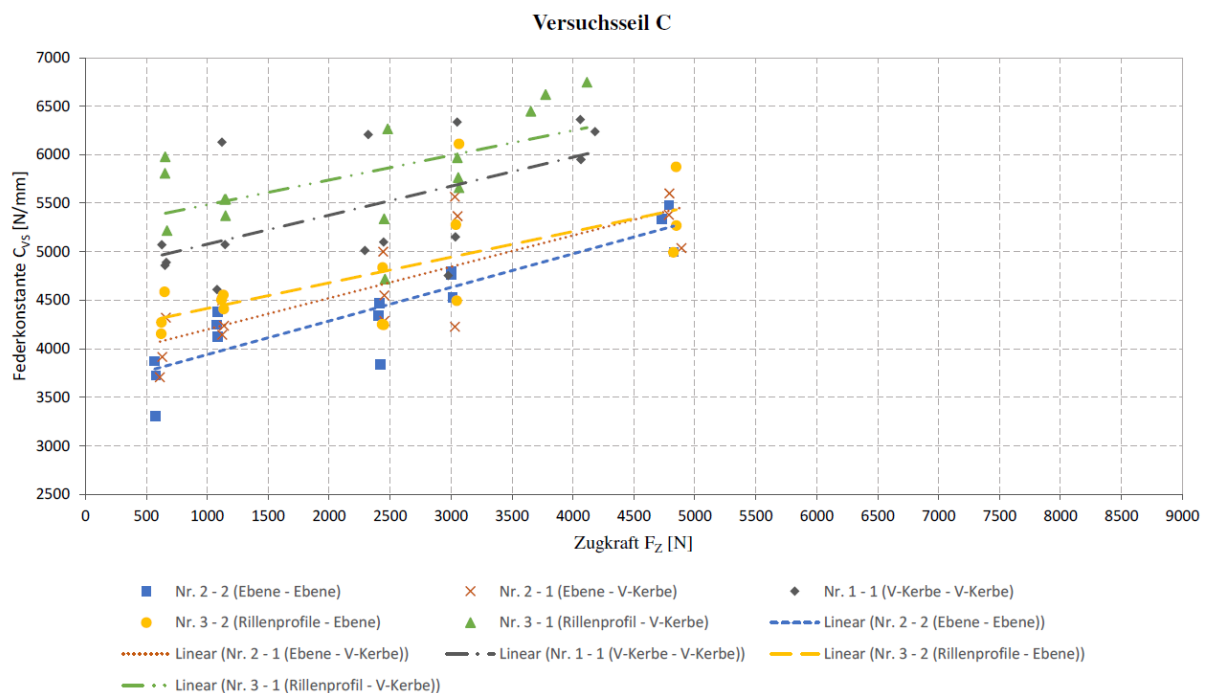


Abbildung 14: Quersteifigkeiten über axialer Zugkraft und Prüfplattenkombinationen, Versuchsseil C

Für das Versuchsseil D lässt sich ableiten, dass ebenfalls wie beim Versuchsseil C mit der Prüfplattenkombination Nr. 3 – 1 die höchsten und mit Nr. 2 – 2 die geringsten Federkonstanten erreicht werden (vgl. Abbildung 15). Weiterhin ist zu erkennen, dass die Werte der Federkonstanten für die Prüfplattenkombination Nr. 1 – 1, Nr. 2 – 1 und Nr. 3 – 2 mit Zunahme der Prüf-Zugkraft gleichbleiben bzw. leicht sinken.

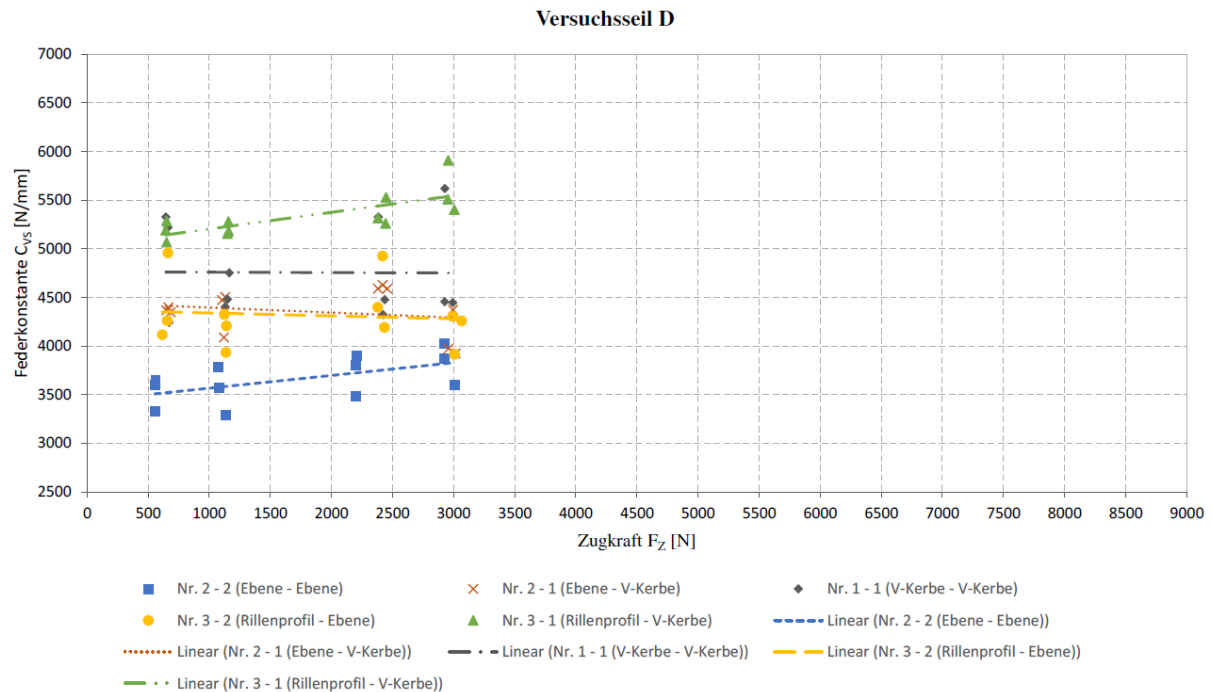


Abbildung 15: Quersteifigkeiten über axialer Zugkraft und Prüfplattenkombinationen, Versuchsseil D

Das Versuchsseil E zeigt in Verbindung mit der Prüfplattenkombination Nr. 3 – 1 die höchsten Federkonstanten im Vergleich zu den anderen Prüfplattenkombinationen (vgl. Abbildung 16). Die Werte der Federkonstanten für die Prüfplattenkombination Nr. 2 - 1, Nr. 2 - 2 und Nr. 3 - 2 zeigen einen ähnlichen Verlauf wie beim Versuchsseil C. Die minimale Prüf-Zugkraft 640 N für das Versuchsseil D bzw. E entspricht rund 3 % und die maximale Prüf-Zugkraft 3.040 N entspricht rund 14 % des Mittelwertes der jeweiligen Seilbruchkraft.

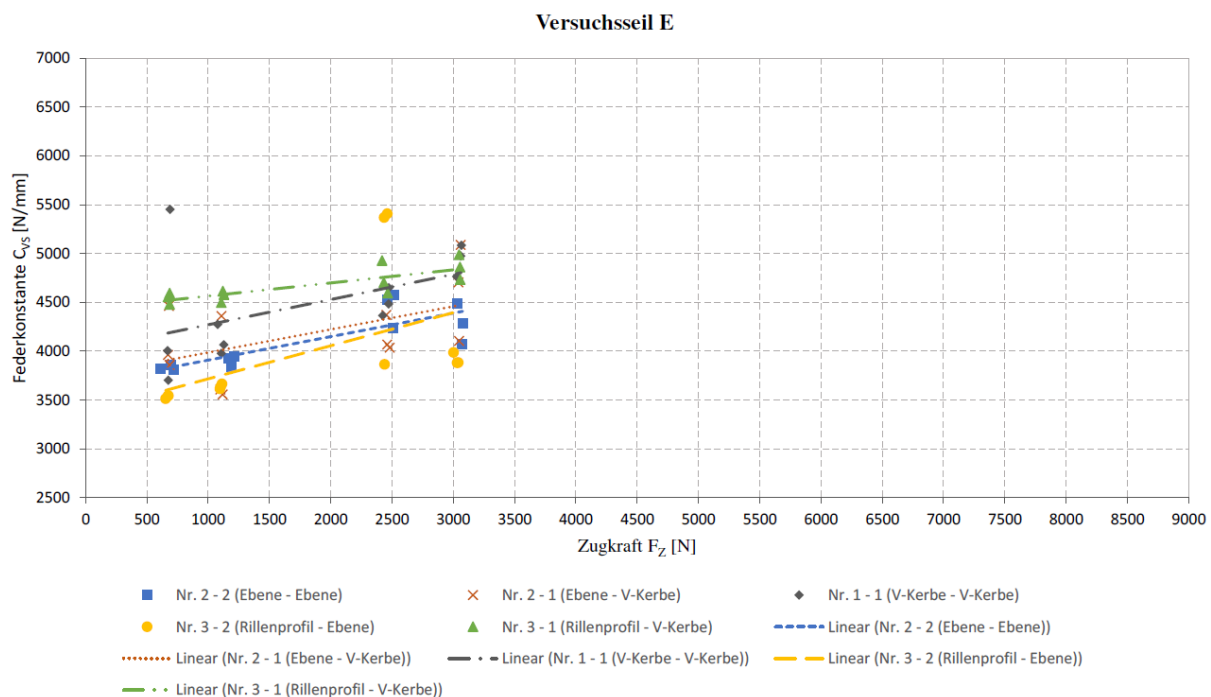


Abbildung 16: Quersteifigkeiten über axialer Zugkraft und Prüfplattenkombinationen, Versuchsseil E

Aus Abbildung 12 bis Abbildung 16 lässt sich erkennen, dass die axiale Zugkraft einen Haupteinfluss auf das Quersteifigkeitsverhalten der Faserseile hat. Somit erhöht sich die Quersteifigkeit mit Zunahme der Prüf-Zugkraft, unter der Verwendung aller Prüfplattenkombinationen für die Versuchsseile A, B, C und E. Die Quersteifigkeit des Versuchsseils D nimmt von der minimalen Prüf-Zugkraft (640 N) zur maximalen Prüf-Zugkraft (3.040 N) durch die Prüfplattenkombination Nr. 3 – 1 und Nr. 2 - 2 zu und geringfügig durch die Prüfplattenkombination Nr. 1 – 1, Nr. 2 - 1 und Nr. 3 – 2 ab. Somit wurde ebenfalls durch die Kombination der verschiedenen Prüfplatten, welche die unterschiedlichen Anwendungsfälle simulieren ein Einfluss auf die Quersteifigkeit der jeweiligen Versuchsseile festgestellt. Für einen Vergleich der Quersteifigkeitsveränderung wurde der Mittelwert der Federkonstanten bei den jeweiligen minimalen und maximalen Prüf-Zugkräften gebildet (vgl. Abbildung 17). Die dazu prozentual ermittelten Quersteifigkeitsänderungen sind farblich dargestellt. Dabei stellt die Farbe Grün eine Verringerung und Rot eine Steigerung der Quersteifigkeit dar. Es lässt sich ableiten, dass die Prüfplattenkombination Nr. 3 – 1 die geringste Steigerung der Quersteifigkeiten für alle Versuchsseile aufweist. Weiterhin ist zu erkennen, dass die größte Steigerung der Quersteifigkeiten mit der Prüfplattenkombination Nr. 2 – 2 für die Versuchsseile A mit 54 %, B mit 81 %, C mit 45 % und D mit 9 % erreicht wurde.

Durch die Prüfplattenkombination Nr. 3 – 2 und Nr. 2 – 1 verringert sich die Quersteifigkeit für das Versuchsseil D um jeweils 6 %. Die größte Steigerung der Quersteifigkeiten für das Versuchsseil E wird durch die Prüfplattenkombination Nr. 1 – 1 und Nr. 2 – 1 erreicht. Diese Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass bei dem Anwendungsfall der Mehrlagenwicklung und einer Seiltrommel mit einer Rillengeometrie (Nr. 3 – 1) das Seil in der ersten Umwicklung eine geringere Steigerung der Quersteifigkeiten bei Zunahme der Zugkraft aufweist als bei einer Seiltrommel mit einer ebenen Mantelfläche, was durch die Prüfplattenkombination Nr. 2 – 1 simuliert wird. Die Ergebnisse lassen ebenfalls den Schluss zu, dass die höchste Steigerung der Quersteifigkeitswerte in der Einlagenwicklung mit einer ebenen Mantelfläche als Seiltrommel (Nr. 2 – 2) erzielt werden. Weiterhin legen diese Ergebnisse den Schluss nahe, dass im Anwendungsfall der Einlagenwicklung und einer Seiltrommel mit Rillengeometrie (Nr. 3 – 2) sich die Seilquersteifigkeit für das Versuchsseil D verringert. Dieses gilt ebenso für das Versuchsseil D durch den Anwendungsfall der Mehrlagenwicklung auf einer Seiltrommel mit einer ebenen Mantelfläche (Nr. 2 – 1) in der ersten Umwicklung. Die Daten in der Abb. 50 deuten darauf hin, dass es für den Anwendungsfall der Mehrlagenwicklung mit drei Umwicklungen (Nr. 1 – 1), nur geringe Quersteifigkeitsveränderungen für das Seil in der zweiten Umwicklung gibt. Für das Versuchsseil D und E zeigen sich die geringsten Steigerungen der Quersteifigkeiten für die simulierte Ein- und Mehrlagenwicklung.

		Prüfplattenkombination					Quersteifigkeitsänderung [%]
		Nr. 3 - 1	Nr. 1 - 1	Nr. 3 - 2	Nr. 2 - 1	Nr. 2 - 2	
Versuchsseil	A	16	25	37	39	54	
	B	14	18	27	36	81	
	C	17	25	24	34	45	
	D	8	-2	-6	-6	9	
	E	7	13	11	13	12	

Abbildung 17: Darstellung der Quersteifigkeitsänderung der Versuchsseile und der dabei verwendeten Prüfplattenkombinationen, Quersteifigkeitsänderung bezogen auf die Unterschiede zwischen minimaler und maximaler Prüf-Zugkraft, grün stellt die Verringerung und rot die Steigerung der Quersteifigkeiten in Prozent dar, errechnet durch die Gruppenmittelwerte der jeweiligen Federkonstanten.

5. Diskussion und Ausblick

Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie lag auf der Entwicklung des Prüfaufbaus und des entsprechenden Prüfprogramms sowie der prospektiven Analyse geflochtener handelsüblicher Hochleistungsfaserseile. Weitere Analysen der erhobenen Daten und die Prüfung weitere z.B. geschlagener Faserseile sind vorgesehen. Bei der Ermittlung der Quersteifigkeiten konnten Einflüsse der Zugkraft und des Kontaktzustands festgestellt werden. Es haben sich auch neue Fragestellungen ergeben, z. B. in wie weit der axiale Schrägzug der Seilprobe während des Versuches einen Einfluss auf die Seilquersteifigkeiten besitzt. Ebenfalls von Interesse ist die Auswirkung der Belastungsdauer und -geschwindigkeit der Querkraft. Es hat sich in den Vorversuchen gezeigt, dass ein erneuter Querkrafteintrag auf dieselbe Seilprüffläche eine Erhöhung der Federkonstante bewirkt. Weiterhin wäre die Geometrie der Kontaktfläche zwischen Faserseil und Prüfplatte von Interesse, um zu ermitteln wie die Querkraft auf das Faserseil übertragen wird und ob es in einzelnen Bereichen infolge der Machart zu unzulässig hohen lokalen Pressungen kommt. Weiterhin wäre zu klären, welchen Einfluss das jeweilige Mantelgeflecht im direkten Vergleich zum verwendeten Kernseil auf die Quersteifigkeiten hat.

Danksagung

Das vorliegende Paper geht auf Auszüge aus der Masterarbeit mit dem Titel „Untersuchungen zur Quersteifigkeit von Faserseilen“ aus dem Jahr 2021 von Herrn Karl Stange zurück. Diese entstand an der Professur für Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz. Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Golder für die infrastrukturelle Unterstützung bei der Anfertigung der Arbeit sowie Herrn Dr.-Ing. Colin Kern für die intensiven Gespräche und die Betreuung die zur Entstehung der Arbeit führten.

Quellen

- [1] Mammitzsch, J.: Untersuchung zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik, Diss., TU Chemnitz, 2015.
- [2] Holschemacher, D.; Streubel, P.; Michael, M.: Endverbindungen für dynamisch belastete textile Zugmittel, TU Chemnitz: Logistics Journal: Proceedings, 2016 - ISSN 2192-9084.
- [3] Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau, Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [4] DIN EN ISO 1968:2005-08 - Faserseile und Tauwerk - Begriffe. 2005. Berlin: Beuth Verlag.
- [5] DIN EN ISO 2307:2019-12 - Faserseile - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. 2019. Berlin: Beuth Verlag.
- [6] DIN EN ISO 9554:2019 - Faserseile - Allgemeine Festlegungen. 2019. Berlin: Beuth Verlag.
- [7] DIN 83319:2013-04 - Faserseile - Spleiße - Begriffe, sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung. 2013. Berlin: Beuth Verlag.
- [8] DIN EN 1492-4:2009-02 - Textile Anschlagmittel - Sicherheit - Teil 4: Anschlag-Faserseile für allgemeine Verwendung aus Natur- und Chemiefaserseilen. 2009. Berlin: Beuth Verlag.
- [9] ISO 16839:2014-02 - Steel wire ropes - Determination of the transverse rigidity of steel wire ropes under no axial load condition. 2014. Geneva: ISO copyright office.

- [10] IMW, Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr.22. Clausthal, 1997.
- [11] IMW, Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr.39. Clausthal, 2014.
- [12] Reißig, L.: Versuchsstandskonzept zur Ermittlung der Quersteifigkeit von Faserseilen, BA, TU Chemnitz, 2015. (unveröffentlicht)
- [13] IMW, Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr.36, Clausthal, 2011.
- [14] Schulze, M.: Kompatibilität von Faserseil und mehrlagig bewickelter Seiltrommel - Entwicklung eines Verfahrens zur Analyse, Berechnung, Abstimmung und Qualitätsbewertung der Mehrlagenwicklung, Diss., TU Clausthal, 2019.
- [15] DIN 15061-2:1977-08 - Krane; Rillenprofile für Seiltrommeln. 1997. Berlin: Beuth Verlag.