



Lehrstuhl für Konstruieren in Kunst- und Verbundstoffen

Masterarbeit



Entwicklung eines FEM Modellierungsansatzes
zur Beschreibung des Verformungsverhaltens
von geflochtenen Kunststoffseilen

Niklas Johann Fimbinger, BSc

September 2019

Eidesstattliche Erklärung

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 29.08.2019



Unterschrift Verfasser/in
Niklas Johann, Fimbinger
Matrikelnummer: 01235234

Vorwort, Danksagung

Vorwort, Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meiner Betreuerin Clara Schuecker bedanken, die es mir erst ermöglichte, diese Masterarbeit, welche extra ausgeschrieben wurde, zu schreiben und mir stets zur Seite stand. Auch möchte ich mich herzlich bei meinem Betreuer Martin Pletz bedanken, der mir immer weiter geholfen hat und einige gute Denkanstöße für neue Ideen lieferte.

Auch möchte ich meiner Liebe Anna danken, die mich in schwierigen Phasen stets unterstützte und mir beiseite gestanden ist. Ein weiterer Dank gebührt meiner Familie, welche mir durch die gesamte Studienzeit geholfen hat.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Interaktion von Garnen eines Seils miteinander zu erreichen, ein Verständnis über Spannungen und Kontaktsituationen zu gewinnen und Steifigkeiten zu berechnen. Dafür wird sowohl ein geometrisches Modell eines halbstatistischen Kernmantelseiles als auch eine Finite Elemente Methode (FEM) basierende Analyse erstellt. Das Seilstück besteht aus einem Kern, welcher aus verdrehten, nebeneinander liegenden Garnen besteht, und einem geflochtenen Mantel. Kernmantelseile besitzen die Eigenschaft, dass der Kern die meiste Belastung aufnimmt und der Mantel den Kern vor etwaiger Abrasion und weiteren Umwelteinflüssen wie UV-Strahlung schützt. Das hierfür verwendete Material ist ein Polyamid 66 und gehört zu der Gruppe der teilkristallinen Thermoplaste der Kunststoffe. Da es nicht möglich ist, solch eine dicht verflochtene Struktur in einem CAD Programm aufzubauen, wird die FEM dafür verwendet. Mithilfe eines plastischen Materialverhaltens wurden einzelne Garne zu einem Strang gepresst, welche wiederum durch das Nebeneinanderordnen zu einem Kern gepresst wurden. Anschließend konnte der Mantel über den Kern gelegt und mit demselben plastischen Materialverhalten auf den Kern gedrückt werden. Für den Geometrieaufbau und die FEM Ergebnisauswertung wurde aufgrund der großen Verformungen und der hohen Anzahl an Kontakten zwischen den Elementen ein expliziter Berechnungsvorgang gewählt, der sich durch ein besseres Konvergenzverhalten auszeichnet. Durch einen Energievergleich der kinetischen Energie mit der Dehnungsenergie konnte trotz des dynamischen Berechnungsvorganges, durch das Geringhalten der kinetischen Energie, eine quasistatische Simulation erfolgen. Nachdem der Geometrieaufbau durch die FEM erfolgte, wurde eine Zugbelastung an den Stirnflächen des Seilstücks aufgebracht und mit elastischem Materialverhalten durchgeführt. Auch eine Biegebelastung wurde betrachtet, um etwaige Ideen für noch realistischere Belastungen in Modellen zu schaffen. Lokale Spannungen und das Verformungsverhalten des Seilstücks wurden erläutert und analysiert. Durch das Zusammenpressen der Geometrie konnte eine aneinander anliegende Geometrie erzeugt werden, welche einem realen Kernmantelseil ähnelt. Abschließend kann gesagt werden, dass dieses Modell als Ausgangspunkt für komplexere Berechnungen dient.

Abstract

The objective of this thesis is to achieve an interaction of yarns of a rope with each other, to gain an understanding of tensions and contact situations and to calculate stiffnesses. For this purpose a geometric model of a semistatic Kernmantle rope is developed and an analysis based on the finite element method (FEM) is carried out. The rope piece consists of a core made up of twisted adjoining yarns and a braided sheath. Kernmantle ropes are characterized in that the core absorbs most of the stress and the sheath protects the core from abrasion and other environmental impacts such as UV radiation. The material used is polyamide 66 which belongs to the group of semicrystalline thermoplastics. As it is not possible to form such a tightly braided structure in a CAD application, the FEM is used. Due to the malleable material behavior single yarns were compressed to rope lines which in turn were compressed to a core by placing them next to each other. Then the sheath could be placed over the core and pressed on the core with the same malleable material behavior. Due to the large deformations and the high number of contacts between the elements an explicit calculation process with a better convergence behavior was used for the geometric structure and the FEM result evaluation. By comparing the kinetic energy with the strain energy a quasi-static simulation could be performed despite the dynamic calculation process by minimizing the kinetic energy. After completing the geometric structure by using the FEM a tensile strain was applied to the frontal area of the rope piece and exerted with elastic material behavior. The bending strain was also considered to develop possible ideas for even more realistic stresses in models. Local tensions and the deformation behavior of the rope piece were explained and analyzed. By compressing the geometry an adjoining geometry could be created that resembles a real Kernmantle rope. In conclusion it can be said that this model can serve as starting point for more complex calculations.

Motivation

Seile werden heutzutage fast überall eingesetzt, sei es in der Industrie, in der Hebeteknik bei Kranen, im Personen- oder Gütertransport wie Seilbahnen, im Brückenbau, unter Tage für die Einfahrt in eine Mine, als auch im Sport. Beispielsweise im Segelsport, Klettersport oder auch in der Seilzugangstechnik wie Höhenrettung, Höhlenforschung, Baumpflege und Positionierung. In einigen Bereichen werden ausschließlich Stahlseile verwendet, jedoch darf man das Material Kunststoff nicht außer Acht lassen. Seile für den Kletterbereich aus Kunststoff können sowohl statisch als auch dynamisch sein. Statische Seile werden für die Arbeitsplatzpositionierung verwendet, wogegen dynamische Seile beim Klettersport verwendet werden, wenn das Seil Sturzenergie aufnehmen soll, um den Kletterer vor dem Herabfallen zu schützen. Komplette statisch sind jene jedoch nicht, so weisen sie im Vergleich zu dynamischen Kletterseilen eine Gebrauchsdehnung von max. 5% auf. Wie zu erwarten ist, dürfen solche halbstatischen Seile nicht zum aktiven Sportklettern verwendet werden. Lediglich ein Abseilen von einem höher gelegenen Anschlagpunkt oder ein Aufsteigen am Seil wird in der Seilklettertechnik mit diesen Seilen bewerkstelligt. Unter anderem werden diese Seile aufgrund ihrer geringen Dehnung auch zum Heben von Lasten verwendet.

Der Sturzfaktor beschreibt das Verhältnis von Sturzhöhe durch ausgegebene Seillänge und ist dementsprechend eine dimensionslose Zahl von theoretisch 0 bis maximal 2 [1, S. 62]. Kommt es zu einem Sturzfaktor > 1 , so wirken enorme Fangstoßkräfte, die durch den Aufbau der Geometrie des halbstatischen Kletterseiles nicht abgebaut werden können und somit direkt auf den menschlichen Körper wirken. Da ich selber im Laufe meines Studiums eine Leidenschaft für das Klettern und die Seilzugangstechnik entwickelt habe, und mich immer mehr dafür interessierte, was im Inneren eines Seiles stattfindet, entstand diese Masterarbeit.

Das Tolle an billigen Kletterseilen ist, dass sie ein Leben lang halten.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Vorwort, Danksagung	II
Kurzfassung.....	III
Motivation	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
1 Grundlagen der Kernmantelseile.....	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Grundbegriffe	1
1.2.1 Textilgarn	1
1.2.2 Garn.....	2
1.2.3 Strang	3
1.3 Aufbau eines Kernmantelseiles.....	5
1.4 Realer Herstellprozess eines Kernmantelseiles.....	7
1.5 Seilmechanik	12
1.5.1 Seilgröße und mechanische Eigenschaften	13
1.5.2 Spannung, Torsion, Dehnung und Drall.....	16
1.5.3 Biegung	21
2 Modellierung	25
2.1 Problematik / Übersicht.....	26
2.2 Geometrieaufbau	39
2.2.1 Ein Strang des Kerns	39
2.2.2 Kern.....	42
2.2.3 Mantel.....	46
2.3 Verworfenener Modellansatz / Balkenelement.....	52
3 Ergebnisse	55
3.1 Netzstudie.....	58
3.1.1 Zugbelastung	60
3.1.2 Studie der Randeﬀekte: Längenstudie	68
3.2 Biegung	80
4 Zusammenfassung.....	92
5 Übertragbarkeit und Ausblick	95
6 Abbildungsverzeichnis	96
7 Tabellenverzeichnis.....	101
8 Literaturverzeichnis.....	102

1 Grundlagen der Kernmantelseile

1.1 Einleitung

Seile sind Strukturen aus Textilfasern oder Stahldrähten mit einem relativ geringen Querschnitt im Vergleich zu ihrer Länge. Bei Textelseilen werden synthetische Fasern verwendet, die so angeordnet sind, dass eine gezielte Bruchfestigkeit, eine gewisse Dehnung wie auch eine Mindestmenge an Fasern zustande kommt und so das Seil spezielle mechanische Eigenschaften erhält. Bei den meisten Seilen sind die Fasern so angeordnet, dass sich eine spiralförmige Struktur ergibt. Diese Struktur wird in größeren Schichten fortgesetzt, bis ein ganzes Seil entstanden ist. Dabei verwendet man Lege- oder Flechttechniken [2, S. 75].

1.2 Grundbegriffe

1.2.1 Textilgarn

Als Textilgarn, siehe Abb. 1-1, bezeichnet man ein synthetisch erzeugtes Fasermaterial, welches den Ausgangspunkt des Seiles darstellt und aus Multifilamentgarnen oder Monofilamentgarnen besteht. Multifilamentgarne können mehrere hundert Filamente von 10-50 μm im Durchmesser enthalten. Diese sind üblich für Nylon, Polyester und Aramid. Monofilamentgarne sind im Vergleich dazu von 0,2-0,5 mm im Durchmesser deutlich größer. Um dem Garn eine gewisse Kohärenz zu verleihen, werden die Filamente leicht verflochten oder verdrillt. Meistens werden beide Arten an Filamenten in einem Seil eingesetzt [2, S. 77].

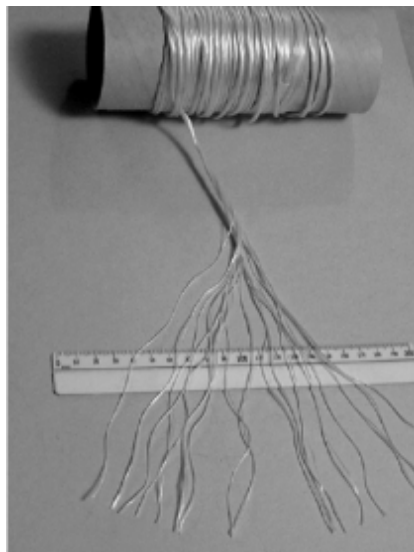


Abb. 1-1 Textilgarne getrennt voneinander, nach erstem Verzwirnen [2, S. 78]

1.2.2 Garn

Die einzelnen Textilgarne werden zu größeren Garnen verdrillt, siehe Abb. 1-2. Sogenannte „Yarns“. Je nach Vorliebe des Herstellers geschieht dies in ein oder zwei Stufen, abhängig von der Größe, vom Typ (gelegt, geflochten) und der verfügbaren Maschinerie. Werden die Textilgarne zuerst in S-Drall verdrillt, so werden diese anschließend in Z-Drall untereinander verdrillt. S- und Z-Drall beschreiben die Schlagrichtung der Textilgarne, bzw. des Garns, siehe Abb. 1-3. „Denier“ (kurz *den*) ist eine Maßeinheit aus der Textilbranche und beschreibt das Gewicht pro Fadenlänge. Genauer ist sie wie folgt definiert:

$$1 \text{ den} = \frac{1 \text{ g}}{9000 \text{ m}} \quad (1)$$

Manche Seilhersteller können sogar leicht verdrillte Multifilamentgarne von 20.000-40.000 den herstellen [2, S. 77].

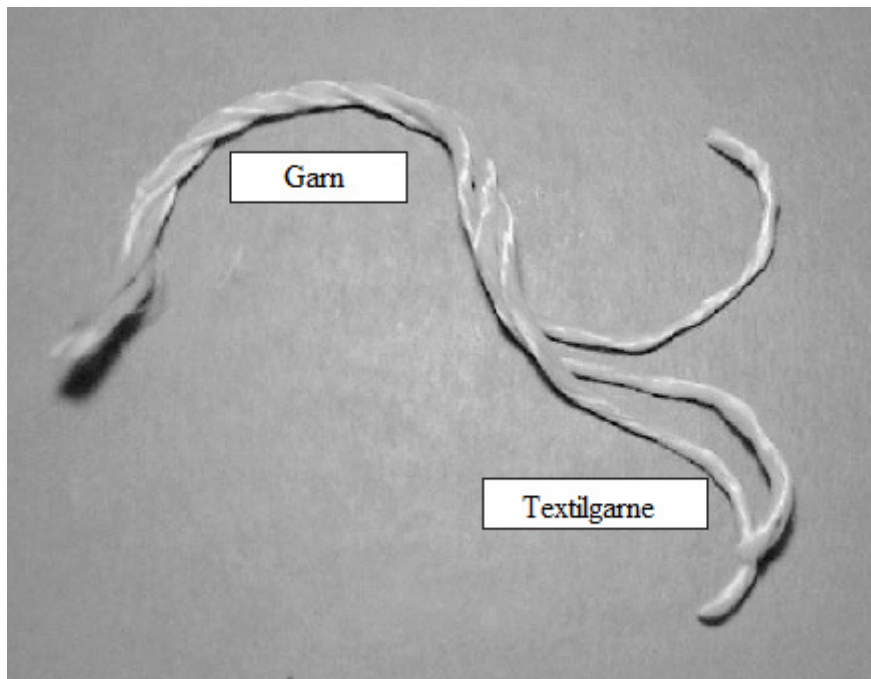


Abb. 1-2 Garn, produziert aus drei zuerst verzwirnten Textilgarnen [2, S. 78]

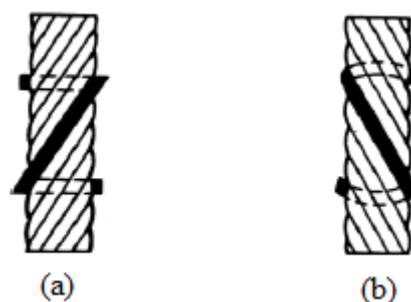


Abb. 1-3 (a) Z-Drall, rechtsschlag; (b) S-Drall, linksschlag [3, S. 25]

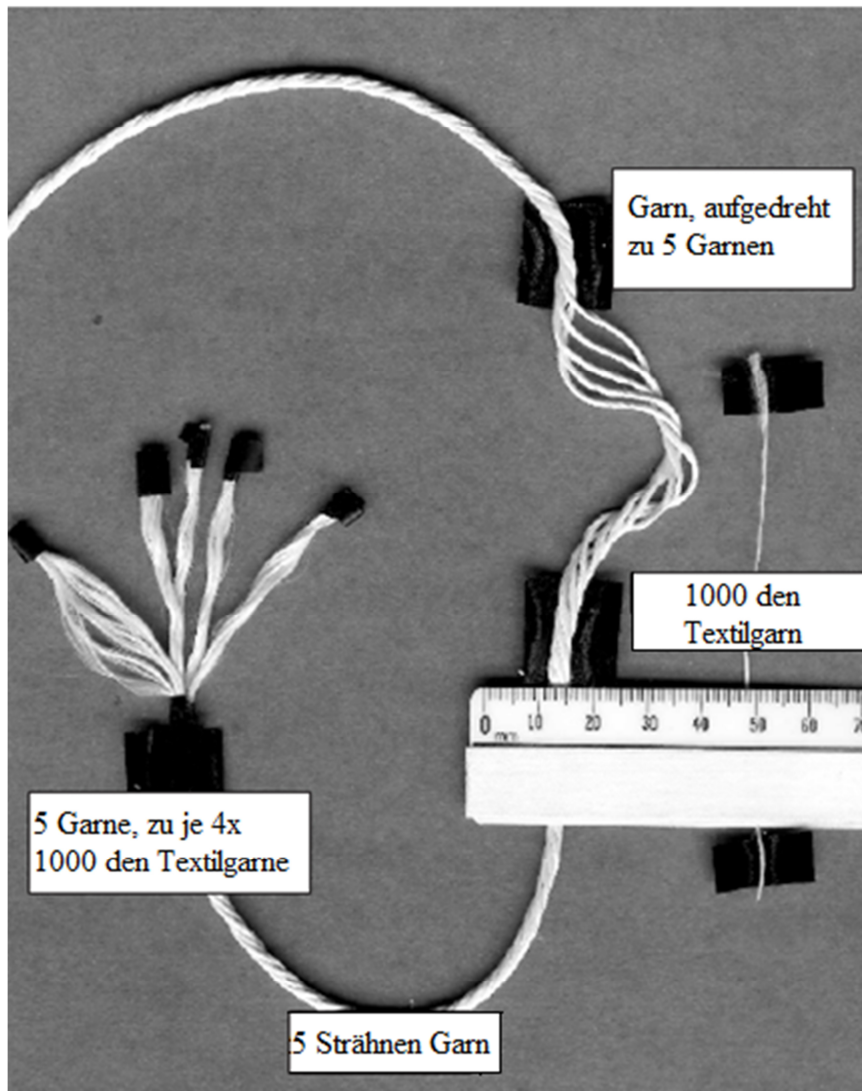


Abb. 1-4 Evolution von Textilgarn zu Garn [2, S. 79]

1.2.3 Strang

In der Regel werden mehrere verdrehte Garne als Strang bezeichnet. Für kleinere Seile werden die Garne selber schon als Strang bezeichnet. Speziell in geflochtenen Strukturen können die Stränge aus einer Vielzahl an Textilgarnen aufgebaut werden, anstatt die Zwischenstufe „Garn“ zu erzeugen. Die letzte Komponente eines Seiles ist somit der Strang. In Abb. 1-5 sieht man die einzelnen Komponenten und somit den Aufbau eines Seiles. Je mehr Garne zu einem Strang zusammengefasst werden, umso weicher erscheint der Querschnitt. Wird der Drall der Garne erhöht, umso fester erscheint der Querschnitt. Die praktisch obere Grenze der Anzahl der Garne, die zu einem Strang zusammengefasst werden, ist jene, bei der der Strang eine sehr weiche Struktur mit abnehmender Festigkeit erhält, im Vergleich zu der Festigkeit der einzelnen Garne. Auch in größeren Seilen führt die zusätzliche Drehung in großen Strängen zu Festigkeitseinbußen, hervorgerufen durch die

Grundlagen der Kernmantelseile

Strangverdrillung. Seilfasermaterialien wie Polyester können dem deutlich entgegenwirken, jedoch sind diese dann unempfindlicher bei einer Änderung der Seillänge. Sind die oberen Grenzen der Strangverdrillung erreicht, so werden geflochtene Seilkonstruktionen herangezogen [2, S. 77–81].

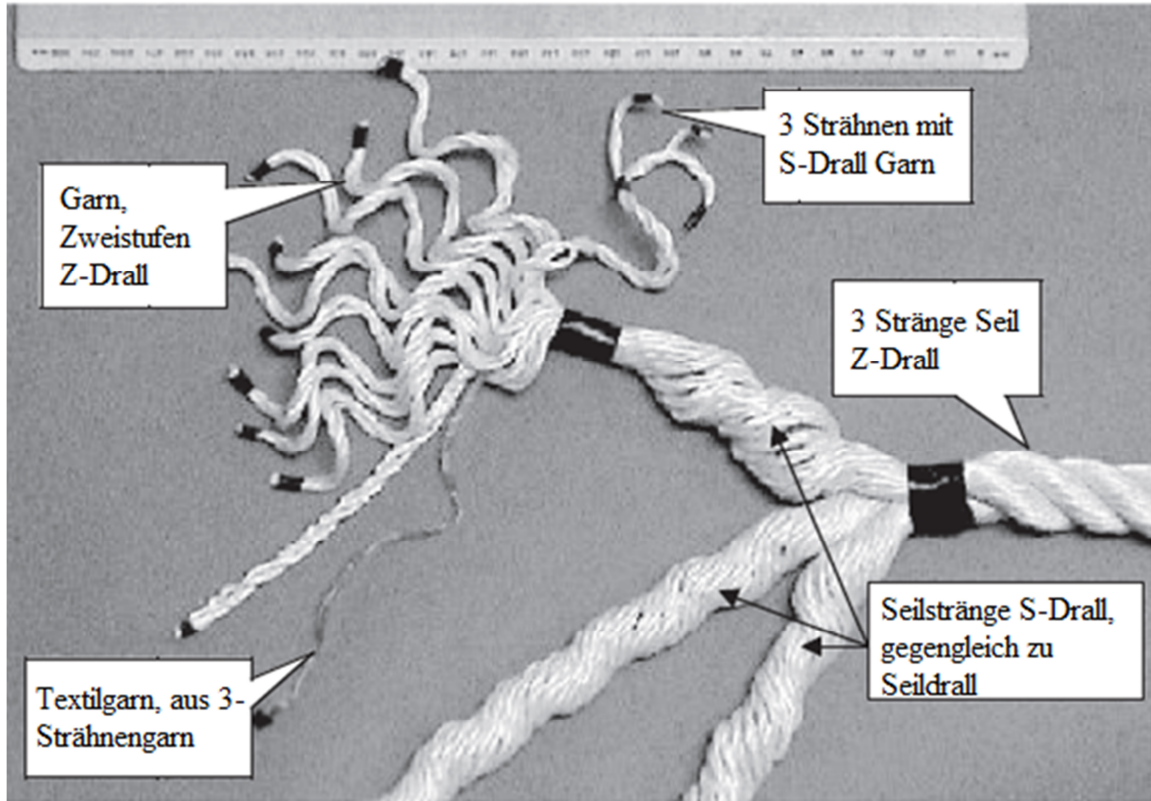


Abb. 1-5 3 Stränge Seil, aufgeteilt in seine Komponenten [2, S. 80]

1.3 Aufbau eines Kernmantelseiles

Im vorherigen Kapitel wurden die jeweiligen Grundbegriffe erklärt. Anhand der Abb. 1-6 sieht man einen Auszug der möglichen Seilkonstruktionen.

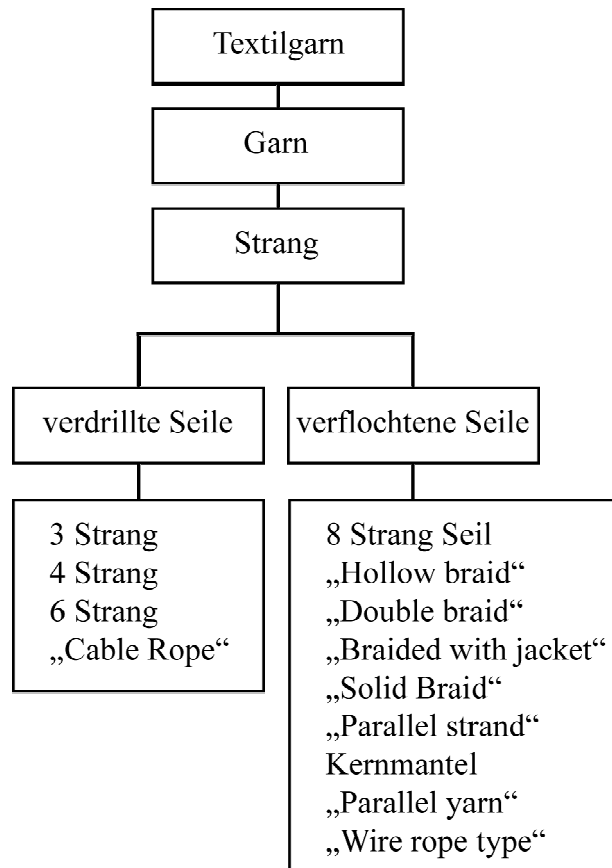


Abb. 1-6 Übersicht und Auszug verschiedener Seilkonstruktionen

Kernmantelseile bestehen aus einem Kern und einem Mantel, siehe Abb. 1-7. Der Kern kann folgenden Aufbau beinhalten:

- parallel liegende Textilgarne
- mehrere S und Z verdrillte Textilgarne
- mehrere S und Z verdrillte „Teilseile“
- mehrere ineinander geflochtene Stränge

Der geflochtene Mantel besteht aus mehreren Garnen, welche aus vielen einzelnen Textilgarnen miteinander verdrillt sind, diese umgeben den Kern in seiner geflochtenen Struktur. Meist werden unterschiedliche Farben für die Garne eingesetzt, um ein optisches Muster zu erzeugen. Der Mantel dient dazu, den lasttragenden Kern gegen Abrieb und UV-Schädigung zu schützen. Kernmantelseile werden außerdem in „statisch“ und „dynamisch“ unterteilt. Dynamische Seile werden für den Klettersport eingesetzt, um bei einem Sturz des Kletterers die Fallenergie aufzunehmen und so ein angenehmeres Stürzen zu

Grundlagen der Kernmantelseile

gewährleisten. Statische Seile können aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Geometrie nicht so große Sturzenergien aufnehmen und werden deshalb als statisch oder halbstatisch bezeichnet. Als starre Elemente darf man diese jedoch nicht betrachten, da sie eine maximale Seildehnung von 5% oder weniger aufweisen [2, S. 95–100]. Damit der Rahmen dieser Arbeit nicht gesprengt wird, beinhaltet die nachfolgende Betrachtung lediglich halbstatische Kernmantelseile.

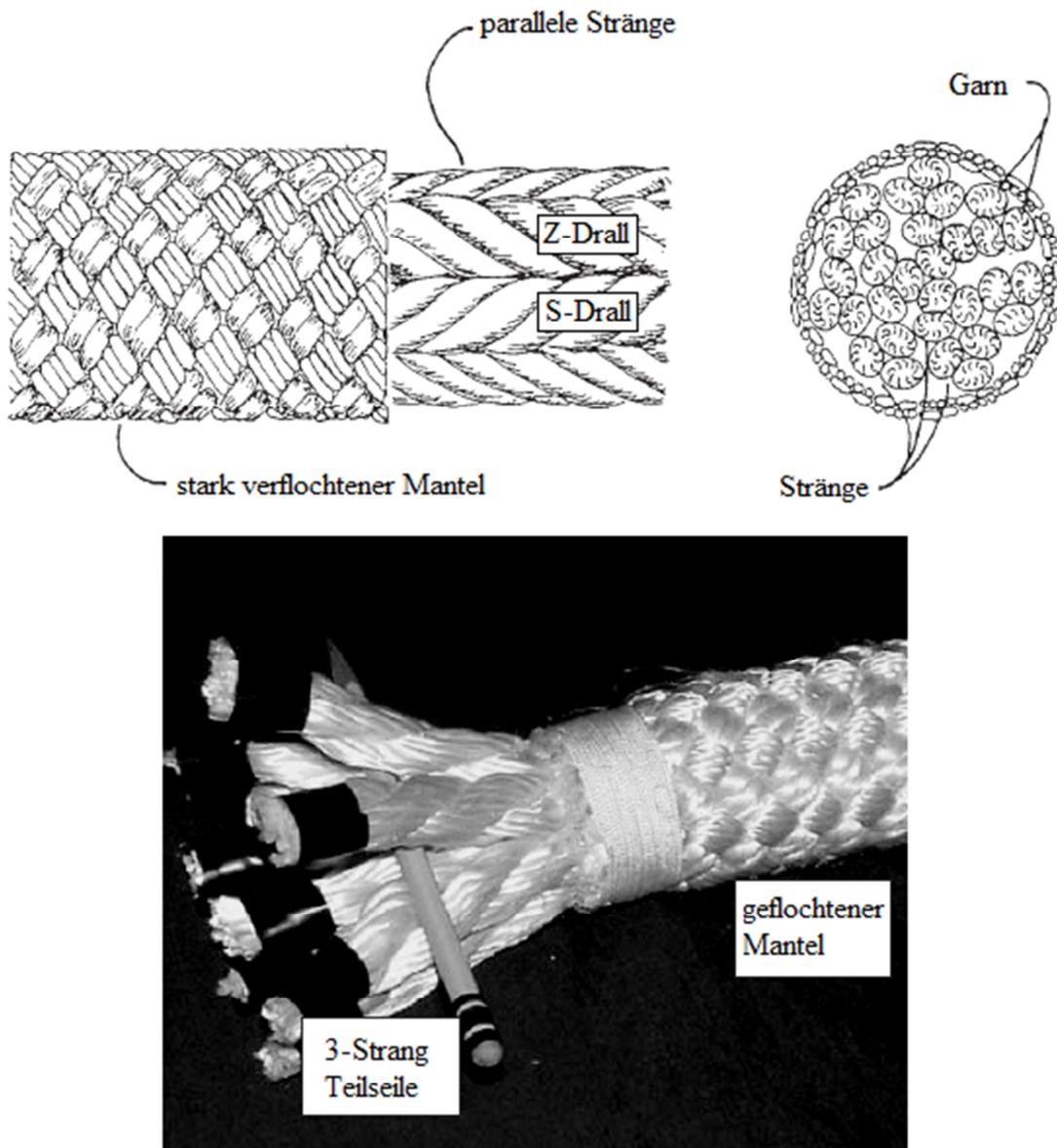


Abb. 1-7 Parallelkern-Kernmantelkonstruktion - Parallel Strang Seil mit 3-Strang Teilseil aus S-Drall und Z-Drall mit geflochtenem Mantel [2, S. 96]

Tabelle 1 zeigt einige Parameter, welche typischerweise diese Art von Seilen aufweisen.

Tabelle 1: Merkmale typischer halbstatistischer Kernmantelseile

Gewicht	75 – 118 g/m
Länge:	50 m, 60 m, 100 m, 200 m
Seildurchmesser:	8-13 mm
Seildehnung 50-150 kg:	2-4,1%
Festigkeit:	26-37 kN
Festigkeit mit Knoten:	15-19 kN
Material:	PA
Knotbarkeit:	0,56-0,97

Das Material für den Mantel und den Kern eines Kernmantelseiles mit geringer Dehnung muss aus durchgehender unbenutzter Chemiefaser bestehen, deren Schmelzpunkt über 195°C liegt. [4, S. 5]. Die dimensionslose Knotbarkeit wie auch weitere genauere Betrachtungen der einzelnen Verfahren zur Bestimmung der Kennwerte können der Literatur [4] entnommen werden.

1.4 Realer Herstellprozess eines Kernmantelseiles

In diesem Kapitel wird der Herstellprozess eines realen Kernmantelseiles beschrieben. Der Grundaufbau ähnelt jedem Kernmantelseil, jedoch ist das dahintersteckende Know-how von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich, weshalb hier nur ein grober Überblick behandelt werden kann.

Der Herstellprozess lässt sich in vier Bereiche einteilen:

- Textilgarnherstellung
- Garnherstellung
- Strangherstellung
- Seilherstellung

Auf die Textilgarnherstellung wird hier eher nicht eingegangen. Generell ist dazu aber zu sagen, dass die Textilgarne an sich auch schon verdrillt werden [2, S. 185–186].

Einer der wichtigsten Faktoren ist jedoch das Abspulen der Garne an sich. So entsteht wie in Abb. 1-8 (a) keine zusätzliche Verdrehung des Garns, wobei in Abb. 1-8 (b) mit jeder vollen Umwindung eine Verdrehung eingebracht wird [2, S. 191].

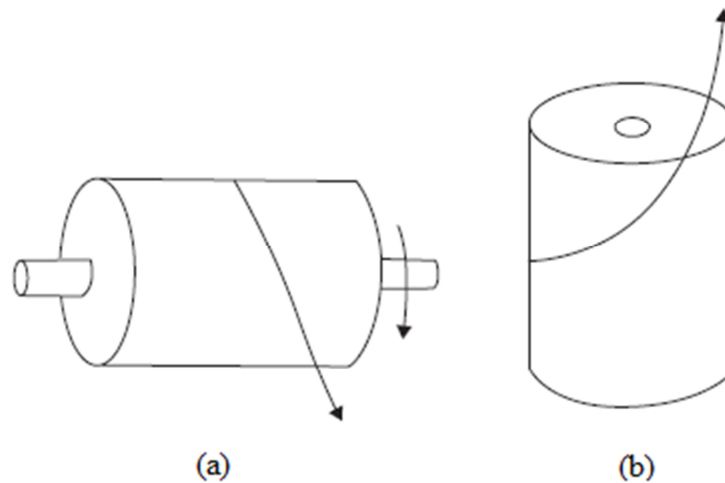


Abb. 1-8 (a) Abspulen einer rotierenden Spule ohne Verdrehung; (b) Abziehen mit Verdrehung [2, S. 191]

Nichtsdestotrotz sind Textilgarne für die meisten Seilhersteller zu klein, weshalb das Garn verdrillt oder gewunden wird. Generell ist eine Verdrillung besser, um ihm eine strukturelle Integrität zu geben. Der äußere Drillwinkel θ des Garnes liegt bei 5° bis 10° und ist in Abb. 1-9 schematisch dargestellt. Am häufigsten werden Textilgarne gleich in einem Arbeitsschritt zu Garnen verdrillt. Um die Garne auf Spannung halten zu können, wird eine Vorspannung meist mit einem Tellerspanner erzeugt und die Endspannung mithilfe einer federgespannten Ringwinde bewerkstelligt, siehe Abb. 1-10 (a) und Abb. 1-10 (b) [2, S. 191–193].

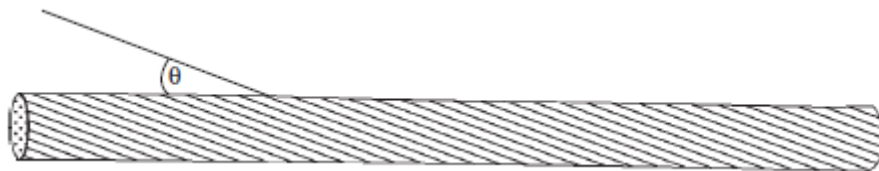


Abb. 1-9 Äußerer Drillwinkel eines Garns [2, S. 191]

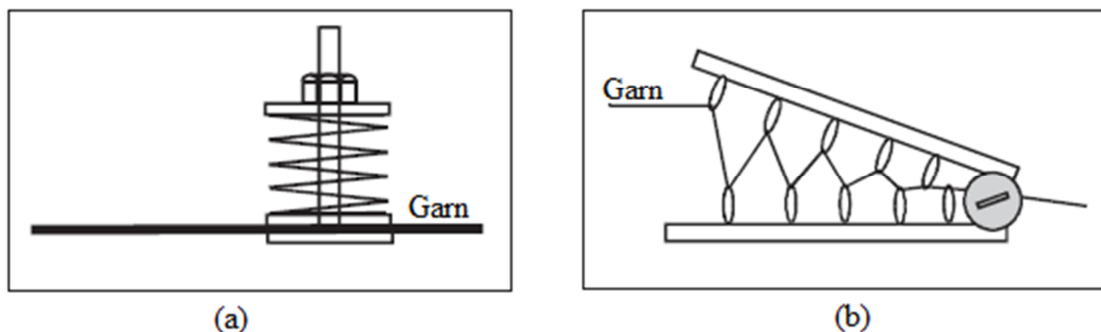


Abb. 1-10 (a) Tellerspanner; (b) federgespannte Ringwinde [2, S. 193]

Geflochtene Strukturen können von dünnen Zwirnen, $\varnothing = 1$ mm bis hin zu extrem großen Mooring Seilen, $\varnothing = 200$ mm reichen. Der Grundaufbau ist stets derselbe. Um die

Verflechtung herzustellen, befinden sich die Garne auf Spulen, welche auf sogenannten „Klöppeln“ montiert sind. Die Klöppel bewegen sich sinusförmig auf eingefrästen in dem Tisch befindlichen Gangbahnen. Die Klöppel werden durch Flügelräder entlang der Gangbahnen vorangetrieben. Zusätzlich wird zwischen Flachgeflecht und Rundgeflecht unterschieden, wobei für Seile stets das Rundgeflecht verwendet wird. Beim Flachgeflecht verlaufen die Klöppel alle in derselben Gangbahn. Die kleinstmögliche strukturelle Anordnung eines Flachgeflechtes ist jene mit drei Klöppeln. Bei Rundgeflechten gibt es zwei Klöppelscharen, wobei die eine im Uhrzeigersinn und die andere gegen den Uhrzeigersinn auf phasenverschobenen Gangbahnen bewegt werden. Die kleinste strukturelle Anordnung an einem Rundgeflecht ist jene mit vier Klöppeln. Da die Klöppel entlang der Gangbahn eine Relativbewegung zur Mittelachse der Verflechtung ausführen, muss die Längendifferenz ausgeglichen werden, damit die Garne stets auf Spannung gehalten werden. Dies geschieht ebenfalls mit Tellerspannern, wobei bei neueren Maschinen eine Erkennung der Garnspannung implementiert ist und nur dann freigegeben wird, wenn Garn benötigt wird. Durch unterschiedliche Konfigurationen an Klöppeln, siehe Abb. 1-11, können unterschiedliche Verflechtungen erzeugt werden. Das Ergebnis der Verflechtung ist in Abb. 1-12 zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass für die erste Konfiguration Abb. 1-11 (a) und Abb. 1-12 (a) die Garne sich kreuzen und jeweils einmal unten und einmal darüber verlaufen. Für die zweite Konfiguration Abb. 1-11 (b) und Abb. 1-12 (b) sind die Garne unter zwei und über zwei in gestaffelter Anordnung positioniert. Diese Art hat eine größere strukturelle Integrität und wird häufiger bei der Produktion von Seilen eingesetzt. Bei einer großen Anzahl an Klöppelträgern wird ein hohles kreisförmiges Geflecht erzeugt, das ohne einen Kern zu einem Band zusammenfallen würde. Geflochtene Seile haben im allgemeinen einen Helixwinkel von 20° - 30° . Für halbstatistische Kernmantelseile werden kleinere Helixwinkel verwendet, da niedrigere Winkel höhere Festigkeiten und strukturelle Integrität ergeben und Robustheit durch ein engeres Geflecht nicht erforderlich ist [2, S. 200–204].

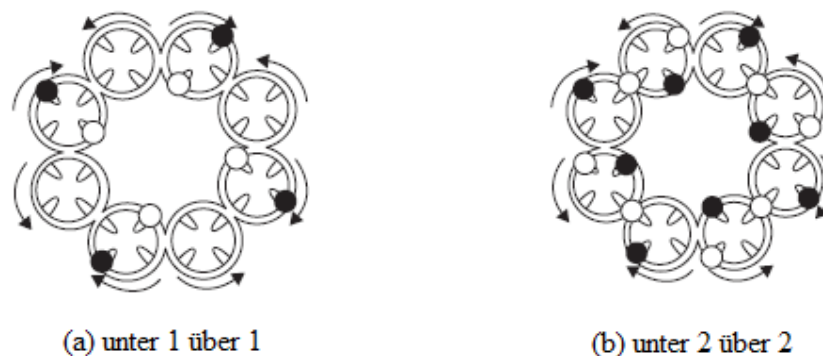


Abb. 1-11 Rundgeflecht - Konfiguration an Klöppeln [2, S. 204]

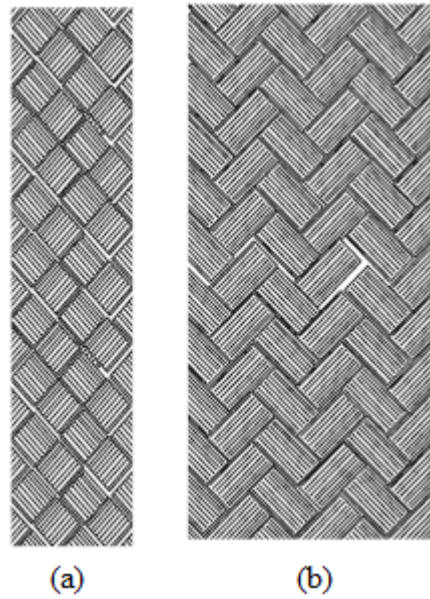


Abb. 1-12 (a) „Diamond“ Verflechtung; (b) „Twill“ Verflechtung [2, S. 205]

Die Variation an Geflechtem ist fast endlos, wobei diese durch die Garngröße, das Kern/Mantel-Massenverhältnis, die Anzahl an Garnen im Mantelgeflecht, die Stränge im Kern, den Helixwinkel und das Verdrehungsverhältnis eingeschränkt beziehungsweise bestimmt werden [2, S. 205].

In Abb. 1-13 ist eine Verflechtungsmaschine zu sehen. In der Zentralachse der Verflechtung wird der Kern von unten zugeführt, welcher einige Stufen davor, je nach Ansprüchen an das Seil, hergestellt wurde. Generell kann gesagt werden, umso mehr kleine Stränge es gibt, umso effizienter ist das Seil in seiner Festigkeit, umso schwerer ist es jedoch, das Seil zu spleißen. Halbstatische Kernmantelseile sollten außerdem torsionsfrei sein, indem die Hälfte der Kernstränge S-Drall und die andere Hälfte Z-Drall aufweisen [2, S. 208].

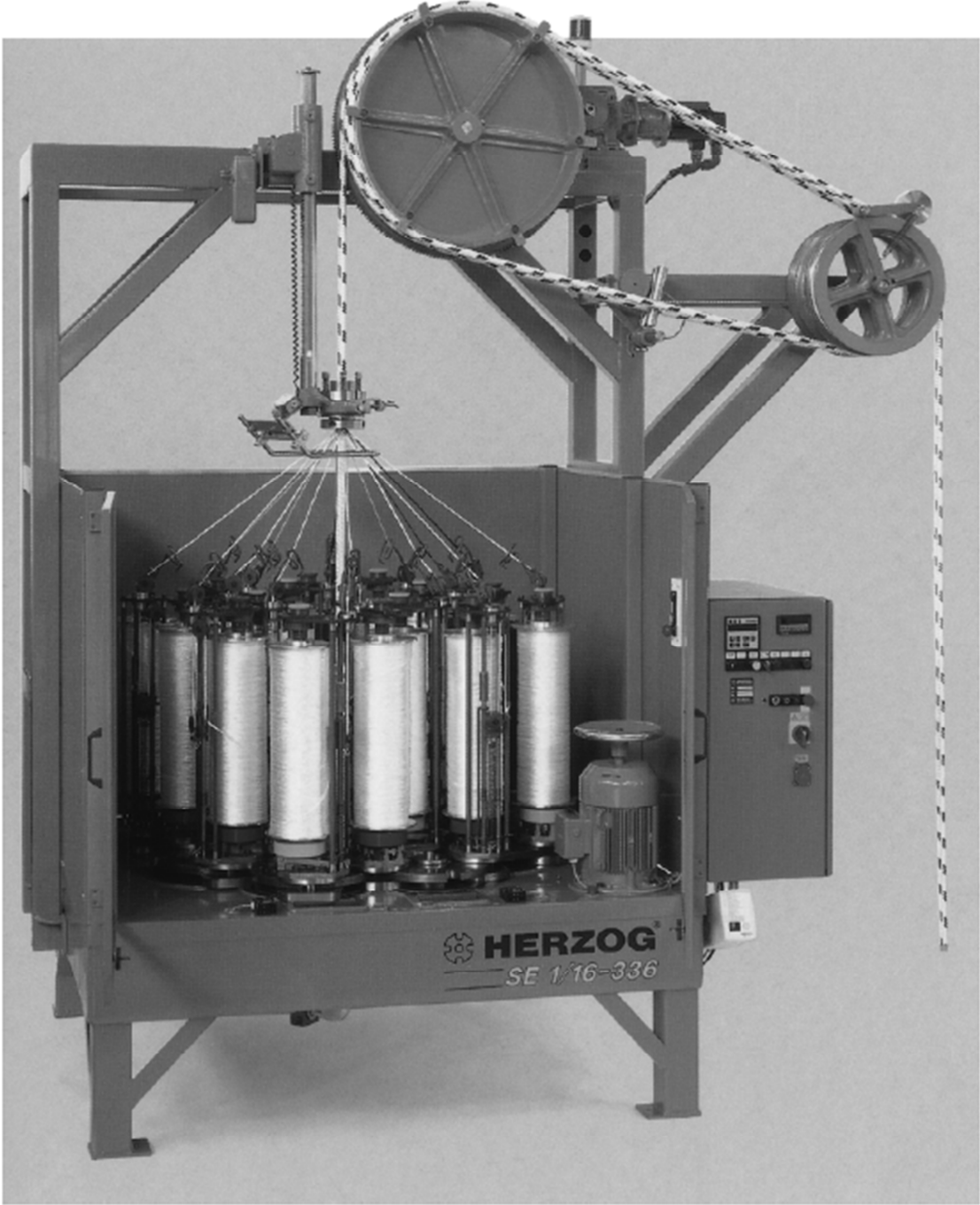


Abb. 1-13 Eine Verflechtungsmaschine von Herzog [2, S. 210]

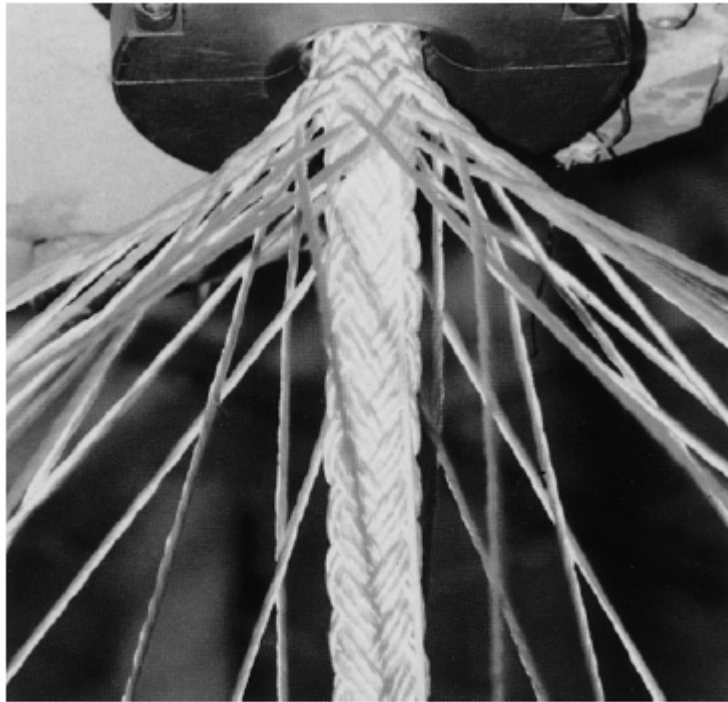


Abb. 1-14 Detailansicht des Kerns (geflochten) und des Mantels [2, S. 209]

1.5 Seilmechanik

Seile, welche Millionen von Textilgarnen in sich haben, sind sowohl in ihrem geometrischen Aufbau als auch in ihren mechanischen Eigenschaften sehr komplex. Die Vorgeschichte eines älteren Seiles ist genauso wichtig wie die aktuelle Belastung und die Geometrie bei zyklischer Belastung. So kann ein Seilhersteller aus alten Seilen, die eventuell Schwächen aufweisen, neue Erkenntnisse schließen und mit den Anforderungen, die von der Industrie, von den Normen, als auch von den Kunden selber gestellt werden, ein optimales Seil erstellen. In diesem Kapitel wird auf die Grundzüge dieser Komplexität eingegangen und diese näher erläutert. Die Festigkeit spiegelt eine sehr wichtige Spezifikation wieder, so muss die Bruchlast größer als die maximal zu erwartende Last sein. Dies ist jedoch nicht immer einfach, da es sehr auf die Benutzung der Kunden ankommt, wie diese mit den Seilen umgehen, Stichwort Seilbahn und deren möglichen Kräfte. Ein weiterer Faktor, der berücksichtigt werden muss, ist das innere Drehmoment, welches nicht in einem Seil erwünscht ist. Beispielsweise kann es verschiedene Verbindungsmittel wie Karabiner in eine ungünstige Lage bringen und so Kräfte einleiten, die möglicherweise zum Versagen führen könnten. Die Ermüdung und Alterung eines Seiles spielt bis zur Ablegereife eine große Rolle, so wie auch die Biegesteifigkeit beim Anschlag von Seilen sehr wichtig ist [2, S. 141–142].

1.5.1 Seilgröße und mechanische Eigenschaften

Die Bruchlast und der Widerstand gegen Dehnung steigen mit dem Durchmesser des Seiles an. Aufgrund dessen, dass der innere Aufbau beziehungsweise die Verflechtung am Mantel und die unterschiedlichen Geometrien sehr komplex sind, kann nur schwer eine genaue Querschnittsfläche definiert werden, weshalb die Seilgröße am besten als lineare Dichte ρ_L in $[\frac{g}{m}]$ angegeben wird. So liegt ein beliebiges Garn des Kerns zu einer beliebigen Position in einem gewissen Winkel θ zu der Seilachse, siehe Abb. 1-15. Eine gute Annäherung der linearen Dichte kann nach Gl. (2) errechnet werden, wobei n_{Garn} die Anzahl an Garnen, $\rho_{L,Garn}$ die lineare Dichte des Garns in $[\frac{g}{m}]$ und $\frac{1}{\cos(\theta)}$ der mittlere Winkel zwischen Seilachse und dem Garn ist. Letzterer wird auch als Kontraktionsfaktor der Garne bezeichnet.

$$\rho_{L,Seil} = \frac{n_{Garn} * \rho_{L,Garn}}{\cos(\theta)} \quad (2)$$

Durch Multiplikation mit der Seillänge L ergibt sich nach Gl. (3) die Masse des Seiles.

$$M = \rho_{L,Seil} * L \quad (3)$$

Die Querschnittsfläche A des Seiles lässt sich somit nach Gl. (4) und Gl. (5) errechnen, wobei der Packungsfaktor der Anteil des von den Textilgarnen eingenommenen Seilquerschnitts ohne die Zwischenräume an Luft ist [2, S. 142–143].

$$A = \frac{\rho_{L,Seil}}{\rho_{Seil}} \quad (4)$$

$$\rho_{Seil} = \rho_{Textilgarn} * \text{Packungsfaktor} \quad (5)$$

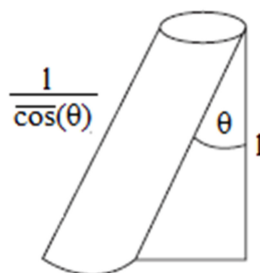


Abb. 1-15 verdrilltes Garn mit Winkel θ zur Seilachse [2, S. 143]

Für ein verdrilltes einzelnes Garn erster und zweiter Lage, wie in Abb. 1-16 zu sehen, ist der Mittelwert des Kontraktionsfaktors $\frac{1}{\cos(\alpha)}$ nach $\frac{1}{2} * (1 + \frac{1}{\cos(\alpha)})$ mit α als Winkel der Helix an der Oberfläche zu berechnen, siehe [5]. Die Faktoren l , r und θ gehören zu einem Garn der ersten Lage und die Faktoren L , R und α zu einem darüber liegenden Garn aus zweiter Lage.

Grundlagen der Kernmantelseile

Für komplexe Seile ist die Berechnung durch doppelte Verdrillung oder den verflochtenen Mantel schwieriger, jedoch können Computerprogramme dabei behilflich sein. In Tabelle 2 sind Werte für den Faktor $\frac{1}{\cos(\theta)}$ einiger Winkel berechnet. Daraus sieht man, dass die Kontraktion ab Schlagwinkel von 10° relevant wird [2, S. 143].

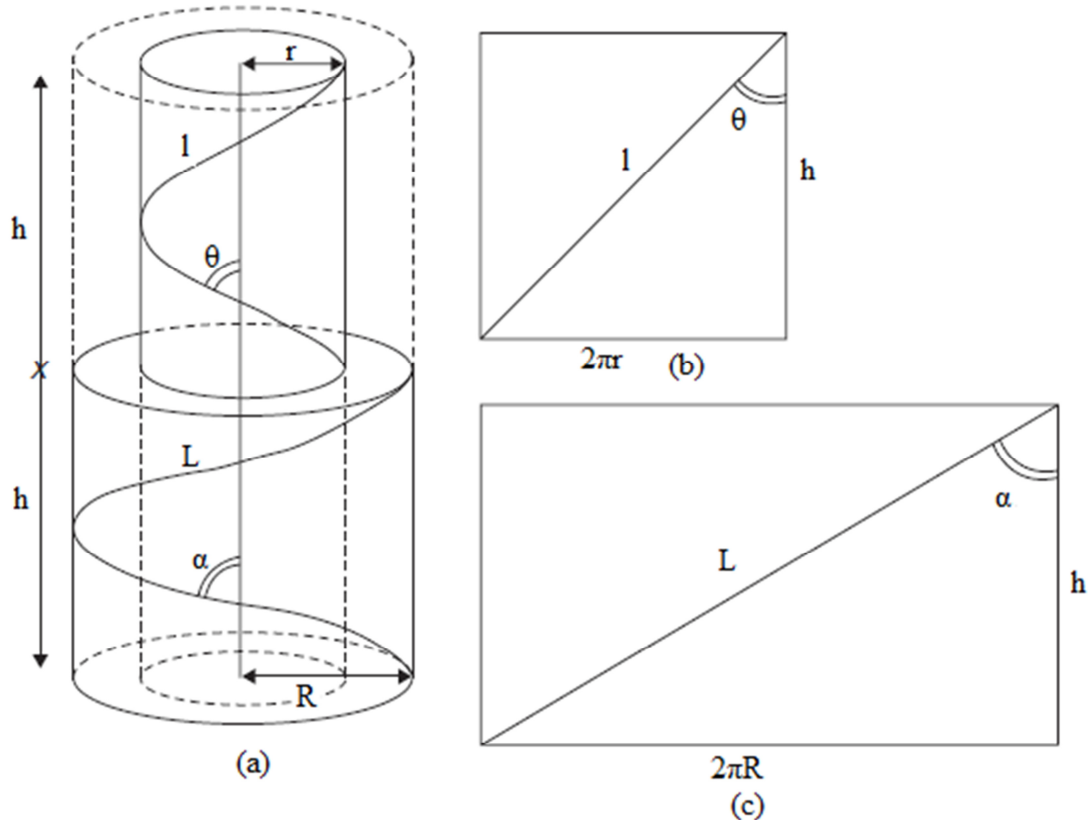


Abb. 1-16 (a) ideal verdrillte Garngeometrie; (b) und (c) Ausgerollte Oberflächenendiagramme [2, S. 149]

Tabelle 2: Werte für den Faktor $\frac{1}{\cos(\theta)}$ von θ [2, S. 144]

θ [°]	0	10	20	30	40	50
$\frac{1}{\cos(\theta)}$	1,000	1,015	1,064	1,155	1,305	1,556

Die Axialsteifigkeit eines Seiles ist gegeben durch die Querschnittsfläche A mal Elastizitätsmodul E . Aufgrund der Faserviskoelastizität und der Geometrieänderung bei Belastung sind die Steifigkeitswerte von der Vorgeschichte, also was mit dem Seil kurz davor passierte, und der aktuellen Belastung abhängig. Ein Seil, das vor seiner aktuellen Belastung belastet wurde, ist deutlich steifer und benötigt eine gewisse Zeit für die Relaxation. Abb. 1-17 zeigt eine typische Reaktion von Polyesterseilen [2, S. 144].

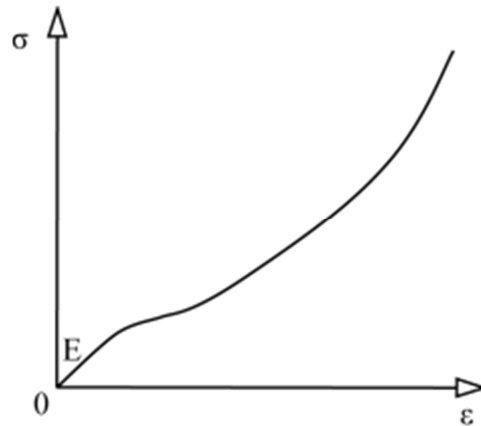


Abb. 1-17 Schematische Darstellung einer typischen Reaktion eines Polyesterseiles bei Belastung [2, S. 144]

Bei Seilen, deren Fasern unterbrochen sind, ist das Rutschen der Faserenden nicht zu vernachlässigen. Durch die verdrehte oder geflochtene Struktur greifen sie unter Belastung ineinander und es entstehen Querkkräfte an den Fasern, die sie aneinanderdrücken. Am Ende dieser Fasern ist die Querkraft, hervorgerufen durch Reibung, null, jedoch baut sich Spannung entlang der Faser durch den Rutschwiderstand auf, bis die Fasern vollen Grip haben und so die Belastung übertragen wird. In Abb. 1-18 wird der Effekt für ein einzelnes Garn deutlich gemacht. Bei hohem Drall wird die Spannung durch die Schrägstellung erheblich reduziert. Genau über dem kleinen Drall, siehe Abb. 1-18 (b), wird die Struktur instabil, da die Faser nirgendwo Grip hat. Das ist jene Grenze zwischen einer Fasergruppe, an der angezogen wird und Faser an Faser gleitet, oder Fasern aneinander haften.

An einem einzelnen Garn, das entlang einer Helix führt, ist alleine der Drall nicht ausreichend, um Grip von äußeren Schichten ins Innere zu übertragen. Bei einigen Spinnsystemen kann die radiale Position entlang der Faser geändert werden (= „Migration“), sodass alle Fasern miteinander greifen und besser in Kontakt stehen. Diese Migration ist bei Seilen jedoch nicht notwendig, da die Garne und Stränge aufgrund ihrer Struktur einen sicheren Grip der Fasern erzeugen. Da dieser Effekt hauptsächlich bei kurzen Naturfasern entsteht und heutzutage nahezu endlose Fasern entwickelt werden können, spielt dieser Effekt fast keine Rolle, da das Rutschen minimal ist [2, S. 146–147].

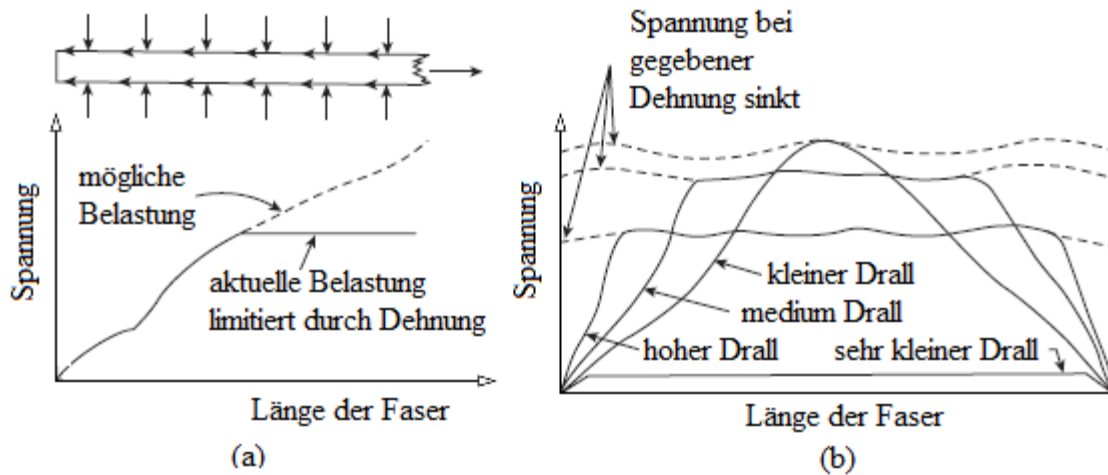


Abb. 1-18 einzelnes Garn (a) Spannung entlang einer griffigen Faser; (b) Effekt des Dralls [5] [2, S. 146]

1.5.2 Spannung, Torsion, Dehnung und Drall

Dieses Kapitel befasst sich mit der Betrachtung von Zug- und Torsionsverhältnissen von synthetischen Endlosseilen. Auch wenn nicht absichtlich eine Torsionsspannung aufgebracht wird, so entsteht durch die geometrische Struktur bei Zugbelastung automatisch ein Drehmoment, welches ein Verdrillen des Seiles hervorruft. Das Verdrehen, oder auch Aufdrehen, steht in direkter Wirkung mit der Spannung zur Dehnung des Seiles. Somit stehen die Spannung, das Drehmoment, die Dehnung und die Verdrillung unmittelbar in Wechselwirkung miteinander. Obwohl einige Analysen der Mechanik für Fasergruppen auf ein Gleichgewicht der Kräfte schließen lassen, haben sich Energiebetrachtungen bewährt. Anhand eines einzelnen verdrillten Garns werden folgende Überlegungen angesetzt. Für eine anziehende Kraft P_L mit einem Längeninkrement dL_L ergibt sich die Faserdehnungsenergie ΣdU_f [2, S. 148].

$$\Sigma dU_f = P_L * dL_L \quad (6)$$

Ist die Faserlast P_f von der Faserlänge L_f abhängig, so ergibt sich für die Last eine Funktion abhängig von der Länge $P_f = f(L_f)$. Daraus folgt eine Trennung des Fasereigenschaftsterms und des geometrischen Terms zu: [2, S. 148]

$$P_L = \Sigma \left(\frac{\partial U_f}{\partial L_f} * \frac{\partial L_f}{\partial L_L} \right) = \Sigma P_f * \frac{\partial L_f}{\partial L_L} \quad (7)$$

Bildet man nun die Summe über die Elemente der Fasermasse m_f , kann die Gleichung der faserspezifischen Spannung σ_f mit der Faserdehnung ε_f und Garndehnung ε_L abgeleitet werden, siehe Gl. (8) [2, S. 148].

$$\sigma_f = \frac{\Sigma m_f * \sigma_f * \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial \varepsilon_L}}{\Sigma m_f} \quad (8)$$

Diese Anwendung eines einzelnen verdrehten Garns ist von Hearle und Konopasek [6] angegeben worden. Die ideale Geometrie ist in Abb. 1-16 (a) zu sehen, wobei jeder Faden einer Helix mit konstanter Steigung h und Radius r folgt, mit dem Helixwinkel θ , steigend von null bei $r = 0$ zu α bei $r = R$. Bei einer Umdrehung ist die Fadenlänge l , bzw. L an der Oberfläche. Bei einer Kombination von Verlängerung und Verdrehung, siehe Abb. 1-19, bei einer Belastung von Zug, müssen Gl. (7) und Gl. (8) um eine Last P_L und ein Drehmoment M_L mit einem Längeninkrement dL_L und einer Rotation von $d\Phi_L$ erweitert werden. Die verrichtete Arbeit $P_L * dL_L + M_L * d\Phi_L$ muss gleich der Dehnungsenergie ΣdU_f sein. Durch partielles Ableiten können die Terme für Spannung und Drehmoment separiert werden. Durch Normalisieren der Gl. (8) und Integration über den gesamten Garnquerschnitt ergeben sich der spezifische Spannungsterm σ_{Garn} nach Gl. (9) und spezifische Torsionsterm M_{Garn} nach Gl. (10) mit der Faserdehnung ε_f und der Verdrehung T , der Spannungsdehnungskurve der Faser $\sigma_f = f(\varepsilon_f)$ [2, S. 148–149].

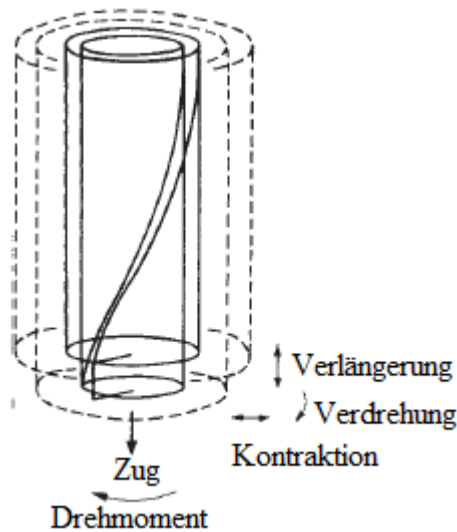


Abb. 1-19 Kombinierte Verlängerung und Verdrehung [6] [2, S. 149]

$$\sigma_{Garn} = 2 * \int_0^l \sigma_f * \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial \varepsilon_L} * x \, dx \quad (9)$$

$$M_{Garn} = 2 * \int_0^l \sigma_f * \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial T} * x \, dx \quad (10)$$

Um die Faserdehnung ε_f zu bestimmen, müssen folgende vier Aspekte betrachtet werden: die Garndehnung ε_L , die Querkontraktion definiert durch die Poissonzahl ν , die Verdrehung von

einem Startwert T_0 bis Endwert T als Längeneinheit und die korrekte Form für große Belastungen, was zu Gl. (11) führt [2, S. 150].

$$(1 + \varepsilon_f)^2 = (1 + \varepsilon_L)^2 * \cos^2(\theta_0) + [1 - \nu * \varepsilon_L * \left(1 + \frac{T}{T_0}\right) + \frac{T}{T_0}]^2 \quad (11)$$

Hearle und Konopasek [6] haben herausgefunden, dass die Analysen ohne Verdrehung T auskommen, wenn die ideale Helixgeometrie (wie in Abb. 1-16 (a)) für Seile nicht anwendbar ist. Der Winkel θ wird als jener Winkel zwischen der Faserachse und der Seilachse herangezogen. Daraus ergeben sich die finalen Gleichungen nach Gl. (12) bis Gl. (14). Die Summe Σ_c geht über alle linearen Dichteelemente ∂c_0 im Ausgangszustand des Seiles mit einer linearen Dichte c_0 [2, S. 150].

$$\sigma_L = \Sigma_c \sigma_f * \frac{\frac{\partial \varepsilon_f}{\partial \varepsilon_L} * \partial c_0}{c_0} \quad (12)$$

$$\sigma_f = f_{(\varepsilon_f)}, \text{ Spannungsdehnungskurve der Faser} \quad (13)$$

$$(1 + \varepsilon_f)^2 = (1 + \varepsilon_L)^2 * \cos^2(\theta) + [1 - \nu * \varepsilon_L]^2 * \sin^2(\theta) \quad (14)$$

Um nun Berechnungen für ein halbstatistisches Kernmantelseil anzustellen, arbeitet man sich von der kleinsten Schicht in die nächsthöhere. Also von Textilgarn zu Garn, zum Teilseil bis schlussendlich das Seil an sich beschrieben wird. Durch den immer größer werdenden Geometrieaufbau gibt es unterschiedliche Moden im ganzen Seil. Also Arten, wie sich die Garne untereinander verhalten. Diese Moden sind in Abb. 1-20 schematisch dargestellt. Mode 1 und 2 entstehen durch axiale Verschiebung der Komponenten aufgrund der Dehnung und Verdrehung. Mode 3 beschreibt rotationsbedingtes Rutschen an der Oberfläche. Mode 4 und 5 beschreiben Überschneiden und Scheren. Mode 6 beschreibt die Querschnittsdeformation aufgrund von Kompression [2, S. 153–154].

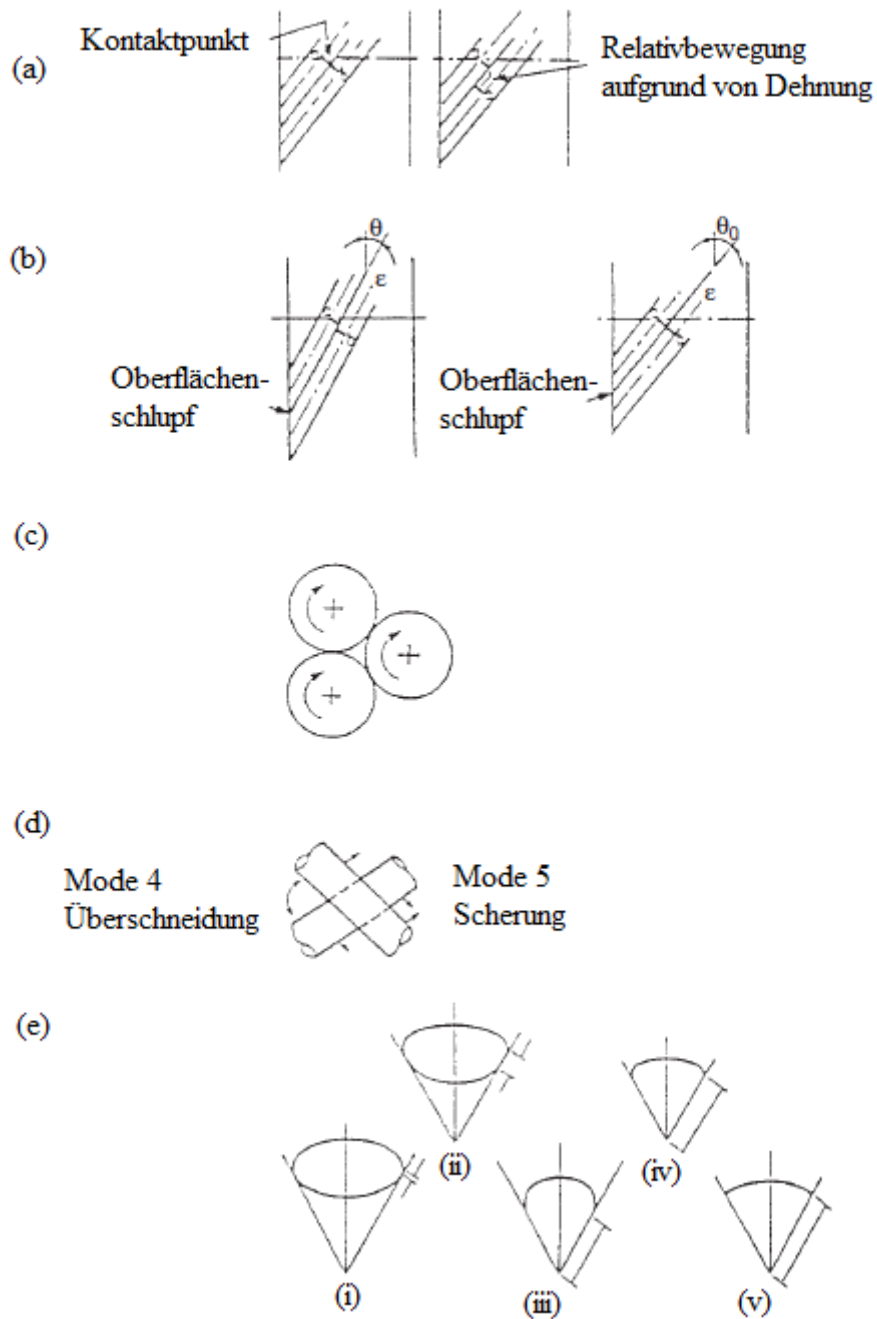


Abb. 1-20 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Moden. (a) Mode 1 und (b) Mode 2 aufgrund axialer Verschiebung; (c) Mode 3 Rotation; (d) Mode 4 und Mode 5 Überschneidung der Geometrie; (e) Mode 6 Querschnittsdeformation [7, S. 372] [2, S. 155]

Grundlagen der Kernmantelseile

In Abb. 1-21 sieht man Belastungen eines Stranges, eines Teilseiles und eines Seiles von einem halbstatischen parallel Strang Seil aus Polyester. Wobei jene Linien bestehend aus Punkten die theoretischen Analysen sind, und jene Linien mit den Kreuzen den experimentellen Messungen entsprechen. Die spezifische Spannung wird in $\left[\frac{\text{N}}{\text{tex}}\right]$ angegeben, wobei $1 \text{ tex} = \frac{1\text{g}}{1000\text{m}}$ ist [2, S. 155].

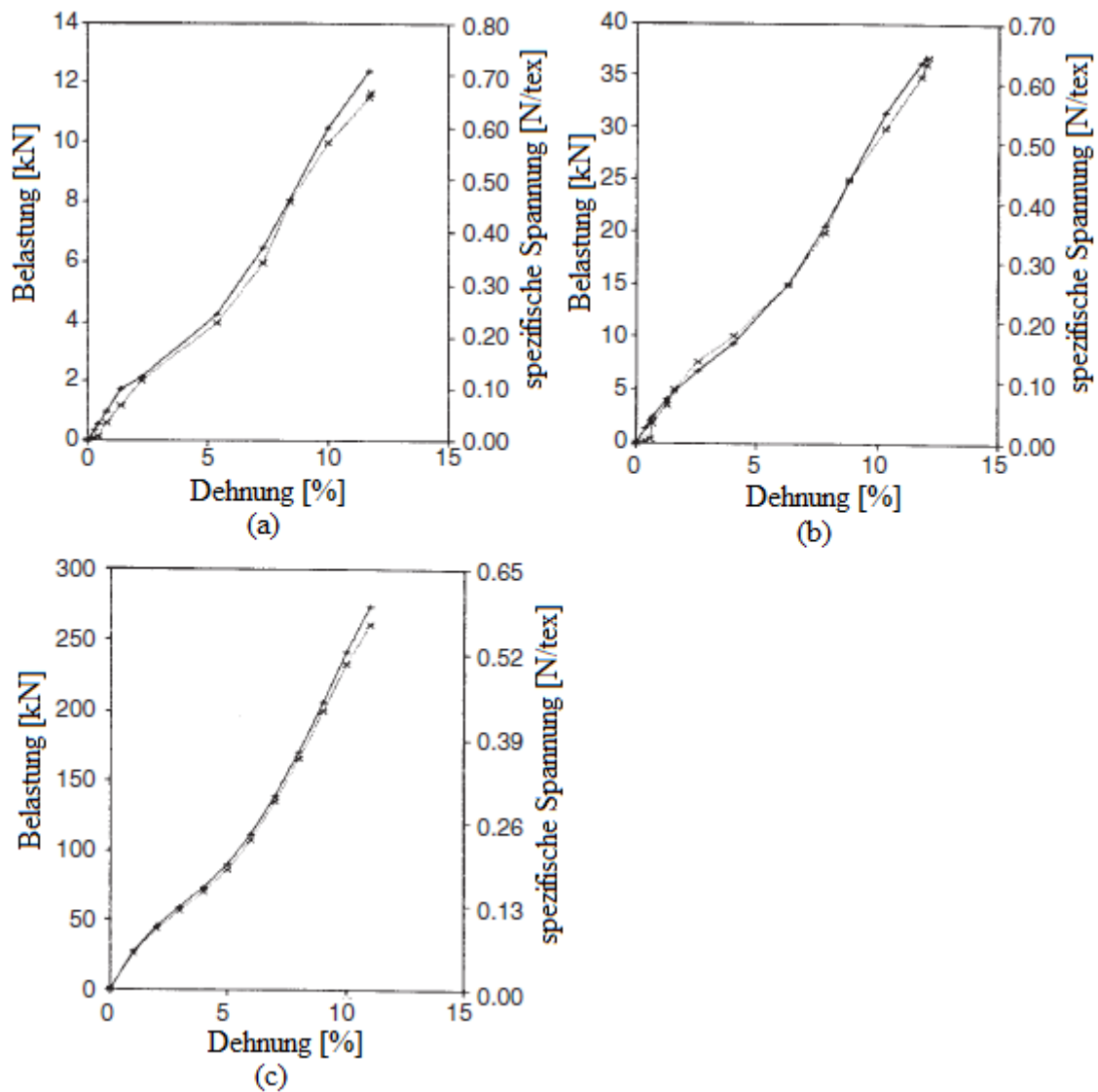


Abb. 1-21 Belastung-Dehnungskurve eines parallel Strang Seiles (a) Strang; (b) Teilseil; (c) Seil [7, S. 374] [2, S. 156]

1.5.3 Biegung

Die Biegesteifigkeit B eines Seiles basiert auf der Gl. (15), wobei E der Elastizitätsmodul und I das Trägheitsmoment um die Biegeachse ist.

$$B = E * I \quad (15)$$

Das Biegemoment M ist nach Gl. (16) zu berechnen, mit κ als Krümmung definiert, also der Kehrwert des Krümmungsradius.

$$M = B * \kappa \quad (16)$$

Die Biegesteifigkeit B muss für ein Seil zwischen zwei Grenzen liegen, nämlich jener, bei der die Seilkomponenten einen starken Zusammenhalt mit Biegesteifigkeit B_s bilden, und so das Seil als Festkörper durchgehen würde und jener, bei der die Fasern sich selbstständig durchbiegen würden mit Biegesteifigkeit B_f . Für kreisrunde Querschnitte sind die Biegesteifigkeiten der Gl. (17) bis Gl. (19) zu entnehmen, mit D als Seildurchmesser, d als Durchmesser der Fasern und N als Anzahl an Fasern.

$$B_s = \frac{\pi * E * D^4}{64} \quad (17)$$

$$B_f = \frac{N * \pi * E * d^4}{64} \quad (18)$$

$$N = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (19)$$

Somit ist die Biegesteifigkeit vom steifsten bis hin zum flexibelsten Seil abhängig von der Anzahl an Fasern im Seil, bzw. nach Gl. (19). Die Faserdurchmesser betragen ca. 10 μm und der Seildurchmesser von halbstatischen Kernmantelseilen reicht von 8 mm bis 13 mm. Das ergibt ein Verhältnis N von ca. $6 * 10^5$ bis $2 * 10^6$. Daraus folgt ein Seil, das man horizontal ohne eine Durchbiegung in dieser Position halten kann oder eines, das sich mit vernachlässigbarem Widerstand durchbiegt. Es gilt, ein optimales Verhältnis davon zu finden. Biegt man ein Seil, so stehen die Komponenten auf der Außenseite des Seiles unter Zug und die Innenseite unter Druck. Das Rutschen der Fasern, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, reduziert diese Spannungen und reduziert somit die Biegesteifigkeit. In Abb. 1-22 sieht man anhand der Pfeile diese Kräfte [2, S. 160–161].

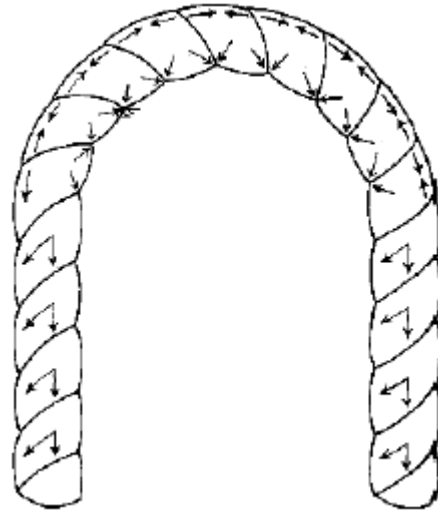


Abb. 1-22 Kräfte an einem gebogenen Seil [8] [2, S. 161]

In Abb. 1-23 ist die Biegung eines Drahtseiles zu sehen. Dabei können die einzelnen Litzen als Garne und das Drahtseil als ein Strang des halbstatistischen Kernmantelseiles im Kern verglichen werden. Die Biegespannung setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Erstere ist jene Biegung des Garnes um seine eigene Mittelachse. Die maximale Biegedehnung $\varepsilon_{b,L}$ tritt an der Garnoberfläche auf und kann nach der sogenannten „Reuleaux-Gleichung“ [9] abgeschätzt werden [3, S. 173], siehe Gl. (20). Dabei ist $\delta_{d,L}$ der Garndurchmesser der Lage L und ρ der Krümmungsradius der Mittelachse des Garnes.

$$\varepsilon_{b,L} = \frac{\delta_{d,L}}{2 \cdot \rho} \quad (20)$$

Liegt die Mittelachse des Garnes nicht auf der Strangachse, so entsteht eine zusätzliche Biegedehnung $\varepsilon_{zus,L}$ mit dem Normalabstand $h_{d,L}$ in der Vertikalen zur Strangachse, siehe Abb. 1-24.

$$\varepsilon_{zus,L} = \frac{h_{d,L}}{\rho} \quad (21)$$

$$h_{d,L} = \frac{d_L \cdot \sin(\varphi)}{2} \quad (22)$$

Die dementsprechenden Biegespannungen sind Gl. (23) und Gl. (24) zu entnehmen, mit $E_{d,L}$ als Elastizitätsmodul des Garnes. Diese Gleichungen gelten vorerst nur für nicht verdrillte Stränge, also mit Helixwinkel $\beta_L = 0$ [10, S. 14–15].

$$\sigma_{b,L} = E_{d,L} \cdot \frac{\delta_{d,L}}{2 \cdot \rho} \quad (23)$$

$$\sigma_{zus,L} = E_{d,L} \cdot \frac{d_L \cdot \sin(\varphi)}{2 \cdot \rho} \quad (24)$$

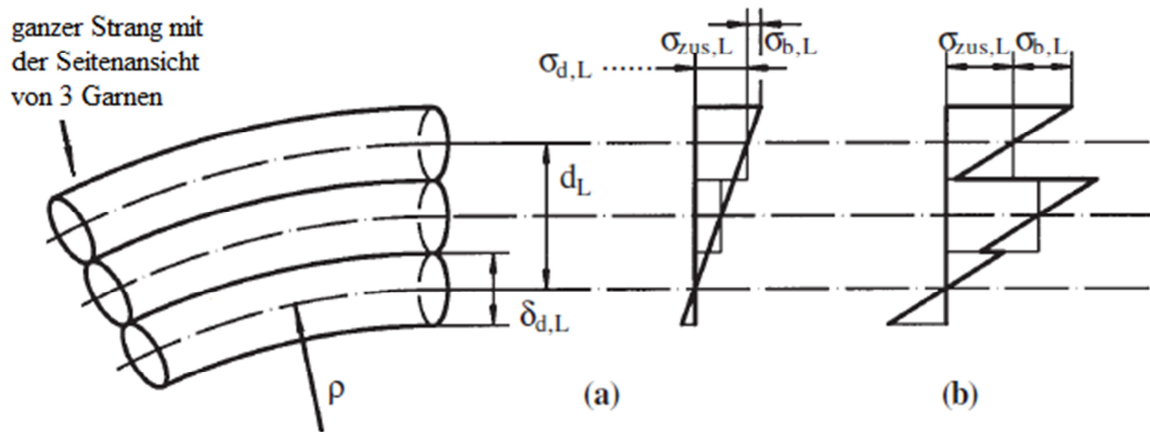


Abb. 1-23 Strangspannungen bei der Biegung eines Stranges ohne verdrehte Garne; (a) Garne unverschoben; (b) Garne verschoben [10, S. 15]

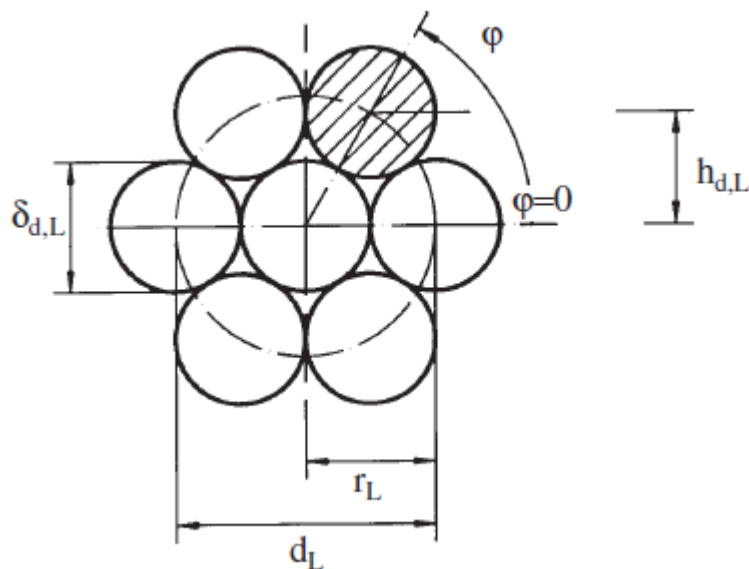


Abb. 1-24 Geometrie des Strangquerschnittes [10, S. 16]

Um nun die Biegespannungen für verdrehte Stränge berechnen zu können, muss zuerst ein Faktor errechnet werden, um die obigen Gleichungen damit anzupassen. Die Garndehnung $\varepsilon_{d,L}$ ist bei verdrehten Garnen um den Faktor $\cos^2(\beta_L)$ kleiner als die Dehnung des Stranges ε_s und lässt sich nach Gl. (25) und mithilfe der Abb. 1-25 berechnen [10, S. 10].

$$\varepsilon_{d,L} = \frac{\Delta l_{d,L}}{l_{d,L}} = \frac{\Delta l_s}{l_s} * \cos^2(\beta_L) = \varepsilon_s * \cos^2(\beta_L) \quad (25)$$

Dementsprechend wird die zusätzliche Biegespannung um den Faktor erweitert, siehe Gl. (26). [10, S. 16]

$$\sigma_{zus,L} = E_{d,L} * \frac{d_L * \sin(\varphi) * \cos^2(\beta_L)}{2 * \rho} \quad (26)$$

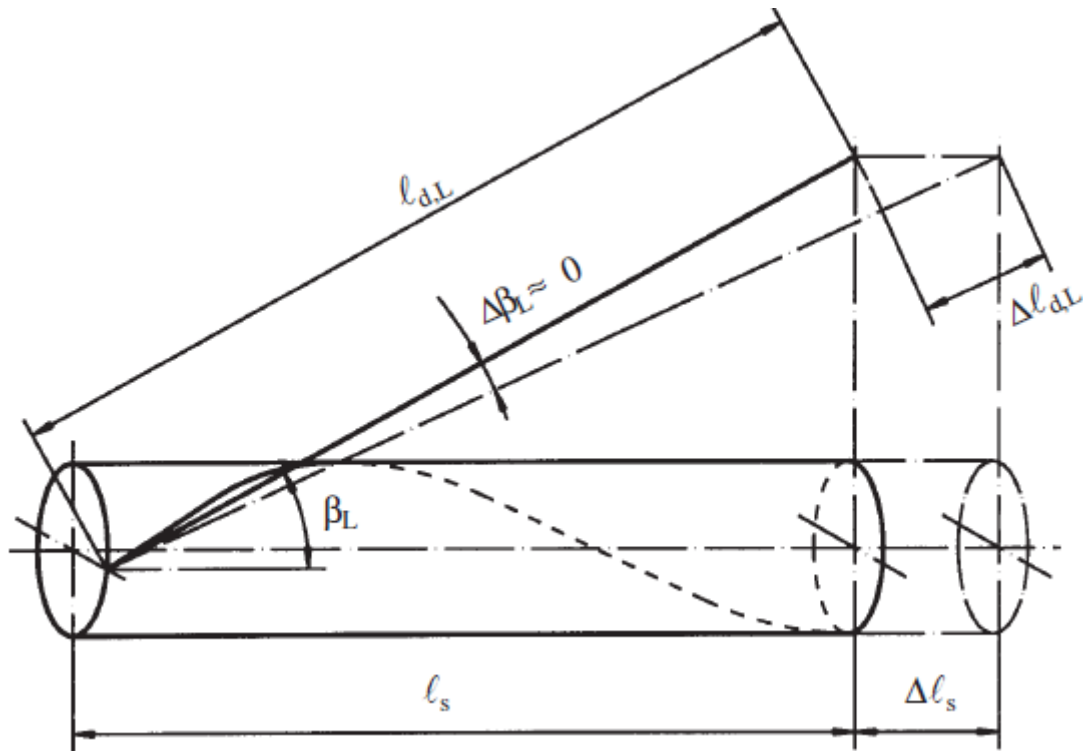


Abb. 1-25 Strang als Ganzes und Garn (strichliert) [10, S. 10]

Da diese Berechnungen nun lediglich für einen Strang gelten, erkennt man, dass die Berechnungen für den gesamten Kern noch komplexer zu behandeln sind. Die weitere Vorgehensweise wäre, dass jeder Strang im Kern als einzelnes betrachtet wird, um so mögliche Spannungen zu erhalten und durch Superpositionierung ein gesamter Spannungsverlauf entsteht.

2 Modellierung

Wie in dem vorherigen Kapitel zu sehen ist, besteht der Kern aus mehreren parallel liegenden Teilseilen, die auch Stränge genannt werden. Betrachtet man einen Strang genauer, so erkennt man, dass die Garne untereinander in Kontakt stehen. Dies ergibt sich aus dem Herstellprozess des Seiles. Die Garne werden beim Verweben ständig unter Zug gehalten, um eine kompakte und füllende Geometrie bei gleicher Querschnittsfläche zu erhalten. Dieser Aufbau wird nachfolgend schrittweise beschrieben. Der Geometrieaufbau in diesem Modell weicht allerdings stark vom realen Herstellprozess eines geflochtenen Seiles ab. Aufgebaut wurde die Geometrie in dem CAD-Programm CATIA. Die Simulation fand unter Zuhilfenahme der Programmiersprache PYTHON mit dem Programm ABAQUS/CAE statt. In dieser Arbeit wurden halbstatistische Kernmantelseile mit den folgenden Geometrieparametern betrachtet, die Tabelle 3 entnommen werden können.

Tabelle 3: Randbedingungen für die Geometrie

Länge des Seilstücks	18,26 mm
Ø Mantel	12 mm
Ø Kern	10 mm
Zykluslänge Mantel	33 mm
Schlaglänge Kern	9,9 mm
Ø Mantelgarn	1 mm
Mantelgarne	40 Stk.
Stränge im Kern 1.Lage	3 Stk.
Stränge im Kern 2.Lage	9 Stk.
Garne je Kernstrang	3 Stk.

Die Schlaglänge des Kernstrangs bzw. die Zykluslänge des Mantelgarne ist eine volle Umdrehung der Geometrie um 360°, siehe Abb. 2-1 und Abb. 2-2.

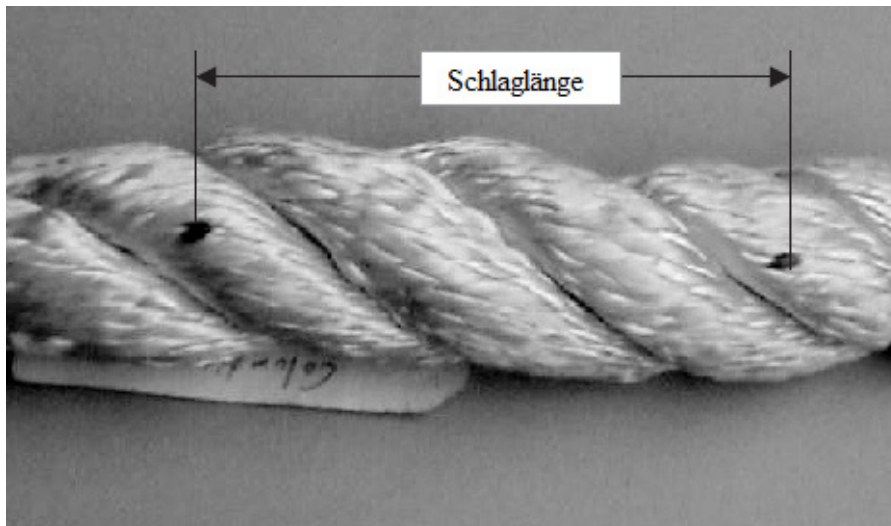


Abb. 2-1 Schlaglänge eines Seils mit 3 Strängen [2, S. 319]

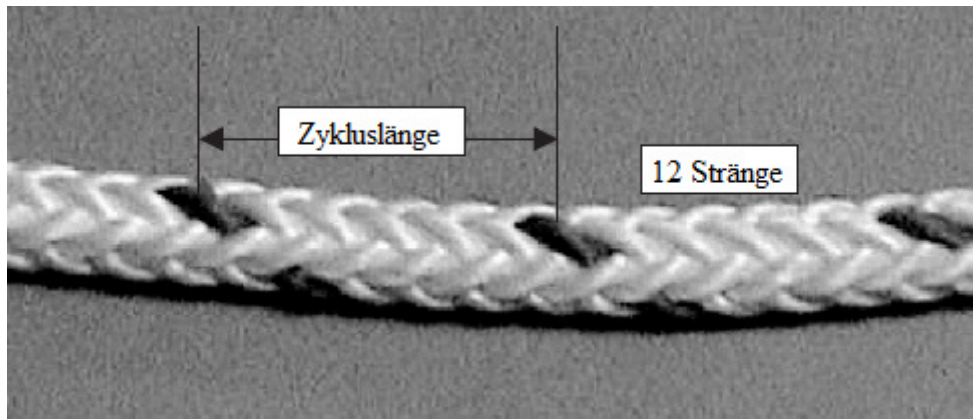


Abb. 2-2 Zykluslänge an einem 12-Strang geflochtenen Seilmantel [2, S. 319]

2.1 Problematik / Übersicht

Die generelle Problematik an der Modellierung von textilen Seilen ist, dass der Querschnitt aller einzelnen nebeneinander liegenden Garne eine Art Hexagon aufweist und nicht wie bei Stahlseilen einen runden Querschnitt besitzt, siehe Abb. 2-3. Weiters weist jedes Garn aus der Produktion einer vorherigen Stufe einen gleich großen Garnquerschnitt auf, was wiederum bedeutet, dass der Flächeninhalt jedes einzelnen Stranges gleich ist. Eine Möglichkeit des Geometrieaufbaus wäre gewesen, jedes Garn aus seinen Textilgarnen bzw. sogar aus deren Fasern zu erzeugen. Dies würde eine enorme Rechenzeit mit sich bringen und ist dahingehend sofort verworfen worden. Somit wurden Textilgarne aufgrund des umfangreichen Aufwands für die Simulation und Entwicklung eines geeigneten Modelles nicht berücksichtigt.

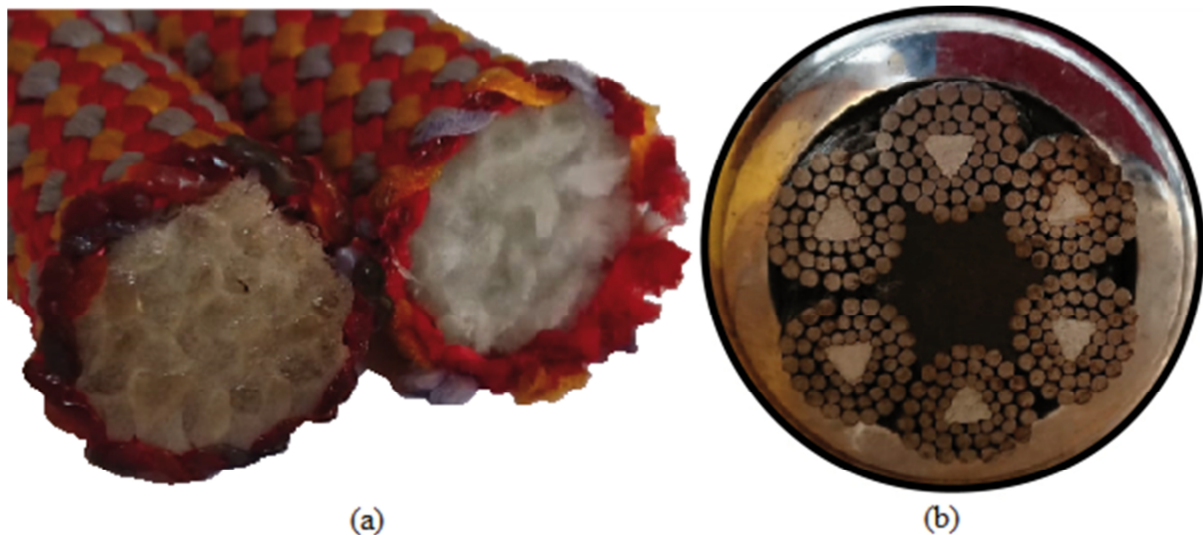


Abb. 2-3 Querschnitt eines (a) halbstatisches Kernmantelseils (b) Stahlseils

Unter den zuvor erwähnten Voraussetzungen ist es zwar möglich, eine fertige Garangeometrie im CAD-Programm zu erzeugen, siehe Abb. 2-4, jedoch führt diese Methode zu einigen Ungenauigkeiten, die nachfolgend beschrieben werden. In Abb. 2-4 (a) sieht man die einzelnen Stränge mit deren Flächenschwerpunkten. Die Garne des jeweiligen Stranges sind um den jeweiligen Flächenschwerpunkt verdreht. Das Vernetzen dieser Garangeometrie im Simulationsprogramm ABAQUS ist jedoch lediglich durch ein „Bottom-up“ Netz bzw. durch Tetraederelemente möglich, was beides nicht erwünscht ist. Der „Bottom-up“ Algorithmus ist eher umständlich in seiner Bedienung und daher mühsam für solch komplexe Geometrien. Tetraederelemente werden später noch genauer erläutert, und somit wird beschrieben, warum es besser ist, Hexaederelemente zu verwenden.

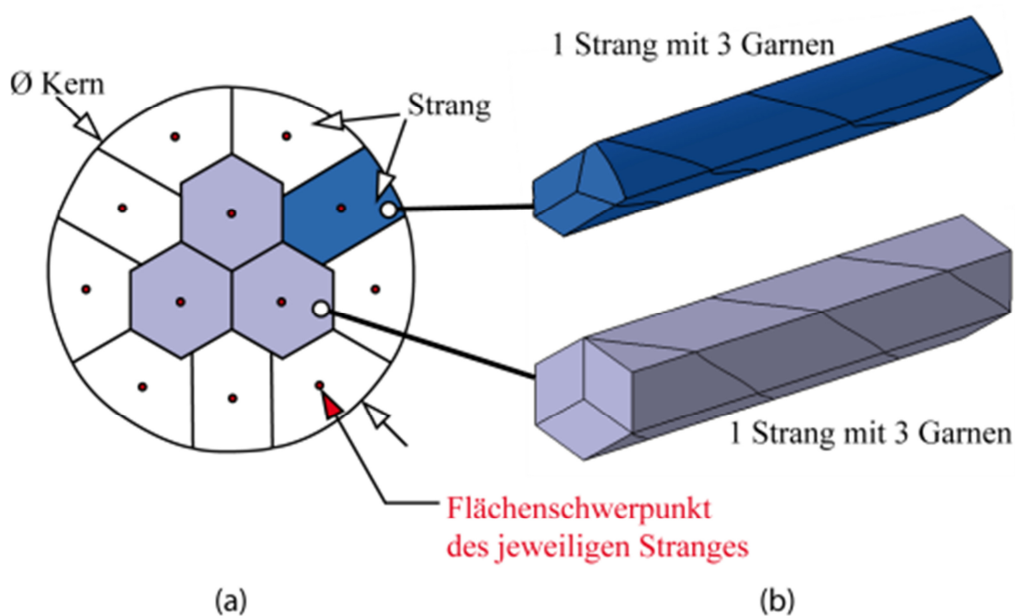


Abb. 2-4 (a) Schematische 2D Darstellung des Kerns mit den einzelnen Strängen; (b) 3D Ansicht zweier Stränge

Modellierung

Es wird eine Ausgangsgeometrie erzeugt, in der die Garne sich linienförmig kontaktieren und dann mit einem plastischen Materialgesetz komprimiert werden. Die plastisch verformte Geometrie wird für weitere Schritte verwendet. In der nachfolgenden Abbildung, siehe Abb. 2-5, sieht man eine Übersicht des Geometrieaufbaus, der anschließend der Reihe nach erläutert wird.

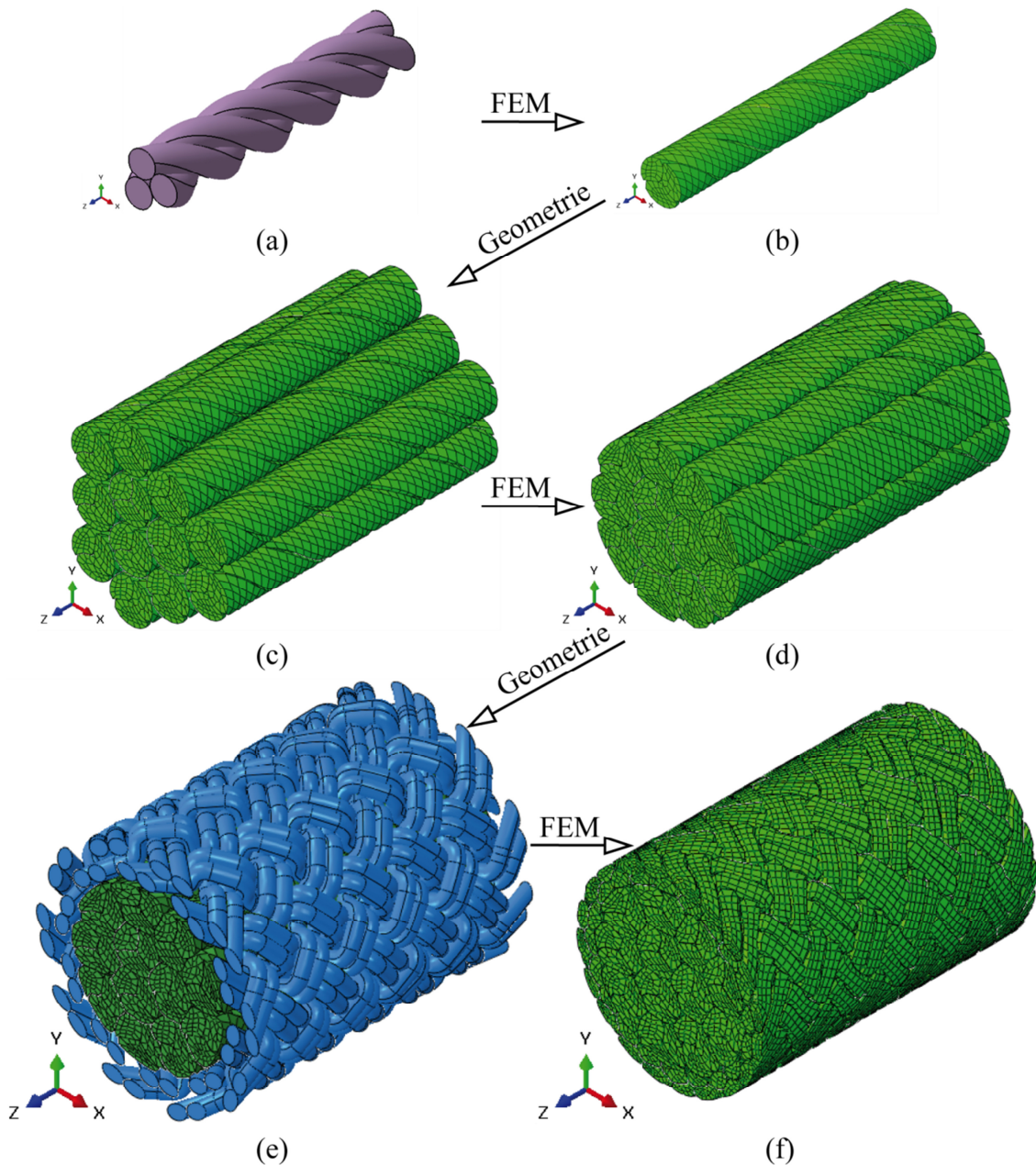


Abb. 2-5 Übersicht des Geometrieaufbaus; (a) Ausgangsgeometrie-Strang bestehend aus 3 Garnen, konstruiert mit einem CAD Programm; (b) Simulationsergebnis Komprimieren eines Stranges bestehend aus 3 Garnen; (c) 12 nebeneinander angeordnete Stränge; (d) Simulationsergebnis Komprimieren des Kerns bestehend aus 12 Strängen; (e) Kern (grün) mit verflochtenen Mantelgarnen aus dem CAD Programm (blau); (f) Simulationsergebnis Komprimieren des Seilstücks und fertiger Geometrieaufbau

Mithilfe des CAD Programmes wurden 3 verdrehte Garne mit kreisrunden Querschnitten und einer Schlaglänge konstruiert, die einen Strang bilden, siehe Abb. 2-5 (a). Diese Garne weisen

nur einen Linienkontakt zueinander auf und haben Hohlräume zwischen den einzelnen Garnen. Ziel ist es, die Garne vollständig in Kontakt treten zu lassen, damit die Seilgeometrie einen vollen Querschnitt aufweist. Die 3 Garne wurden mithilfe einer Simulation radial zusammengestaucht, siehe Abb. 2-5 (b). Dadurch stehen die 3 Garne (ein Strang) in vollständigem Kontakt zueinander. Dieser Strang wird 12-mal nebeneinander angeordnet und bildet dadurch die Ausgangsgeometrie für die nächste Simulation, in der der Kern erzeugt wird, siehe Abb. 2-5 (c). Diese Geometrie weist Hohlräume zwischen den Strängen auf, weshalb die Geometrie erneut radial gestaucht wird, siehe Abb. 2-5 (d). Die Geometrie des Kerns eines halbstatistischen Kernmantelseiles ist somit erstellt. Der Mantel konnte mithilfe des CAD Programms erzeugt werden und wurde über den Kern des Seiles gelegt, siehe Abb. 2-5 (e). Der Mantel (blau) besteht aus mehreren kreisrunden Mantelgarnen, die ineinander verflochten sind. Um die Mantelgarne untereinander in vollständigen Kontakt zu bringen, wurde der Mantel auf den Kern radial gestaucht, was zu der fertigen Geometrie des Seilstücks führt, siehe Abb. 2-5 (f). Durch diese Schritte stehen alle Garne des Kerns und alle Mantelgarne in annähernd vollständigem Kontakt zueinander und es befindet sich durch das Stauchen kein Hohlraum zwischen den einzelnen Garnen.

Für die Belastungsaufbringung wurde ein dynamisch expliziter „Step“ gewählt, in dem die gesamte radiale Stauchung von allen Seiten gleichzeitig durchgeführt wird. Grundsätzlich gilt es bei dynamischen Modellen die Bewegungsgleichung, siehe Gl. (27), zu lösen. Dies erfolgt in der Finite-Elemente-Methode stets numerisch mithilfe der Integration im Zeitbereich nach Lagrange. Dabei wird angenommen, dass die Knotenverschiebungen (U, \dot{U}, \ddot{U}) zum Zeitpunkt t bekannt sind und für einen späteren Zeitpunkt $t + \Delta t$ gesucht sind [11, S. 238].

$$\mathbf{M} * \ddot{U} + \mathbf{D} * \dot{U} + \mathbf{K} * U = P \quad (27)$$

Dabei ist \mathbf{M} die Massenmatrix, \mathbf{D} die Dämpfungsmatrix, \mathbf{K} die Steifigkeitsmatrix und P der Vektor der externen Kräfte des Systems.

Bei expliziten Verfahren wird der Zustand zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ alleine auf Basis des dynamischen Gleichgewichts zum Zeitpunkt t (Euler'sche Betrachtungsweise) dargestellt [11, S. 239].

Bei impliziten Verfahren wird der Zustand auf Basis des dynamischen Gleichgewichts zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ unter Nutzung von Iterationen über alle Zeitschritte dargestellt [11, S. 239].

Modellierung

Explizite Verfahren weisen im Vergleich zum impliziten dynamischen Verfahren ein stabileres Lösen der Bewegungsgleichung mit fixen Zeitschritten auf, haben jedoch eine Stabilitätsgrenze. Diese ist durch die Zeitdauer Δt der einzelnen Zeitinkremente definiert, die eine elastische Spannungswelle durch das kleinste finite Element benötigt, und als „stabiles Zeitinkrement“ bezeichnet wird. Implizite Verfahren benötigen eine solche Grenze nicht, weshalb auch die Bewegungsgleichung zu jedem Zeitschritt berechnet wird und eine Konvergenz erreicht werden muss. Dies kann bei mehreren Iterationen zu einem enormen Berechnungsaufwand führen und konvergiert nicht immer [11, S. 239].

Das stabile Zeitinkrement kann in seiner allgemeinen Form ohne Dämpfung nach Gl. (28) und mit Dämpfung nach Gl. (29) berechnet werden; mit ω_{max} als maximale Eigenfrequenz und ξ_{max} als Lehr'sches Dämpfungsmaß.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (28)$$

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} * (\sqrt{1 + \xi_{max}^2} - \xi_{max}) \quad (29)$$

Eine Abschätzung des stabilen Inkrements kann durch Gl. (30) erfolgen, wobei L_{min} die kürzeste Distanz zweier Knoten des kleinsten Elementes ist und c die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in einem homogenen Werkstoff.

$$\Delta t \approx \frac{L_{min}}{c} \quad (30)$$

Für Stab- und Balkenstrukturen ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit $c_{Stab,Balken}$ mit E als Elastizitätsmodul und ρ für die Dichte des Werkstoffes, nach Gl. (31) zu errechnen.

$$c_{Stab,Balken} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (31)$$

Die Abschätzung nach Gl. (30) wird allgemein als CFL-Bedingung nach Courant, Friedrichs und Lewy bezeichnet und ist für die meisten Fälle keine hinreichend sichere Abschätzung. Deshalb wird das von Abaqus/Explizit gewählte stabile Zeitinkrement für ein zweidimensionales Modell um den Faktor zwischen

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \text{ und } 1 \quad (32)$$

und für ein dreidimensionales Modell zwischen

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \text{ und } 1 \quad (33)$$

kleiner als die Abschätzung sein [11, S. 243–246] [12, Kap. 6.3.3].

Modellierung

Um bei dynamischen Berechnungen die Rechenzeit möglichst klein zu halten, sollten möglichst große, bzw. gleich große Elemente verwendet werden. Ist es erforderlich, lokal kleinere Elemente zu verwenden, um beispielsweise die Ergebnisse in einem Bereich besser abbilden zu können, so kann unter Zuhilfenahme der Massenskalierung die Rechenzeit verkürzt werden. Damit wird eine fiktive Erhöhung der Dichte der kleineren Elemente bewerkstelligt [11, S. 246].

Die Gesamtzeit T durch die Zeitdauer Δt ergibt die Anzahl an Inkrementen n , die gerechnet werden müssen. Eine schnelle Lastaufbringung bedeutet kurze Ruhezeit mit einer hohen Dynamik im Modell. Eine langsame Lastaufbringung ergibt eine lange Rechenzeit mit wenig Dynamik im Modell. Die Zeitperiode (Step-Time) des dynamisch expliziten „Steps“ wurde mit 0,0001 s weitestgehend so groß wie möglich gehalten. Jedoch muss die Zeitschrittweite der Inkremente kleiner als das stabile Zeitinkrement des kleinsten Elementes sein, um keine instabile Lösung zu erhalten. Dies kann durch eine Energiebilanz kontrolliert werden. Beispielsweise würden bei einer instabilen Lösung Lösungsvariablen wie die Verschiebungsenergie mit zunehmender Amplitude schwingen. Auch die Gesamtenergiebilanz würde sich erheblich ändern. Bei nichtlinearen Problemen, wie bei großen Deformationen auf Strukturebene oder nichtlinearen Materialeigenschaften, ändert sich die Eigenfrequenz des gesamten Modells ständig, weshalb sich auch das stabile Zeitinkrement kontinuierlich verändert. Eine Zeitschrittweitenanpassung erfolgt standardmäßig automatisch, kann jedoch auch auf fixe Zeitschrittweiten eingestellt werden. In Abaqus/Explizit gibt es zwei Arten der Abschätzung der Zeitschrittweitenanpassung. Die Globale Methode und die Element-für-Element-Methode. Jede Analyse startet zuerst mit der Element-für-Element-Methode und wird unter gewissen Umständen auf die Globale Methode umgestellt. Die Element-für-Element-Methode ist sehr konservativ und erzeugt ein kleineres stabiles Zeitinkrement als das wahre stabile Zeitinkrement ist, welches auf der maximalen Eigenfrequenz ω_{max} des gesamten Modells basiert. Randbedingungen und kinematischer Kontakt haben den Effekt der Komprimierung des Eigenwertspektrums, was die Element-für-Element-Methode nicht berücksichtigt. Die Globale Methode berechnet in jedem Zeitschritt die maximale Eigenfrequenz ω_{max} neu und erlaubt höhere stabile Zeitinkremente als die Element-für-Element-Methode. Dadurch wird die benötigte Berechnungszeit für die gesamte Zeitperiode kürzer. Bei Verwendung der Globalen Methode überwacht Abaqus/Explizit die Effizienz des Algorithmus. Sind die Kosten zur Berechnung für den Globalen Algorithmus höher als der Nutzen, so wird die Globale Methode abgeschaltet und die Element-für-Element-Methode verwendet, um Berechnungszeit zu sparen. Bei gleichbleibendem stabilem

Modellierung

Zeitinkrement n kann die Simulation durch Verringerung der Anzahl an Zeitinkrementen, also durch Verkürzen der Zeitperiode T beschleunigt werden, siehe Abb. 2-6 [12, Kap.6.3.3].

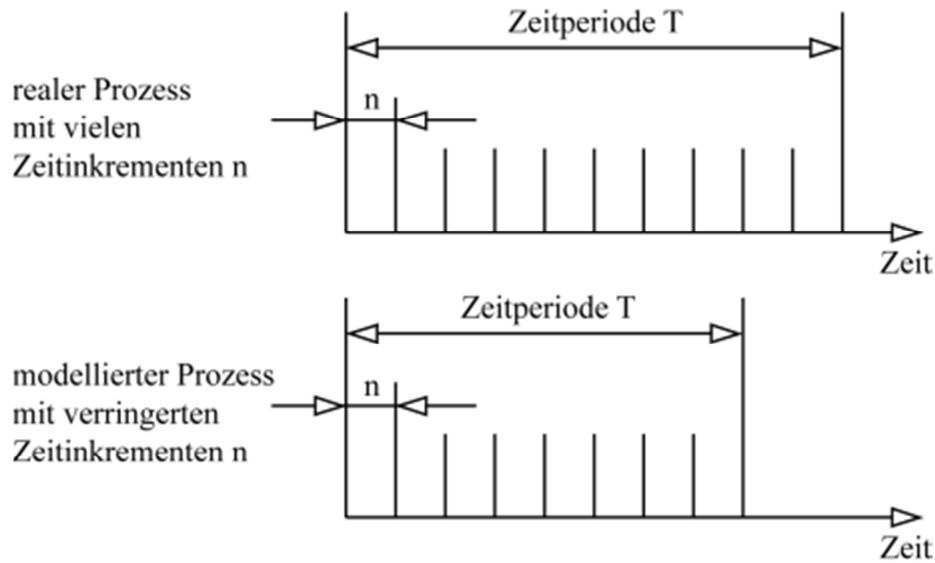


Abb. 2-6 Vergleich zweier Simulationen mit gleichem stabilem Zeitinkrement n und unterschiedlicher Anzahl an Inkrementen

Oft ist die Dynamik im Modell erwünscht, jedoch möchte man bei dieser Arbeit so wenig wie möglich dynamische Kräfte und Spannungen einbringen, um ein quasistatisches Modell zu erreichen. Dabei ist die Rechenzeit proportional der Zeitperiode T und proportional der Zeitinkremente n , die Belastung wird schneller aufgebracht. Daraus folgt, dass die Berechnungszeit verkürzt wird, was jedoch ein mögliches Problem mit sich bringt. Wenn die Belastungsgeschwindigkeit zu stark verkürzt wird, ändern die erhöhten Trägheitskräfte die vorhergesagte Reaktion des Modells. Die einzige Möglichkeit, diesen Fehler zu beheben, ist wieder die Erhöhung der Zeitperiode, um damit eine kleinere Beschleunigung (kleinere Trägheitskräfte) zu erreichen. [12, Kap. 6.3.3].

Hierfür wird die kinetische Energie und die Dehnungsenergie für das gesamte Modell über die Zeitperiode betrachtet, siehe Abb. 2-7. Die kinetische Energie ist bei der plastischen Verformung gering genug, um eine annähernd quasistatische Simulation mit einem dynamisch expliziten Modell zu erreichen. Somit sind dynamische Trägheitseffekte im Vergleich zu der Dehnungsenergie klein. Durch die Verwendung kleiner Zeitschrittinkremente mit den oben erklärten Methoden hat Abaqus/Explicit den Vorteil, dass die Lösung ohne Iterationen ablaufen kann und keine Tangentialsteifigkeitsmatrizen erzeugt werden müssen. [12, Kap. 6.3.3]

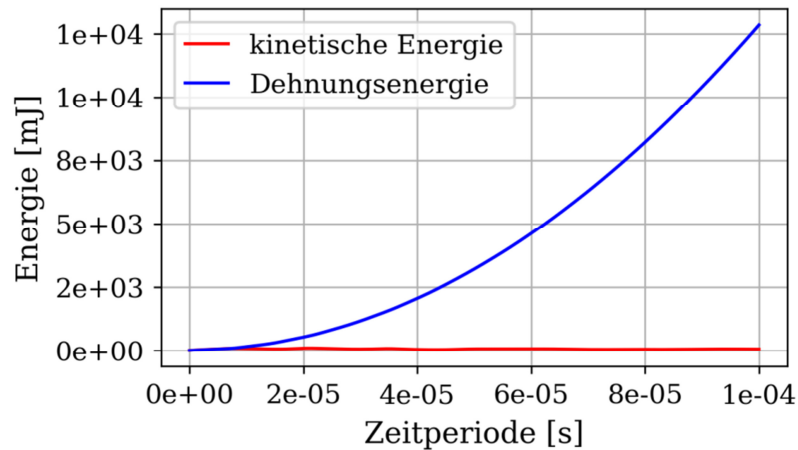


Abb. 2-7 Kinetische Energie und Dehnungsenergie über die Zeitperiode T für eine Zugbelastung mit der Seillänge $L=18,26$ mm

Für das Netz wurden C3D8R-Elemente gewählt und mithilfe von einem sogenannten „Sweep“-Algorithmus vernetzt. Diese Elemente bestehen aus einem linearen Quader und reduzierter Integration mit „hourglass control“ und weisen 8 Knoten und 6 Flächen auf, siehe Abb. 2-8.

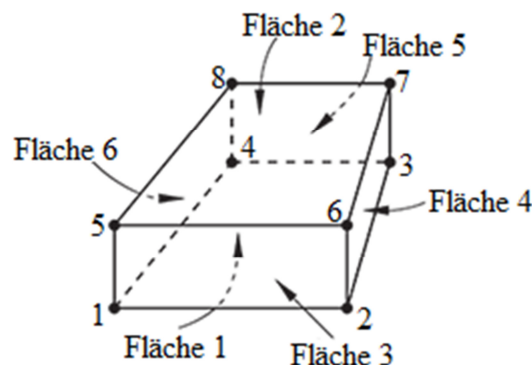


Abb. 2-8 C3D8R-Element [12 Kap.28.1.4]

Die reduzierte Integration wurde gewählt, da durch die Reduzierung der Integrationspunkte Berechnungszeit eingespart wird. Reduzierte Integration verwendet eine Integration niedrigerer Ordnung, um die Elementsteifigkeit zu berechnen. Für die Berechnung der Massenmatrix und der Belastungen wird trotzdem volle Integration verwendet. Das C3D8R-Element hat einen Integrationspunkt in der Mitte des Elements, wohingegen das C3D8-Element 8 Integrationspunkte besitzt. Somit ist ein voll zu integrierendes Element beim Aufstellen der Steifigkeitsmatrix vom Berechnungsaufwand ungefähr 3,5-mal teurer im Vergleich zur reduzierten Integration. An den Integrationspunkten werden Spannungen und Dehnungen berechnet. Bei Elementen erster Ordnung dieses Typs sorgt der Dehnungsoperator für eine konstante Volumendehnung im gesamten Element. Diese verhindert ein „Blockieren“ des Netzes, wenn das Materialverhalten annähernd inkompressibel ist. Elemente zweiter

Modellierung

Ordnung bieten eine höhere Genauigkeit, sofern keine starken Elementverzerrungen auftreten. Spannungskonzentrationen können damit effektiver abgebildet werden und eine gekrümmte Oberfläche erfordert weniger Elemente. Dreiecks- oder Tetraederelemente erster Ordnung sollten bei Spannungsanalysen weitestgehend vermieden werden, da sie zu steif sind und eine langsamere Konvergenz aufweisen. Werden diese trotzdem benötigt, so ist ein sehr feines Netz zu wählen, um Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit zu erhalten. Unter „hourglassing“ („Sanduhrbildung“) versteht man eine regelmäßige Verformung der Elemente, siehe Abb. 2-9 [11, S. 154] [12, Kap. 28.1.1].

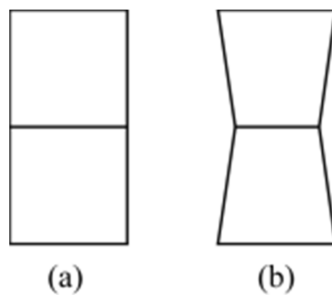


Abb. 2-9 (a) kein „hourglassing“; (b) „hourglassing“

Das Element hat durch die reduzierte Integration keine Möglichkeit, eine Verzerrung festzustellen. Es kann sich auf solch eine Art verformen, ohne dass sich die Energie ändert. Deswegen hat solch ein Element bei Verformung keine Steifigkeit und kann bei der Berechnung zu Problemen führen und wird als Null-Energie-Verformung bezeichnet. Hourglassing kann minimiert werden, indem Punktlasten oder Randbedingungen auf benachbarte Knoten verteilt werden. Vollintegrierte Elemente weisen kein hourglassing auf, können jedoch eine Art Scher- oder auch Volumenverriegelung aufweisen. Die Schersperre („shear locking“) tritt bei vollständiger Integration erster Ordnung auf, wenn die Elemente gebogen werden. Hier kommt es zum Auftreten von nicht wirklich existierenden Scherbeanspruchungen, weshalb diese Elemente bei Biegung zu steif wirken, siehe Abb. 2-10. Man erkennt, dass die Ecken nach der Belastung keine rechten Winkel mehr abbilden [11, S. 154] [12, Kap. 28.1.1].

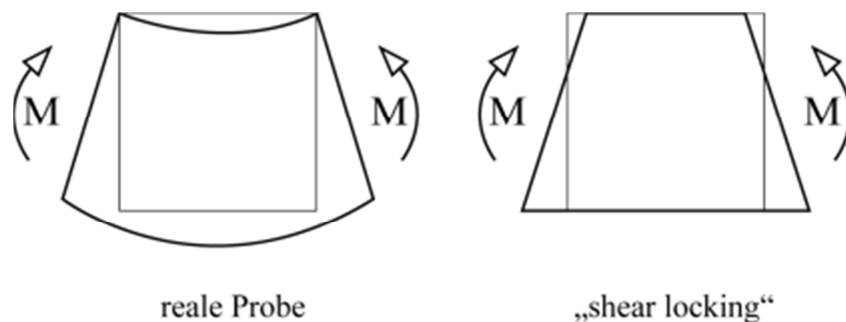


Abb. 2-10 Biegung eines vollintegrierten Elementes mit „shear locking“ Effekt

Modellierung

Volumenverriegelung tritt bei fast inkompressiblem Materialverhalten auf, wo Druckspannungen an den Integrationspunkten auftreten, die das Element ebenfalls zu steif wirken lassen [11, S. 154] [12, Kap. 28.1.1].

Um Hexaederelemente entlang einer Translation des Garns mit denselben Kreisabschnitten zu erhalten, wurde der „Sweep“-Algorithmus in Kombination mit Hexaederelementen verwendet, siehe Abb. 2-11. Mit Tetraederelementen ist eine komplexe Geometrie leichter zu vernetzen, jedoch ist die Integration über diese ungenauer und nach den schon erwähnten Gründen nicht zu bevorzugen.

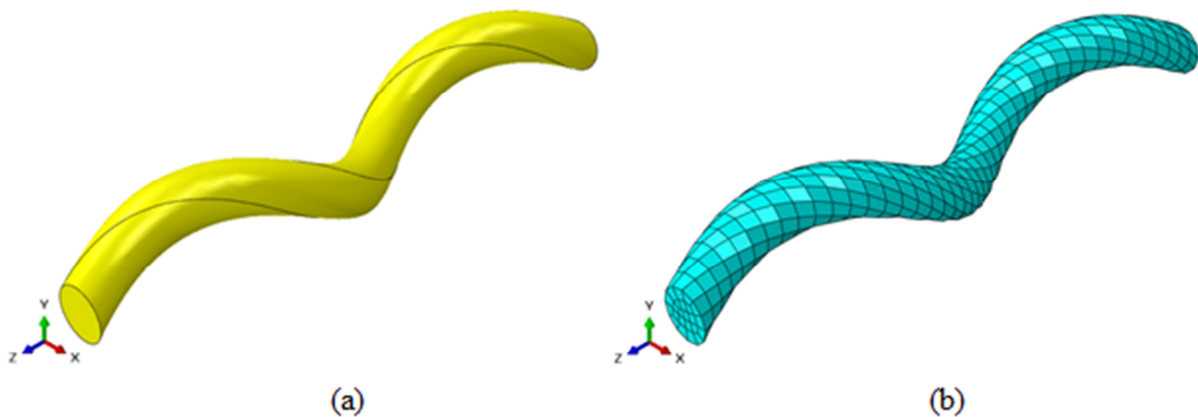


Abb. 2-11 (a) Sweep Algorithmus; (b) vernetztes Garn mit Hexaederelementen

Betrachtet man den Querschnitt dieses Garns an einer beliebigen Stelle, so ist dieser aufgrund der Skizzendefinition im CAD Programm kein exakter Kreisquerschnitt. Da die Steigung des verdrillten Garns relativ gering ist und drei Garne radial zu einem Strang gestaucht werden, ist diese Abweichung nicht relevant.

Für das Materialverhalten wurde ein PA 6 bzw. PA 66 [13, S. 61] gewählt. Die Materialparameter sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Materialparameter für den Geometrieaufbau [14, S. 537]

Dichte ρ	$1,14 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Elastizitätsmodul E	3000 MPa
Poissonzahl ν	0,49
plastische Materialparameter:	
Fließspannung:	0,1 und $25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
plastische Dehnung:	0 und 0,01 %

Die Fließspannung und die plastische Dehnung wurden tabular in Abaqus mit den Werten der Tabelle 4 eingegeben. Über einer Spannung σ von $25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ herrscht nur ideal plastisches

Modellierung

Verhalten. Die plastischen Materialparameter werden nur bei der Geometrieerzeugung verwendet. Das Verhältnis von Längsdehnung und Querdehnung wird als Poissonzahl oder Querdehnungszahl bezeichnet und ist dimensionslos. Es wurde ein Wert von 0,49 gewählt, da ein Wert von 0,5 die Rechenzeit drastisch verlängert, man aber so trotzdem in jenem Bereich ist, bei dem sich das Volumen der Elemente nur minimal verkleinert.

Außerdem wurde ein isotropes Materialverhalten angenommen. Für die plastischen Kennwerte wurde eine multilineare plastische Fließkurve mit isotroper Verfestigung erzeugt. Die plastische Verfestigungskurve kann Abb. 2-12 entnommen werden. Die Fließgrenze beträgt 0,1 MPa. Ab einer plastischen Fließspannung von $25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ bei einer plastischen Dehnung von 0,01 % liegt ein ideal plastisches Materialverhalten vor.

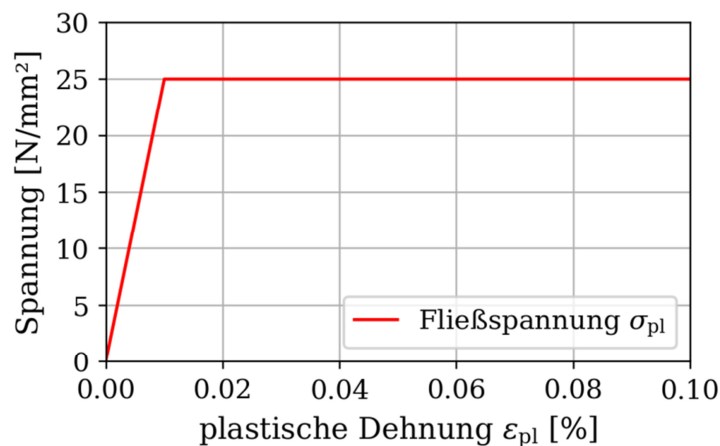


Abb. 2-12 Verfestigungskurve des PA 66 für den Geometrieaufbau

Für die Kontakteigenschaften wurde lediglich ein „tangenciales Verhalten“ „frictionless“ und ein „normales Verhalten“ „hard contact“ mit weiteren standardmäßigen Einstellungen verwendet. Um die einzelnen „Parts“ miteinander in Kontakt treten zu lassen, dient ein „general contact“ Kontaktmodell für explizite Gleichungslöser. Speziell in weiterer Simulation wird das Modell noch komplexer, weshalb andere Kontaktmodelle aufgrund der Definition von „Master-Slave“ Kontaktflächen nicht mehr herangezogen werden können. Das bedeutet, dass es nicht möglich ist, eine „Master“ Fläche beziehungsweise eine „Slave“ Fläche zu definieren, da sich im nächsten Zeitschritt möglicherweise die Definition umdreht. Bezüglich dieser Erkenntnis ist es in Abaqus nicht möglich, eine exakte Definition der Kontaktflächen zu erstellen, weshalb das „general contact“ Kontaktmodell verwendet wird. Dieses Kontaktmodell funktioniert nur mit dreidimensionalen Oberflächen und benutzt Tracking-Algorithmen, um ein effizientes Erzeugen von Kontaktbedingungen zu erreichen. Die Kontaktdomain „All“ umfasst alle elementbasierenden Oberflächen und analytischen

starrten Oberflächen. Es werden Kontaktkräfte erzeugt, um Kontaktdurchdringungen wie Knoten zu Fläche, Knoten zu starrer Oberfläche und Kante zu Kante zu verhindern. Der Kante zu Kante Algorithmus ist sehr effizient, wenn beispielsweise eine Durchdringung durch Knoten zu Fläche nicht detektiert wurde [12, Kap. 36.4.1].

Für die plastische Komprimierung zur Geometrieerzeugung werden starre Flächen von außen so verschoben, dass diese die Ausgangsgeometrie plastisch zu einem Kreisquerschnitt verformen. Dies ist in Abb. 2-13 zu sehen, wo drei Garne zu einem Strang verformt werden.

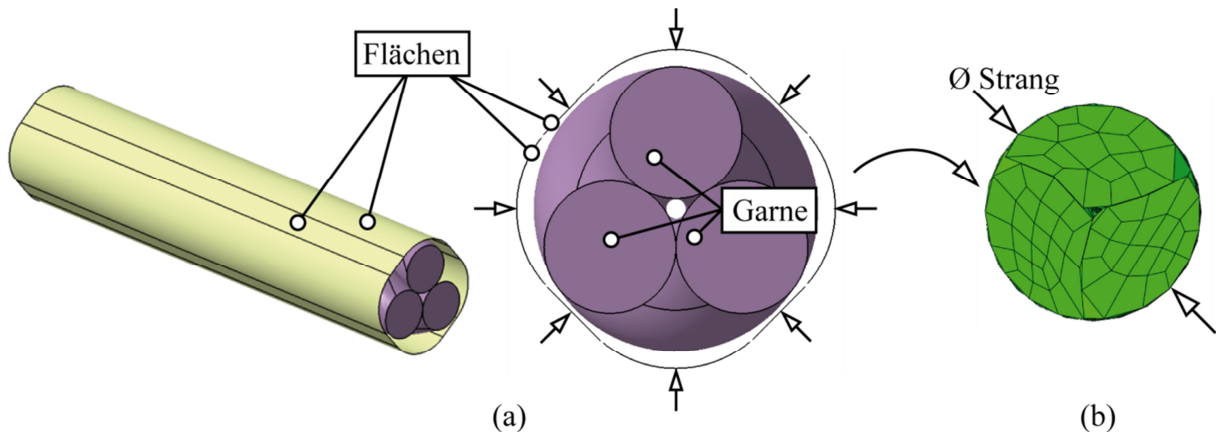


Abb. 2-13 (a) Ausgangsgeometrie: 3 Garne (violett) mit den Flächen und den Verschiebungsvektoren (Pfeile); (b) 1 Strang bestehend aus 3 komprimierten (plastisch verformten) Garnen

Die Verschiebung wird für alle Flächen in einem Schritt gleichzeitig über die jeweiligen Referenzpunkte der starren Körper aufgebracht. Konzentrierte Kräfte oder Momente können durch Verschiebung oder Rotation entlang den Achsen oder Rotation um die Achsen aufgebracht werden (sechs Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum), siehe Abb. 2-14 [12, Kap. 6.3.3].

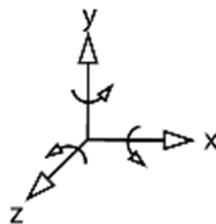


Abb. 2-14 Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum

Dabei beschreiben die ersten drei Freiheitsgrade die Verschiebung entlang der X-, Y- und Z-Achse und die weiteren drei die Rotation um die jeweilige Achse. Für dieses Modell wurde eine Verschiebung lediglich in der XY-Ebene aufgebracht. Der Durchmesser dieser Flächen entspricht dem Durchmesserparameter des Stranges aus Tabelle 3. Damit der Querschnitt des Kerns voll ausgefüllt ist, wurde mithilfe der Gl. (34) der Durchmesser des Garns innerhalb eines Stranges errechnet.

$$\varnothing_{Garn} = \frac{\varnothing_{Kern}}{\sqrt{Garne_{je\ Strang} * (Stränge_{Kern\ 1.Lage} + Stränge_{Kern\ 2.Lage})}} \quad (34)$$

Vollständigkeitshalber ergibt sich nach Gl. (35) der Durchmesser des Stranges.

$$\varnothing_{Strang} = \frac{\varnothing_{Kern}}{\sqrt{(Stränge_{Kern\ 1.Lage} + Stränge_{Kern\ 2.Lage})}} \quad (35)$$

Daraus ergibt sich eine Abhängigkeit des Garndurchmessers von der Anzahl an Garnen je Kernstrang sowie der Anzahl an Strängen im Kern der 1. und 2. Lage. Eine schematische Darstellung der 1. Lage und 2. Lage kann der Abb. 2-15 (a) entnommen werden. Eine schematische Darstellung der Verschiebungen $U_{0^\circ, 90^\circ}$ und U_{45° kann der Abb. 2-15 (b) entnommen werden.

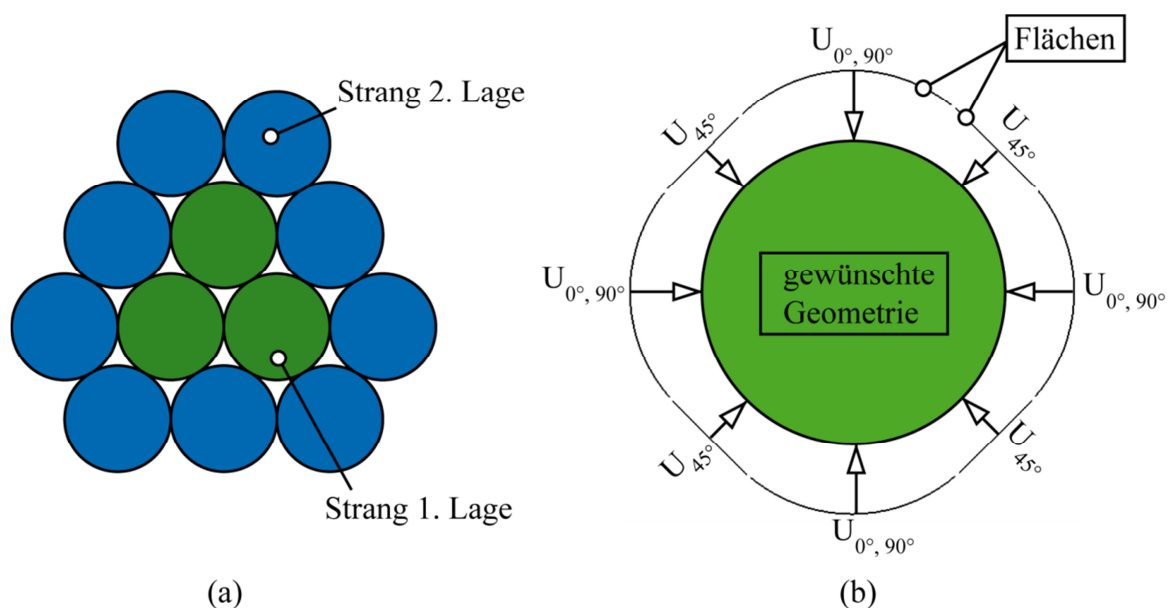


Abb. 2-15 Schematische Darstellung (a) der Stränge 1.Lage (grün) und der Stränge 2.Lage (blau); (b) der Verschiebungen $U_{0^\circ, 90^\circ}$ und U_{45°

2.2 Geometrieaufbau

Nachdem nun eine Übersicht über die Problematik und über den Ablauf des Geometrieaufbaues erfolgte, wird noch etwas näher auf den Geometrieaufbau des Stranges und die Simulationsergebnisse des Geometrieaufbaus eingegangen.

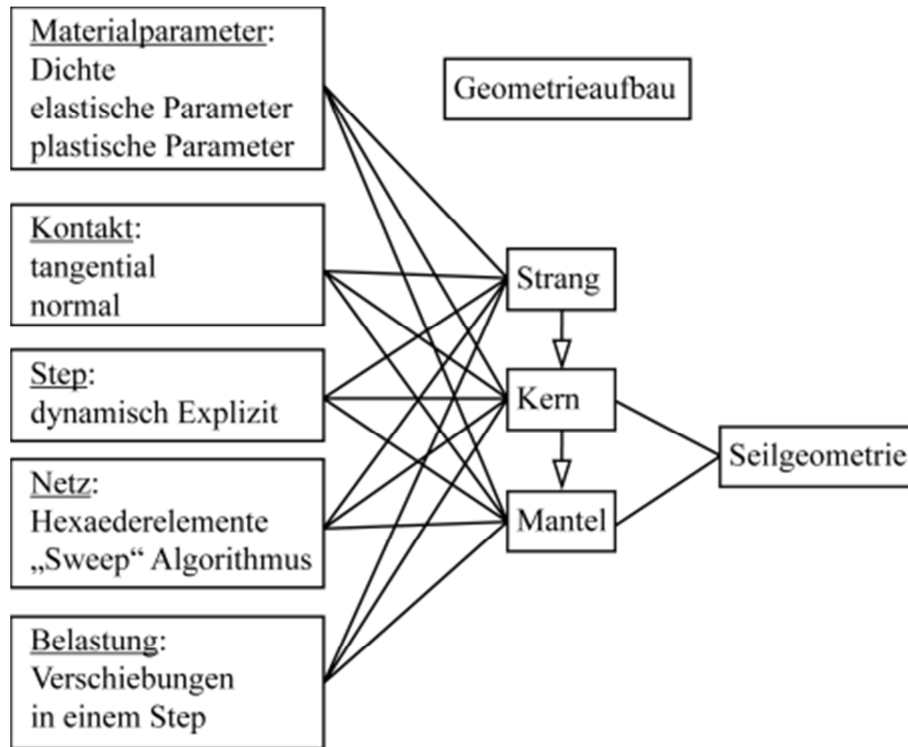


Abb. 2-16 Schematische Darstellung des Seilgeometrieaufbaus

In Abb. 2-16 ist der Verlauf des Geometrieaufbaus schematisch dargestellt.

2.2.1 Ein Strang des Kerns

Zuerst wird ein Strang, bestehend aus 3 Garnen erzeugt. Durch Translation eines Kreisquerschnittes entlang der Mittellinie und zusätzlicher Rotation, siehe Gl. (36), um die Mittelachse, konnte das erste Garn erzeugt werden, siehe Abb. 2-17.

$$Rotation = \frac{360^\circ \cdot \text{Länge des Seilstücks}}{\text{Schlaglänge}_{\text{Kern}}} \quad (36)$$

Modellierung

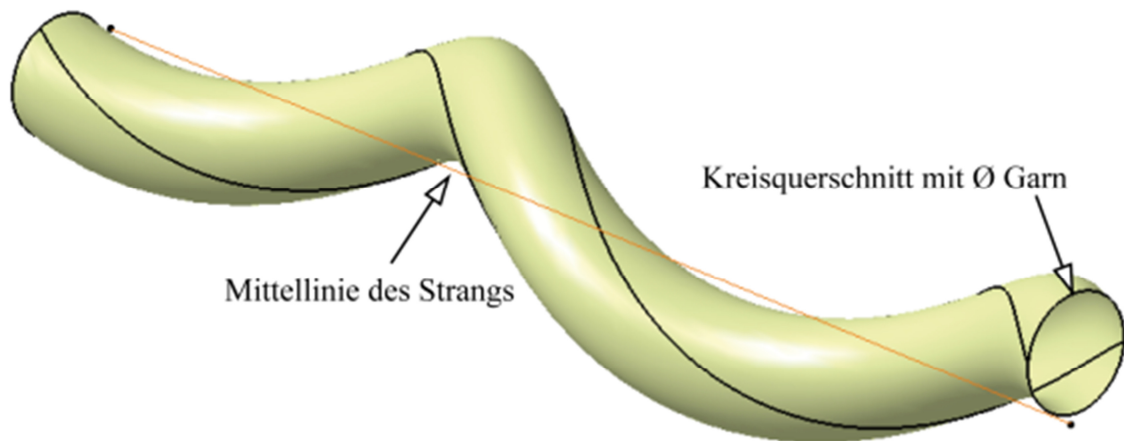


Abb. 2-17 Translation und Rotation eines Garns

Da die Parameter von einer Excel Datei in das CAD-Programm eingelesen wurden, ist eine automatische Verlängerung durch Parameteränderung auf fast jede beliebige Länge möglich, jedoch gibt es interne Einschränkungen im CAD-Programm. Anschließend wurde die Translationsfläche durch Ausfüllen der Innengeometrie zu einem Körper. Durch ein Kreismuster mit der entsprechenden Anzahl an Garnen je Strang entstand die erste Rohgeometrie für einen Strang, siehe Abb. 2-18.

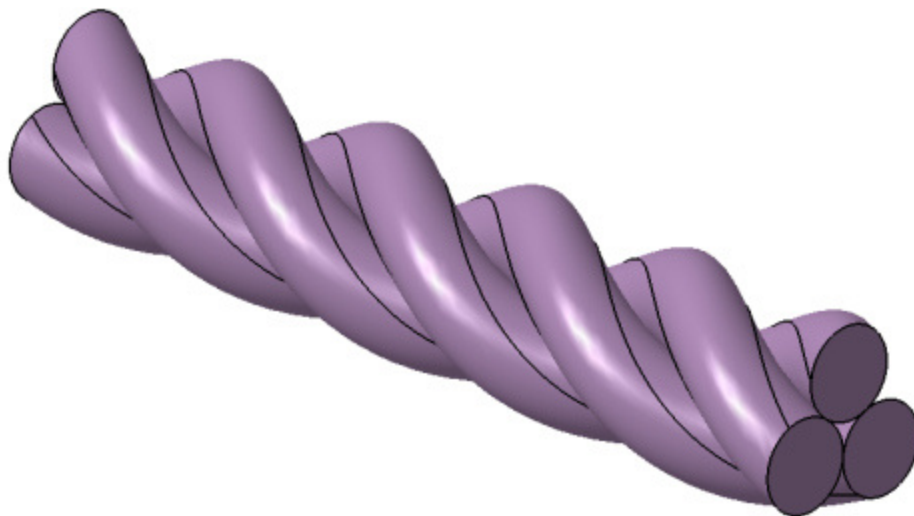


Abb. 2-18 Rohgeometrie eines Stranges des Kerns mit 3 Garnen

Es ist zu erkennen, dass sich die Kreisquerschnitte am Anfang sowie am Ende tangential stets punktförmig berühren. Die Schlagrichtung ist in Z-Drall ausgeführt. Um die drei Garne zu komprimieren, wurden Flächen entwickelt, welche die einzelnen Garne in der Simulation zu einem kreisrunden Querschnitt formen, siehe Abb. 2-19.

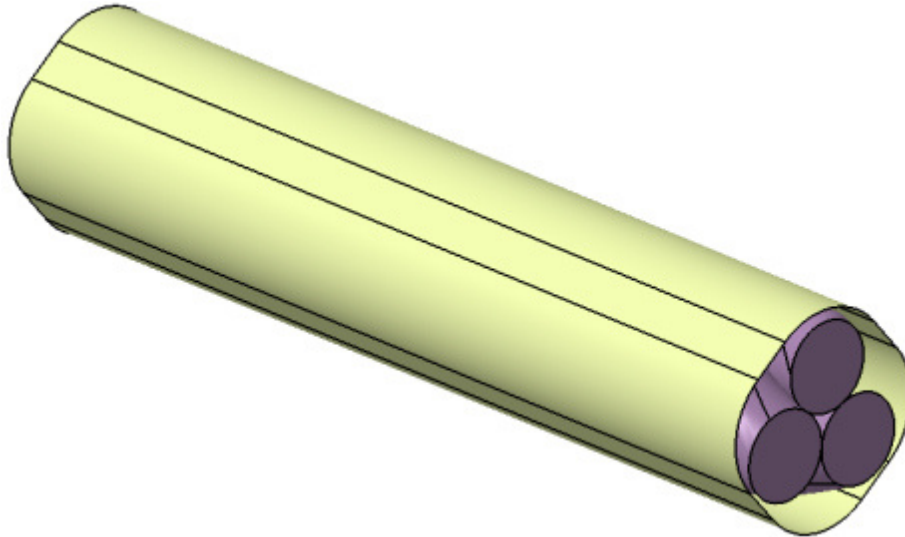


Abb. 2-19 Strang aus 3 Garnen (violett) mit 8 Flächen umhüllt (beige)

Dabei handelt es sich um acht einzelne Flächen, deren Länge und Größe sich im CAD Programm automatisch an die Konstruktionsparameter der Tabelle 3 anpassen und in der Simulation als starre Körper modelliert wurden.

Die Pfeile in Abb. 2-13 (a) verdeutlichen die Verschiebungsvektoren der Flächen und der Betrag der horizontalen und vertikalen Verschiebungsvektoren wird nach Gl. (37) berechnet.

$$U_{0^\circ,90^\circ} = \left(\frac{\varnothing_{Garn}}{\sqrt{3}} + \frac{\varnothing_{Garn}}{2} + 0.05\text{mm} - \frac{\varnothing_{Strang}}{2} \right) * \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right)} \quad (37)$$

Der Betrag der übrigen Vektoren ist nach Gl. (38) zu berechnen.

$$U_{45^\circ} = \frac{\varnothing_{Garn}}{\sqrt{3}} + \frac{\varnothing_{Garn}}{2} + 0.05\text{mm} - \frac{\varnothing_{Strang}}{2} \quad (38)$$

Die Gleichungen Gl. (37) und Gl. (38) kommen durch den geometrischen Aufbau der Flächen im CAD Programm zustande und beschreiben die Verschiebungen der Flächen zur gewünschten Geometrie. Sie berücksichtigen die Parameter Durchmesser des Garns \varnothing_{Garn} und den Durchmesser des Stranges \varnothing_{Strang} . Weiters wurde \varnothing_{Garn} um den Wert 0,05 mm erweitert, damit die Flächen am Anfang der Simulation nicht mit dem Garn in Kontakt stehen. Eine schematische Darstellung der Verschiebungen $U_{0^\circ,90^\circ}$ und U_{45° kann der Abb. 2-15 (b) entnommen werden.

Modellierung

Um die Einspannungen der Garne zu gewährleisten, wurden die Stirnflächen der Garne ausgewählt und Verschiebungen in Z-Richtung gesperrt, siehe Abb. 2-20.

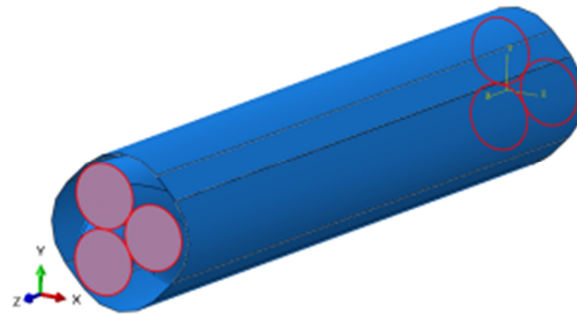


Abb. 2-20 Eingespannte Flächen (rot) für die Simulation des Stranges

Nach Beendigung der Simulation sieht man einen komprimierten Strang bestehend aus drei Garnen, siehe Abb. 2-21 (a).

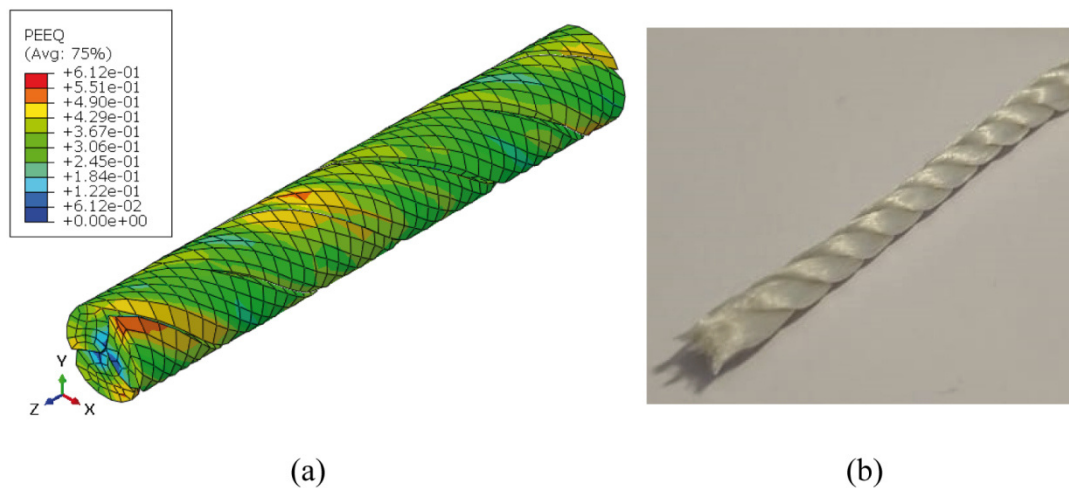


Abb. 2-21 (a) akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung eines Strangs mit drei Garnen nach plastischer Berechnung zur Erzeugung der Geometrie (b) reale Geometrie eines Strangs mit drei Garnen

Die Rohgeometrie wurde erfolgreich umgeformt. Die akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung (PEEQ), siehe Abb. 2-21 (a), gibt die dabei auftretende plastische Dehnung an. Bei der Erzeugung eines Stranges traten bis zu 61% plastische Dehnung auf.

2.2.2 Kern

Die Stränge werden entsprechend um den Durchmesser des Stranges \varnothing_{Strang} , nach Gl. (35), nebeneinander angeordnet und mit angepassten Flächen zu einem Kern, der die Form eines Kreisquerschnittes einnimmt, gestaucht, siehe Abb. 2-22.

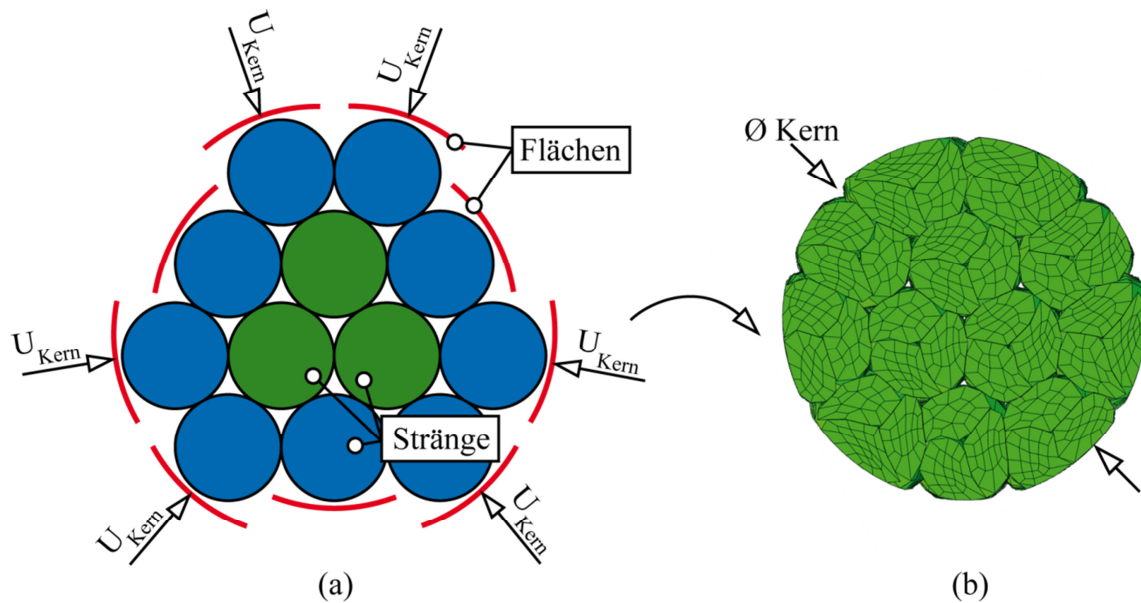


Abb. 2-22 (a) 3 Stränge in 1. Lage (grün) und 9 Stränge in 2. Lage (blau) mit den Flächen und den Verschiebungsvektoren (Pfeile) (b) Kern bestehend aus 12 Strängen

Somit beinhaltet die Rohgeometrie, siehe Abb. 2-22 (a), drei Stränge (grün) zu je drei Garnen in 1. Lage und neun Stränge (blau) zu je drei Garnen in 2. Lage. Der Durchmesser dieser Flächen entspricht dem Durchmesserparameter des Kerns aus der Tabelle 3. Die Pfeile in Abb. 2-22 (a) verdeutlichen die Verschiebungsvektoren der Flächen und der Betrag dieser wird nach Gl. (39) berechnet.

$$U_{Kern} = 2 * \varnothing_{Strang} + \frac{\varnothing_{Strang}}{10} - \frac{\varnothing_{Kern}}{2} \quad (39)$$

Die Gleichung Gl. (39) kommt durch den geometrischen Aufbau der Flächen im CAD Programm zustande und beschreibt die Verschiebungen der Flächen zur gewünschten Geometrie. Sie berücksichtigt die Parameter Durchmesser des Stranges \varnothing_{Strang} und den Durchmesser des Kerns \varnothing_{Kern} . Weiters wurde \varnothing_{Strang} um den Wert $\frac{\varnothing_{Strang}}{10}$ erweitert, damit die Flächen am Anfang der Simulation nicht mit dem Garn in Kontakt stehen. Eine schematische Darstellung der Verschiebungen $U_{0^\circ,90^\circ}$ und U_{45° kann der Abb. 2-15 (b) entnommen werden. Die Verschiebung wird für alle Flächen in einem Schritt gleichzeitig durchgeführt. Jene Flächen ohne Pfeil (3 Stück) werden in der Simulation nicht verschoben, sondern sind fix eingespannt.

Durch das Wiederverwenden der Simulationsdaten des Stranges aus der ODB-Datei, für das nebeneinander Anordnen der Stränge und somit für die Simulation des Kerns, ist die eigentliche Geometrie aus dem CAD-Programm verloren gegangen und nur mehr im sogenannten „Orphan“ Netz, über das Netz selber, hinterlegt. Eine Veränderung der Geometrie ist somit nicht mehr möglich. Es wurde zwar eine Methode entwickelt, um ein

Modellierung

„Orphan“ Netz in ein geometrisches Netz umzuwandeln, jedoch brachte es immer wieder neue Probleme mit sich. Diese häuften sich speziell bei der Mantelgeometrie dermaßen an, dass eine weitere Entwicklung im Sinne dieser Masterarbeit nicht weiter verfolgt wurde. Durch das Importieren des „Orphan“ Netzes aus der ODB-Datei des Stranges, in die CAE-Datei des Kerns, wurden keine Eigenspannungen aus der Strangsimulation mit übergeben. Das Netz der einzelnen Garne ist über das „Orphan“ Netz definiert und dadurch ist es auch nicht möglich, es erneut zu vernetzen. Jedoch ist das „Orphan“ Netz so in Ordnung, da es Hexaederelemente mit dem „Sweep“-Algorithmus aufweist.

Durch die Umwandlung in ein „Orphan“ Netz können die Elementflächen an der Stirnseite der Stränge nicht ausgewählt werden, weshalb für die Einspannung der Stirnflächen die Knoten der Elemente ausgewählt und die Verschiebung in Z-Richtung gesperrt wurde, siehe Abb. 2-23.

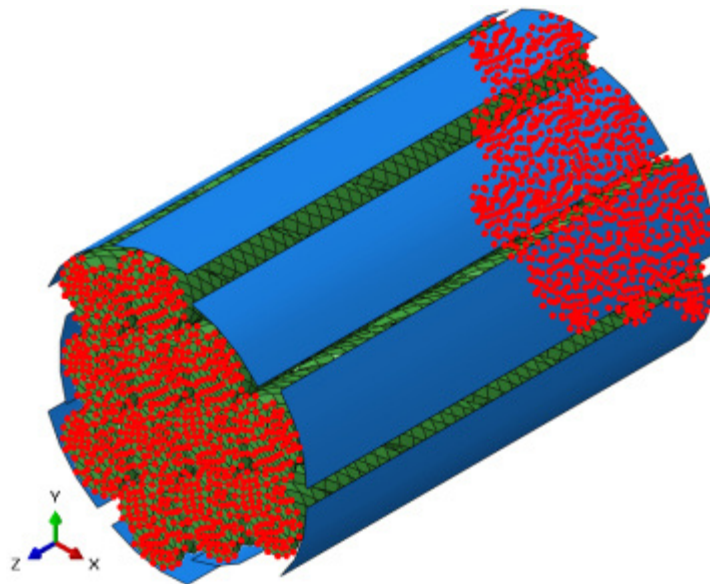


Abb. 2-23 Eingespannte Knoten (rot) für die Simulation des Kernes

Die Materialeigenschaften lassen sich dem „Orphan“ Netz problemlos zuweisen und entsprechen denselben wie jene des Strangmodells, siehe Tabelle 4 und Abb. 2-12. Nach Beendigung der Simulation sieht man einen Kern, bestehend aus zwölf Strängen zu je drei Garnen, siehe Abb. 2-24 (a).

Modellierung

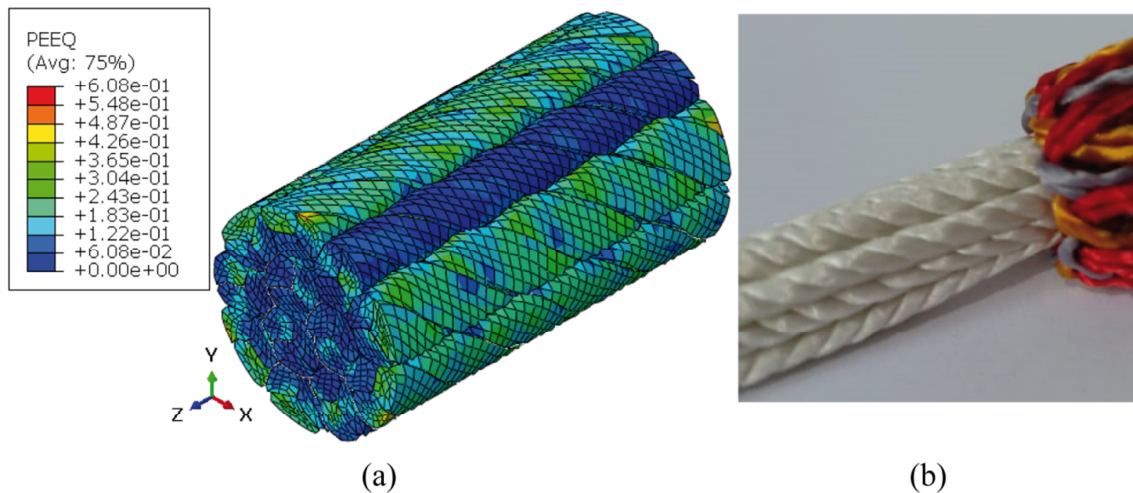


Abb. 2-24 (a) akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung des Kernes nach plastischer Berechnung zur Erzeugung der Geometrie (b) reale Geometrie eines Kernes; 12 Stränge zu je 3 Garnen

Die Stränge wurden erfolgreich zu einem Kern umgeformt. Die akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung (PEEQ), siehe Abb. 2-24 (a), gibt die dabei auftretende plastische Dehnung an. Bei der Erzeugung eines Kernes traten bis zu 61% plastische Dehnung auf. Aufgrund dessen, dass die Poissonzahl $\nu = 0,49$ war, und somit eine geringe Volumenänderung der Elemente stattfindet, ergeben sich ein wenig dichter gepackte Elemente im Bereich der höheren Verformung. Um eine Torsion um die eigene Seilachse zu reduzieren, weist der Kern Z-Drall-Stränge (rechtsschlag) und S-Drall-Stränge (linksschlag) auf, siehe Abb. 1-3 und Abb. 1-7. Jedoch wurden die Stränge im Kern des Modells rein durch Z-Drall-Stränge (rechtsschlag) realisiert, siehe Abb. 2-25.

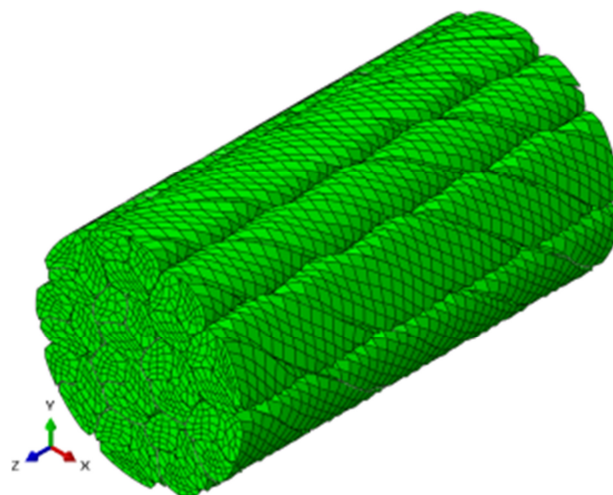


Abb. 2-25 Simulierte Kerengeometrie

Die Abweichung des Modells, dass dieses nur aus Z-Drall-Strängen (rechtsschlag) besteht, ist für den Aufbau des Modelles nicht relevant, jedoch für das Drehverhalten des gesamten Seiles

Modellierung

bei Zug durchaus. Um Rechenleistung und Entwicklungszeit einzusparen, wurde darauf dennoch verzichtet, S-Drall-Stränge (linksschlag) zu implementieren.

2.2.3 Mantel

Der Mantel stellte durch seine geflochtene Struktur eine besondere Herausforderung dar, siehe Abb. 2-26. Die Herausforderung lag darin, die geflochtenen Mantelgarne im CAD Programm so zu konstruieren, dass es keine Überschneidungen der einzelnen Garne gibt.

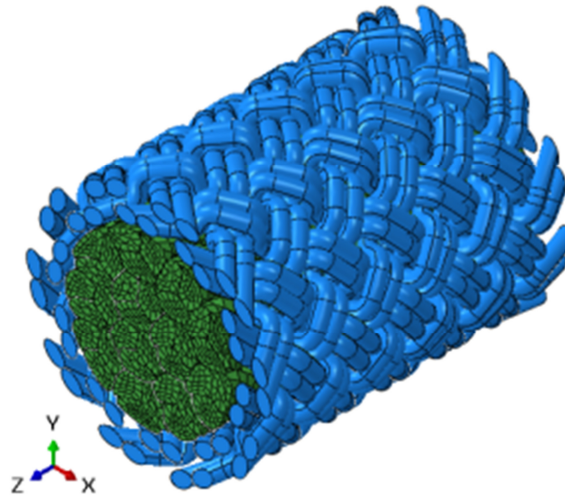


Abb. 2-26 Seilgeometrie vor der Simulation; Kern (grün), Mantel (blau)

Grundsätzlich wurde bei dem Geometrieaufbau auf folgende Dinge geachtet:

- Es sollen zwei Mantelgarne parallel nebeneinander liegen
- Die Garne selber laufen entlang einer Helix
- Die Verflechtung der Garne untereinander ist zu bewerkstelligen
- Die Netzerstellung in der Simulation soll weiterhin mit einem „Sweep“-Algorithmus erfolgen
- Wie im Kern sollen auch hier die hexaedrischen Elemente verwendet werden
- Die Garne sollen aneinander anliegen

Um diese Überlegungen erfolgreich umzusetzen, wurde wie folgt vorgegangen. Eine Helix wurde um eine Mittellinie erzeugt, deren Steigung der Zykluslänge des Mantels und die Länge dem gleichnamigen Seilparameter aus Tabelle 3 entspricht, siehe Abb. 2-27 (a). Für die Verflechtung der Garne konnte eine Verflechtungskurve entwickelt werden, deren periodische Schwingdauer dem Abstand der Durchmesser der Mantelgarne entspricht. Dieser Abstand, beziehungsweise Bereich unter der Verflechtungskurve, wird in Abb. 2-27 (b) dargestellt.

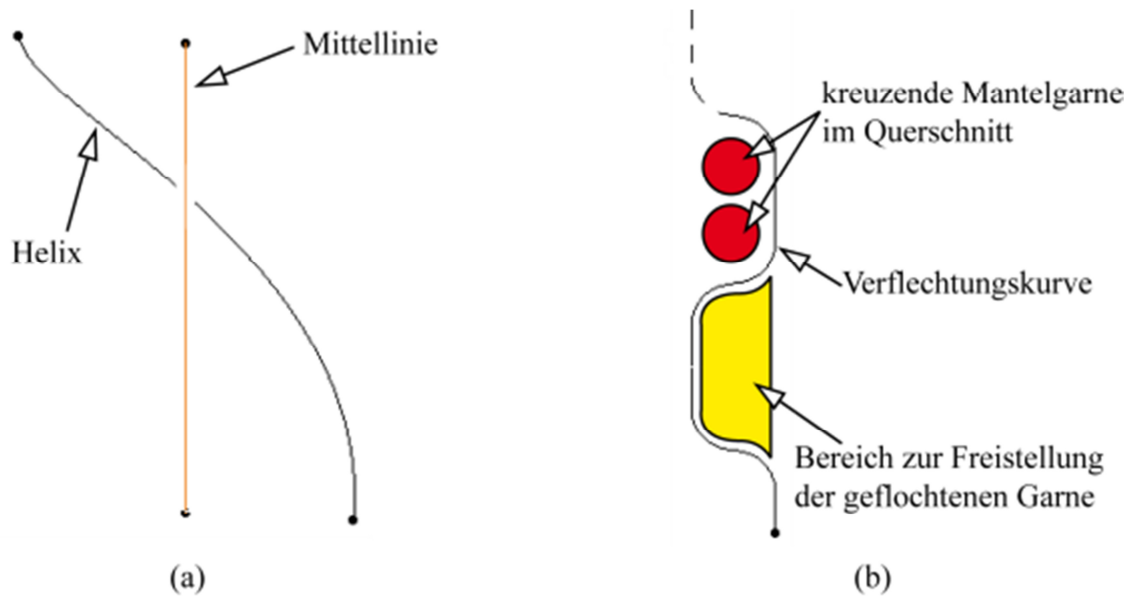


Abb. 2-27 (a) Helix zur Mantelgarnherzeugung (b) Schematische Darstellung der Verflechtungskurve für die Mantelverflechtung

Überlagert man die Helix und die schwingende Verflechtungskurve, erhält man die Mantelgarnkurve k , siehe Abb. 2-28.

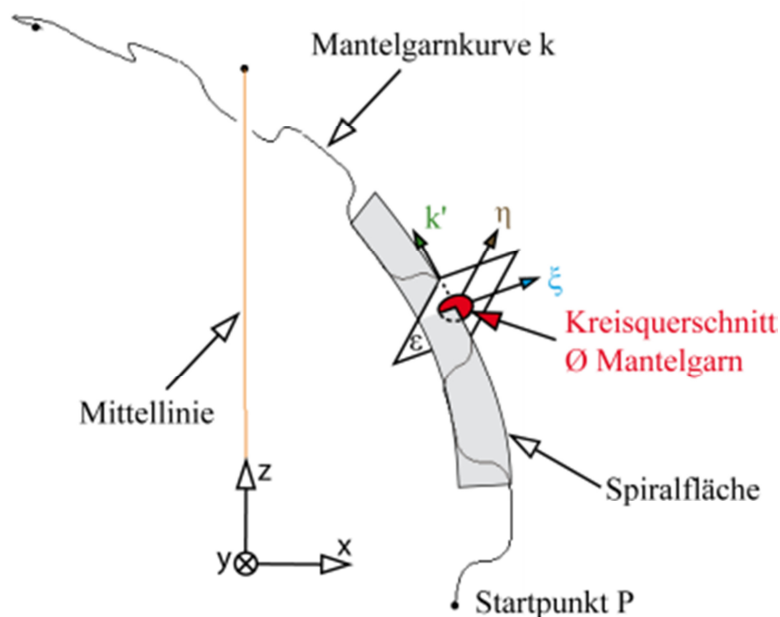


Abb. 2-28 Schematische Darstellung der geometrischen Erzeugung eines Mantelgarns

Die Mantelgarnkurve k liegt stets auf der Spiralfäche, welche eine erzeugende Schraubfläche um die Mittellinie entlang der Helix ist. Betrachtet man die Ebene ε bei einem beliebigen Punkt auf der Mantelgarnkurve k , so ist der Ebenennormalvektor k' stets tangential auf die Mantelgarnkurve k ausgerichtet. Wird nun ein Kreisquerschnitt mit dem Durchmesser des Mantelgarns in der Ebene ε am Startpunkt P erzeugt und mit diesem eine Translation entlang der Mantelgarnkurve ausgeführt, so erhält man das erste Mantelgarn mit stets demselben kreisrunden Querschnitt in Z-Drall, siehe Abb. 2-29.

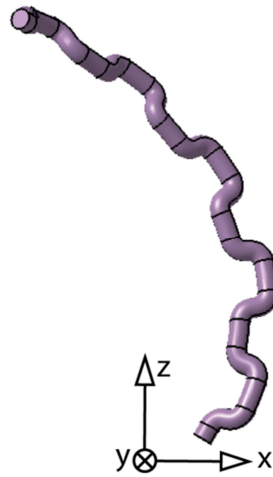


Abb. 2-29 Mantelgarn mit Kreisquerschnitt

Um das zweite Mantelgarn in Z-Drall zu erzeugen, reicht es nicht aus, das erste Mantelgarn um die Mittelachse zu drehen und in Z-Richtung zu verschieben bzw. zu mustern. Dadurch erhält man keinen gleichbleibenden Abstand zwischen Mantelgarnkurve 1 und 2. Es ist notwendig, eine neue Helix mit einem Normalabstand (Durchmesser des Mantelgarns) vom Startpunkt der ersten Helix aus zu erzeugen, siehe Abb. 2-30 (a). Durch Wiederholen des Vorganges zur Erzeugung der Mantelgarnkurve an der Helix 2 erhält man das zweite Mantelgarn parallel liegend zum ersten, in Z-Drall, siehe Abb. 2-30 (b).

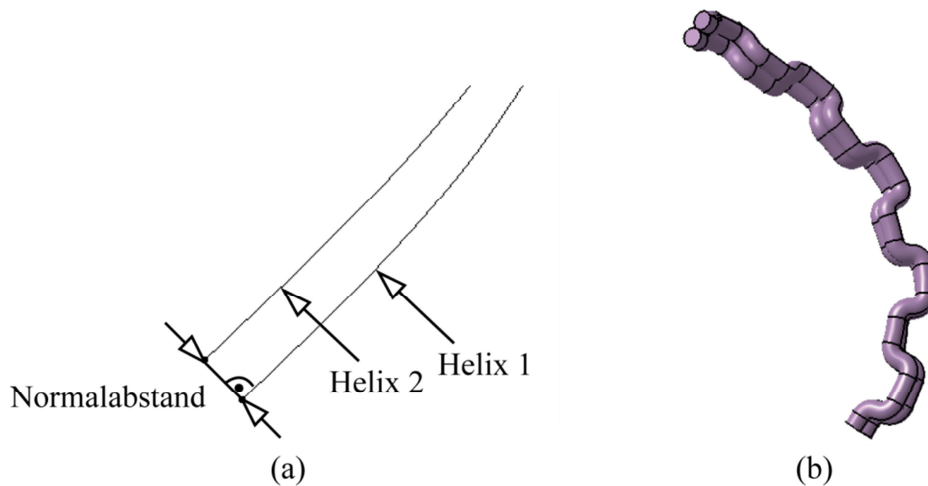


Abb. 2-30 (a) Normalabstand zur Erzeugung des zweiten Mantelgarns (b) Zwei Mantelgarne in Z-Drall

Die S-Drall Mantelgarne werden mit derselben Methode erzeugt. Jedoch startet die Schwingung der Verflechtungskurve eine halbe Periodendauer später, weshalb die Mantelgarne 1 und 2 nicht mit 3 und 4 in Kontakt kommen, siehe Abb. 2-31 (a). Um eine glatte Stirnfläche am Anfang und den Enden zu erhalten, wurden die Stirnflächen der Garne verlängert und anschließend abgeschnitten, siehe Abb. 2-31 (b). Diese zusätzliche Änderung

Modellierung

ist für die nachfolgende Simulation notwendig gewesen, da sich die Stirnflächen ansonsten trotz der Sperrung jeglicher Rotationsachsen eingedreht hätten.

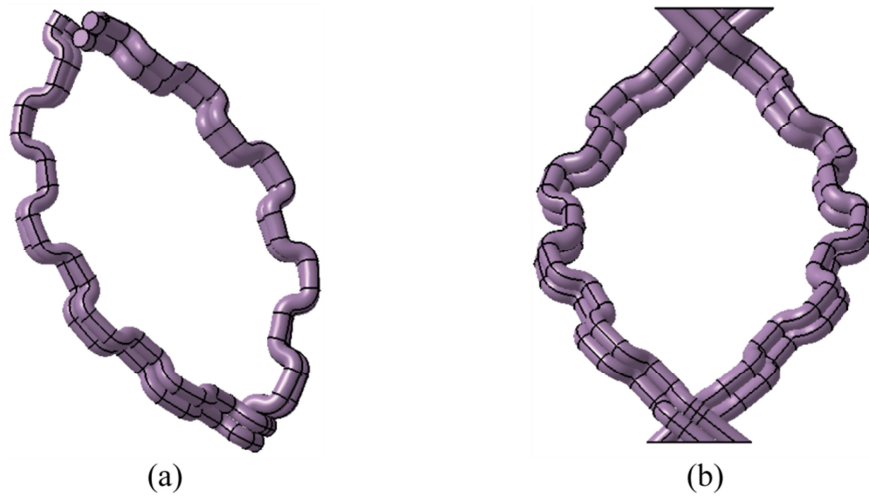


Abb. 2-31 (a) Mantelgarne 1-4 (b) Mantelgarne 1-4 von der Seite betrachtet mit verlängerten und abgeschnittenen Stirnflächen

Durch Kreismusterung der Mantelgarne entsteht die gesamte Rohgeometrie des Mantels. Für die Belastungen der Simulation wurden wie bei der Simulation des Stranges acht Flächen entwickelt, welche in der Simulation zur Mitte hin verschoben wurden. Die gekrümmten Flächen weisen den Durchmesser des Mantels, siehe Tabelle 3, auf. Somit beinhaltet die Rohgeometrie, siehe Abb. 2-32 (a), den Kern (grün) aus zwölf Strängen zu je 3 Garnen und den Mantel (blau) aus vierzig Garnen.

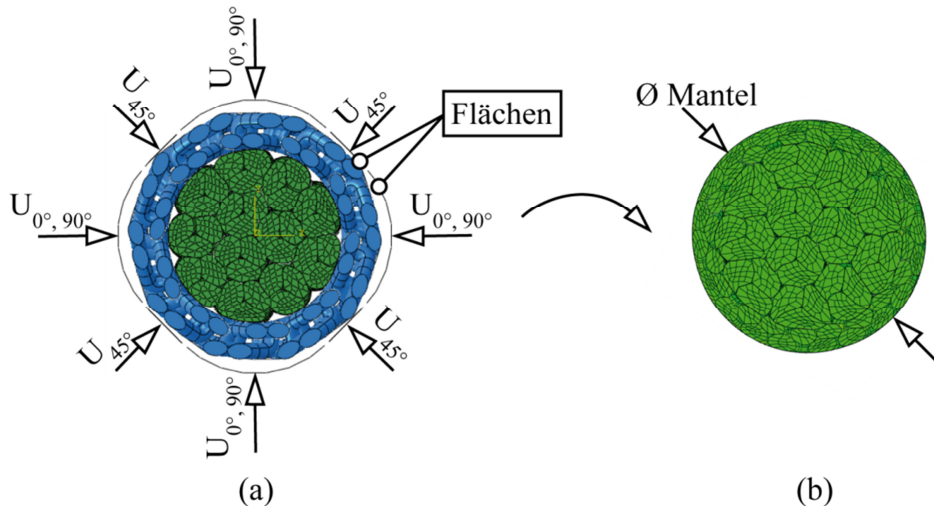


Abb. 2-32 (a) Rohgeometrie mit dem Kern (grün), dem Mantel (blau) und den Verschiebungsvektoren (Pfeile) (b) Seilgeometrie

Die Verschiebung wird für alle Flächen in einem Schritt gleichzeitig über die jeweiligen Referenzpunkte der starren Körper aufgebracht. Der Durchmesser dieser Flächen entspricht dem Durchmesserparameter des Mantels aus der Tabelle 3. Die Pfeile in Abb. 2-32 (a)

Modellierung

verdeutlichen die Verschiebungsvektoren der Flächen und der Betrag der horizontalen und vertikalen Verschiebungsvektoren wird nach Gl. (40) berechnet.

$$U_{0^\circ,90^\circ} = \left[\frac{\varnothing_{Kern}}{2} + \left(\frac{\varnothing_{Mantelgarn}}{2} + 0,1\text{mm} \right) * 4 - \frac{\varnothing_{Mantel}}{2} \right] * \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right)} \quad (40)$$

Der Betrag der übrigen Vektoren ist nach Gl. (41) zu berechnen.

$$U_{45^\circ} = \frac{\varnothing_{Kern}}{2} + \left(\frac{\varnothing_{Mantelgarn}}{2} + 0,1\text{mm} \right) * 4 - \frac{\varnothing_{Mantel}}{2} \quad (41)$$

Die Gleichungen Gl. (40) und Gl. (41) kommen durch den geometrischen Aufbau der Flächen im CAD Programm zustande und beschreiben die Verschiebungen der Flächen zur gewünschten Geometrie. Sie berücksichtigen die Parameter Durchmesser des Kerns \varnothing_{Kern} , Durchmesser des Mantelgarns $\varnothing_{Mantelgarn}$ und den Durchmesser des Mantels \varnothing_{Mantel} . Weiters wurde $\varnothing_{Mantelgarn}$ um den Wert 0,1 mm erweitert, damit die Flächen am Anfang der Simulation nicht mit dem Garn in Kontakt stehen. Eine schematische Darstellung der Verschiebungen $U_{0^\circ,90^\circ}$ und U_{45° kann der Abb. 2-15 (b) entnommen werden.

Um die Einspannung an den Stirnflächen realisieren zu können, wurden die Knoten der Elemente des Kerns und die Stirnflächen der Mantelgarne ausgewählt und die Verschiebung in Z-Richtung gesperrt, siehe Abb. 2-33.

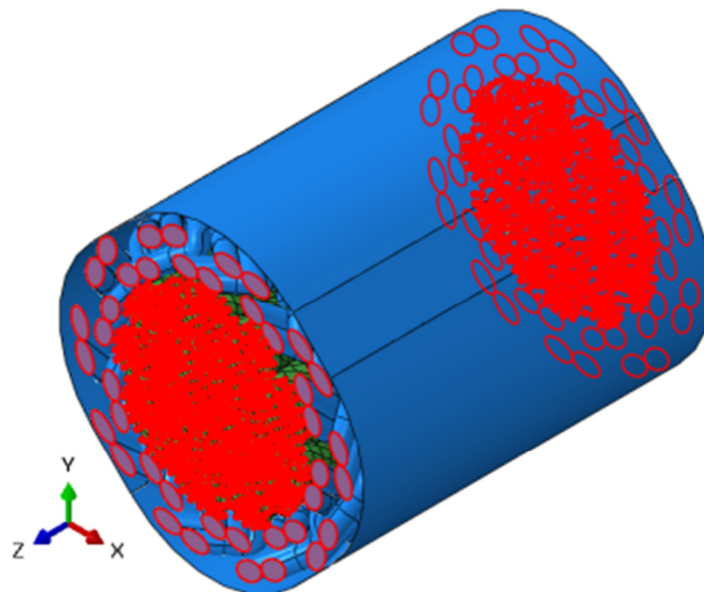


Abb. 2-33 Eingespannte Bereiche (rot) für die Simulation des Mantels

Die Materialeigenschaften des Kerns und des Mantels entsprechen aufgrund der erwünschten erzwungenen plastischen Deformation denselben wie jene der Materialien im Strang- und Kernmodell, siehe Tabelle 4 und Abb. 2-12. Nach Beendigung der Simulation des Mantels ist die Seilgeometrie fertig aufgebaut, siehe Abb. 2-34 (a).

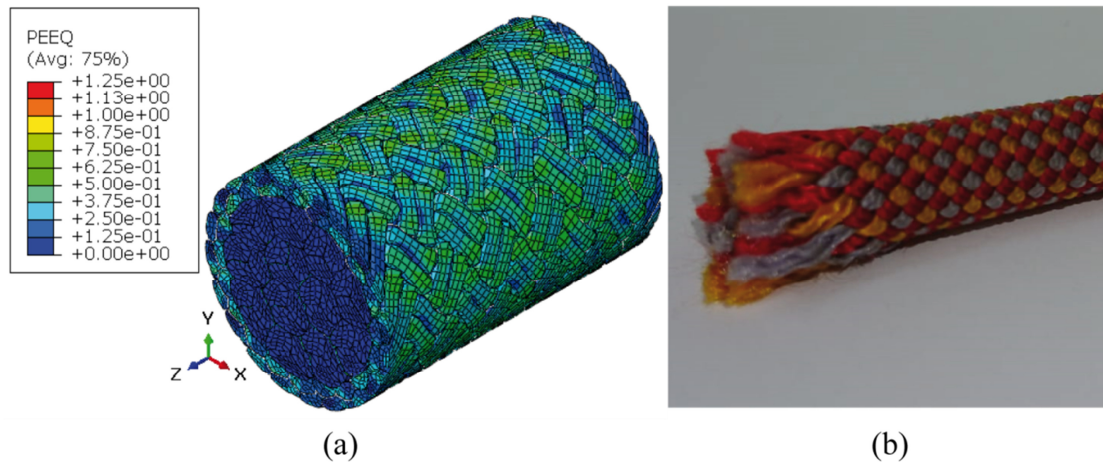


Abb. 2-34 (a) Fertige Seilgeometrie, nach Beendigung der Simulation des Mantels (b) reale Geometrie eines Seilmantels

Die Rohgeometrie wurde erfolgreich umgeformt. Die akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung (PEEQ), siehe Abb. 2-34 (a), gibt die dabei auftretende plastische Dehnung an. Bei der Erzeugung des Mantels traten bis zu 125% plastische Dehnung auf. Man erkennt, dass der Kern nicht mitverformt wurde und die Mantelgarne aneinander und am Kern anliegen.

Eine Übersicht mit den nötigen Parametern und Eigenschaften ist somit für die Seilgeometrie erklärt worden und ein Beispielbild der Seilgeometrie ist in Abb. 2-35 zu sehen.

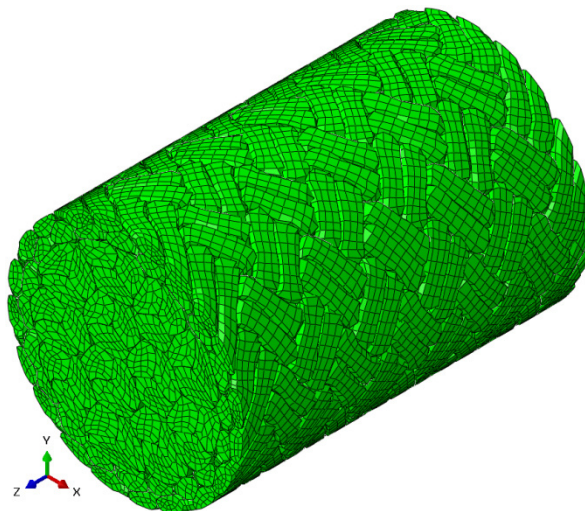


Abb. 2-35 Beispielbild für die erzeugte Seilgeometrie

Das Volumen des einhüllenden Zylinders lässt sich elementar über die Gl. (42) mit einem simulierten Seildurchmesser $D_{Seil,simuliert} = 12,39\text{mm}$ und einer simulierten Länge $L_{simuliert} = 18,26\text{mm}$ berechnen:

$$Volumen_{Vollzylinder} = \frac{D_{Seil,simuliert}^2 * \pi}{4} * L_{simuliert} = 2,201 * 10^3 \text{mm}^3 \quad (42)$$

Modellierung

Dabei ist zu erwähnen, dass durch die plastische Verformung davon ausgegangen worden ist, dass das Volumen als Vollquerschnitt angesehen wird, wie es theoretisch auch bei einem realen Seilstück durch das Anliegen aller Garne sein sollte. Das Volumen der simulierten Seilgeometrie, siehe Abb. 2-35, beträgt $2,126 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ und wurde in Abaqus an der nicht deformierten Seilgeometrie mit „Tools-Query-Mass properties“ ausgewertet. Der volumetrische Füllgrad φ_{PA} der simulierten Seilgeometrie kann somit nach Gl. (43) berechnet werden:

$$\varphi_{PA} = \frac{\text{Volumen}_{\text{gemessen}}}{\text{Volumen}_{\text{Vollzylinder}}} = 96,6\% \quad (43)$$

Durch einen Wert von 96,6% erkennt man, dass die simulierte Seilgeometrie durch die plastische Verformung fast keine Hohlräume beinhaltet und das Volumen aufgefüllt ist.

2.3 Verworfenner Modellansatz / Balkenelement

In diesem Kapitel werden simulationstechnische Hürden erwähnt, welche nicht zum erwünschten Erfolg geführt haben. Somit wurde dieser Ansatz auch nicht weiter verfolgt. Eine Idee bestand darin, die Elemente nicht aus „Solid-Elementen“, sondern aus „Beam-Elementen“, also Balkenelementen, aufzubauen. Dies sollte den Vorteil haben, dass die Berechnungsdauer aufgrund der Elementart reduziert wird. So wurde ein Vergleichsmodell erstellt, um zu überprüfen, ob Kontakt zwischen Balkenelementen gerechnet werden kann, siehe Abb. 2-36. Dafür wurde ein Kreuz aus zwei Linien aufgebaut, denen Beam-Elemente zugeordnet worden sind und mit Verschiebungsvektoren (Pfeile in Abb. 2-36) an den Enden simuliert wurde.

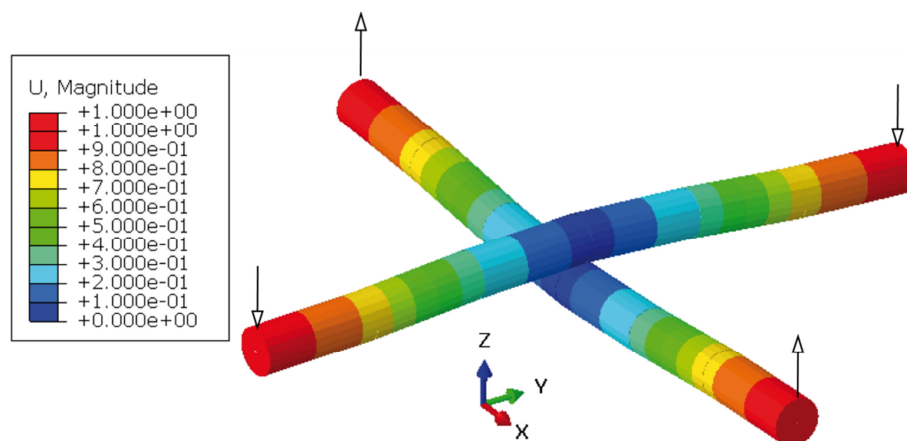


Abb. 2-36 Vergleichsmodell mit Beam-Elementen und Verschiebungen als Pfeile dargestellt
Für dieses Modell sind die Querschnitte der Balken dargestellt und alle Freiheitsgrade bis auf die Verschiebung in Z-Richtung wurden gesperrt. Der Radius der Balkenelemente beträgt

Modellierung

1 mm und der Anfangsabstand zwischen den zwei Balken zum Start der Simulation betrug 2,1 mm. Die aufgebrachte Verschiebung betrug 1 mm. Eine Version fand damit statt, dass zwei Netz-Knoten sich genau in der Kreuzung gegenüberstehen und die andere Version wurde mit zwei gegenüberliegenden Kanten in der Kreuzung erzeugt. Beide Versionen wiesen keine Überschneidungen auf. Damit wäre für so einen einfachen Fall gezeigt, dass dieser Kontakt zwischen zwei Balkenelementen prinzipiell funktionieren könnte.

Als ungenaues Ersatzmodell für die Seilgeometrie wurden einzelne Mantelgarne aus Beam-Elementen erzeugt und eine Zugbelastung in Z-Richtung bzw. entgegen der Z-Richtung an den Stirnflächen der Mantelgarne simuliert, siehe Abb. 2-37.

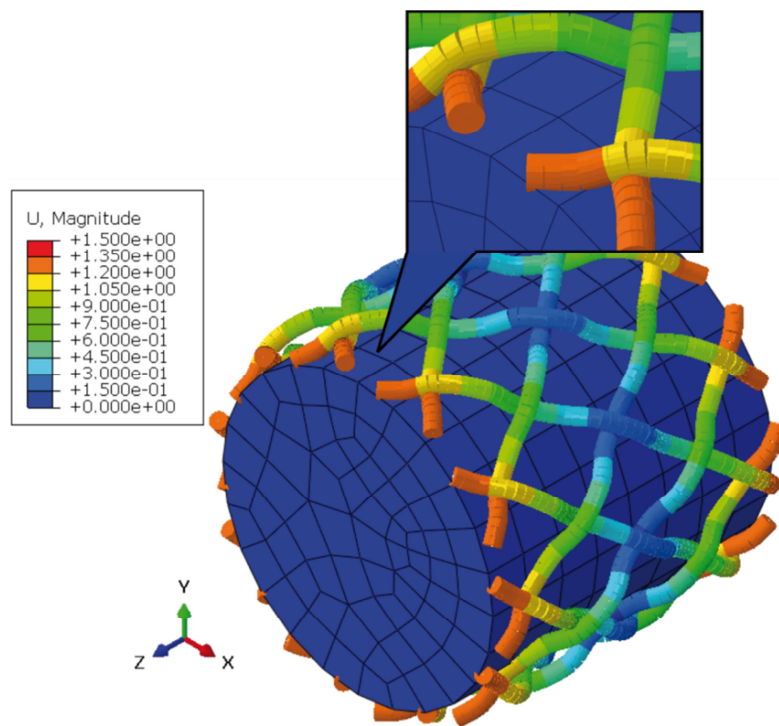


Abb. 2-37 Ersatzmodell mit Mantelgarne aus Beam-Elementen und Verschiebung der Stirnflächen in Z-Richtung bzw. entgegen der Z-Richtung

Im Ersatzmodell ist zu erkennen, dass die Beam-Elemente trotz der gleichen Kontakteinstellungen Überschneidungen bilden. Das Netz ist weitaus feiner, damit die Krümmungen der Verflechtung abgebildet werden können. Durch die komplexe Geometrie konnte nicht genau festgelegt werden, was als Master- und was als Slave-Kontakt definiert werden sollte, da eigentlich ein ständiger Wechsel dieser Definition sinnvoll wäre. Beispielsweise drückt die Verflechtung des Garns 1 auf Garn 2 und einige Elemente weiter wird Garn 1 von Garn 3 gedrückt. Somit wurde weiterhin das General Kontakt Modell mit der Kontaktdomain „All“ verwendet. Allerdings werden alle Kanten der Beam-Elemente als Kontakt mit eingeschlossen [12, Kap. 36.4.1 Specifying “automatic” contact for the entire

Modellierung

model]. Für dasselbe Vergleichsmodell, nur mit feinerem Netz, gibt es deutliche Überschneidungen, siehe Abb. 2-38.

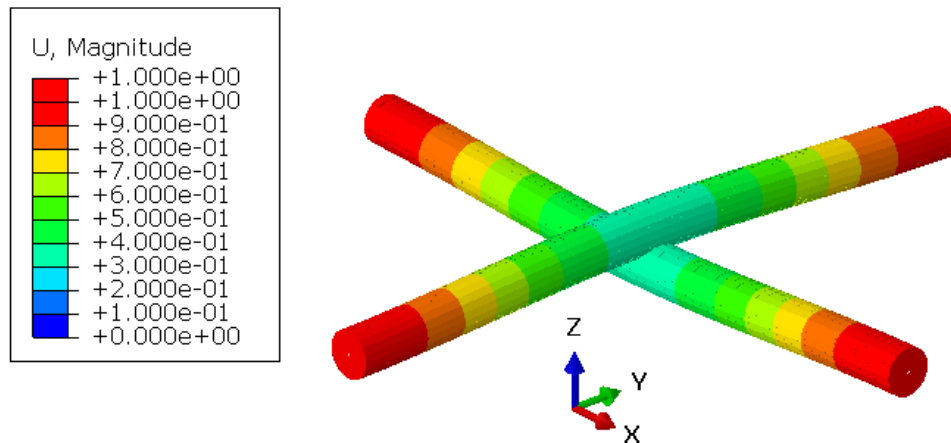


Abb. 2-38 Das Vergleichsmodell für Balkenkontakt mit feinerem Netz

Außerdem wäre es auch mit dem Beam-Konzept nicht möglich gewesen, die Zwischenräume auszufüllen, weshalb die weitere Entwicklung mit Beam-Elementen nicht fortgesetzt wurde.

3 Ergebnisse

Auf der erzeugten Geometrie wird nun eine mechanische Belastung aufgebracht. Die Ergebnisse beinhalten die Steifigkeit, die Verformung und die Spannungen für eine Zug- und Biegebelastung. Eine schematische Übersicht der nachfolgenden Belastungsschritte mit deren Eigenschaften ist der Abb. 3-1 zu entnehmen.

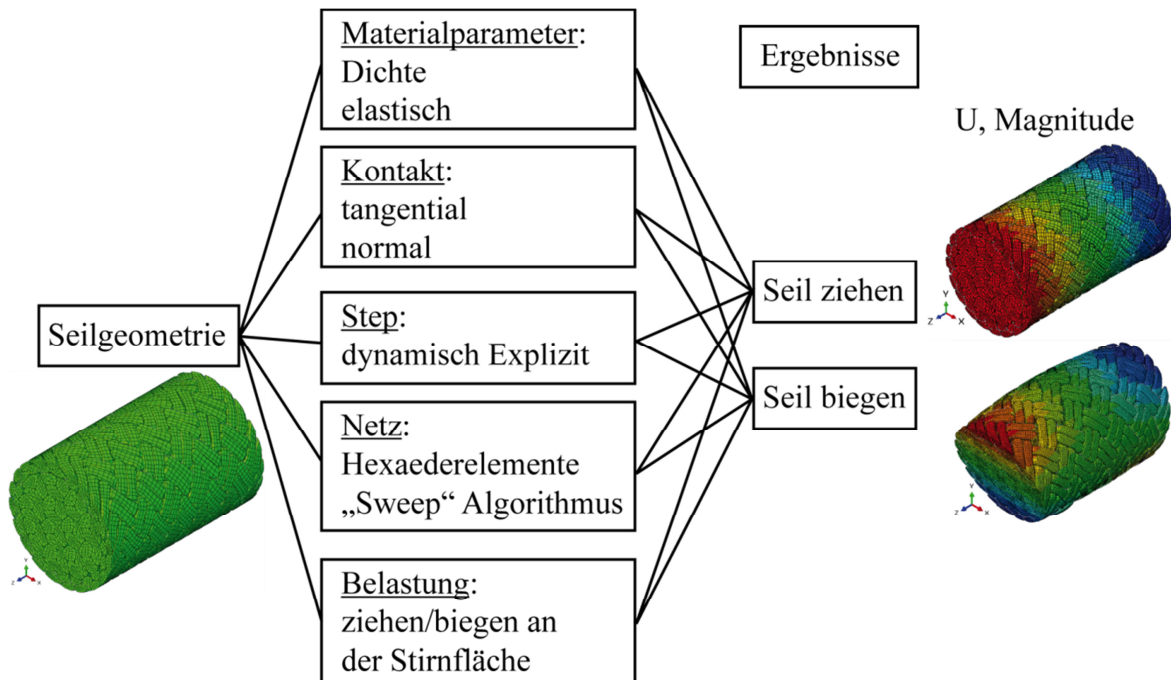


Abb. 3-1 Schematische Darstellung der Simulationen Ziehen und Biegen

Um die mechanische Belastung aufzubringen, wurde die Seilgeometrie aus der ODB-Datei als „Orphan“ Netz in einer neuen CAE-Datei eingespielt und mit den Materialparametern der Tabelle 5 versehen.

Tabelle 5: Materialparameter für die Simulationsergebnisse [14, S. 537]

Dichte ρ	$1,14 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Elastizitätsmodul E	3000 MPa
Poissonzahl ν	0,3

Auf plastische Kennwerte wurde hier im Vergleich zum Geometrieaufbau verzichtet, da beim Ziehen oder Biegen des Seiles keine plastischen Veränderungen vorgesehen sind. Eine Poissonzahl $\nu = 0,3$ wurde aufgrund dessen gewählt, da in der Literatur [14, S. 111] für ein Elastizitätsmodul zwischen 2000 und 3000 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ auf einen Wert von 0,3 bis 0,35 hingewiesen wird. Außerdem wurde ein isotropes Materialverhalten angenommen.

Ergebnisse

Für die Kontakteigenschaften wurde wie schon bei der Geometrieerstellung ein „tangenciales Verhalten“ „frictionless“ und ein „normales Verhalten“ „hard contact“ mit weiteren standardmäßigen Einstellungen von Abaqus verwendet. Um Kontakt im Modell zu definieren, dient ein „general contact“ Kontaktmodell für explizite Gleichungslöser.

Das Netz ist für den Kern schon bei der Strangsimulation, beziehungsweise für den Mantel bei der Mantelsimulation, mit der Netzgröße und dem Netzalgorithmus festgelegt worden. Vollständigkeitshalber wird hier nochmals erwähnt, dass es sich bei sämtlichen Elementen in der Seilgeometrie um C3D8R-Elemente mit einem sogenannten „Sweep“-Algorithmus handelt. Es ist weiterhin anzumerken, dass das Netz aus den ODB-Dateien der Strang-, Kern-, und Mantelsimulationen besteht und die Netzgröße nicht mehr aufgrund des „Orphan“-Netzes geändert werden kann. Soll das Netz eine andere Netzgröße besitzen, so muss der gesamte Aufbau der Seilgeometrie erneut durchlaufen werden.

Da die Geometrie über das „Orphan“-Netz definiert ist, ist es wie bei der Simulation des Kerns nicht möglich, die Elementflächen an der Stirnseite auszuwählen, weshalb auch hier die Knoten der Elemente für die Einleitung der Belastung verwendet wurden. Mit Rigid-Body Constraint wurde die jeweilige Stirnfläche an den jeweiligen Referenzpunkt gekoppelt, über den Belastungen aufgebracht wurden, siehe Abb. 3-2.

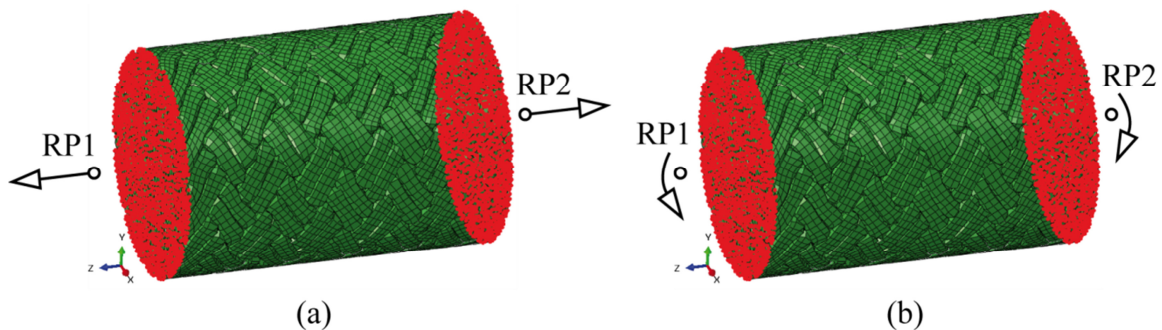


Abb. 3-2 Schematische Darstellung der Belastung mit den Knoten (rot) der Elemente an den Stirnflächen und den Referenzpunkten RP1 und RP2 zur Einleitung der Belastung mit den Belastungen (Pfeile) für (a) Zug und (b) Biegung

Damit wurden alle Freiheitsgrade der Knoten an die jeweiligen Referenzpunkte gekoppelt, wodurch die gesamte Stirnfläche als starrer Körper („Rigid Body“) definiert ist. Die Belastung wurde für Zug als Verschiebung entlang der Längsachse (Z-Richtung) und für Biegung als Rotation um die X-Achse definiert und in separaten Simulationen durchgeführt. Für die jeweiligen Belastungen siehe Tabelle 6. Die Verschiebung und die Rotation wurden linear über die Zeitperiode aufgebracht.

Tabelle 6: Belastungen in Referenzpunkten

	Belastung in Referenzpunkten	Belastung des Seils (Seillänge 18,26 mm)
Zug	1 mm	Längsdehnung $\varepsilon_{18,26 \text{ mm}} = 10,95\%$
Biegung	17,5°	Krümmung $\kappa_{18,26 \text{ mm}} = 0,033 \frac{1}{\text{mm}}$

Die Länge des Seilstücks ist nach Tabelle 3 definiert, und weicht von einer geraden Zahl ab. Diese Abweichung kommt aus der Geometrieerzeugung im CAD Programm zustande und ist notwendig, um die Geometrie gut vernetzen zu können und aufzubauen. Dies wird nachfolgend näher erläutert, siehe Abb. 3-3.

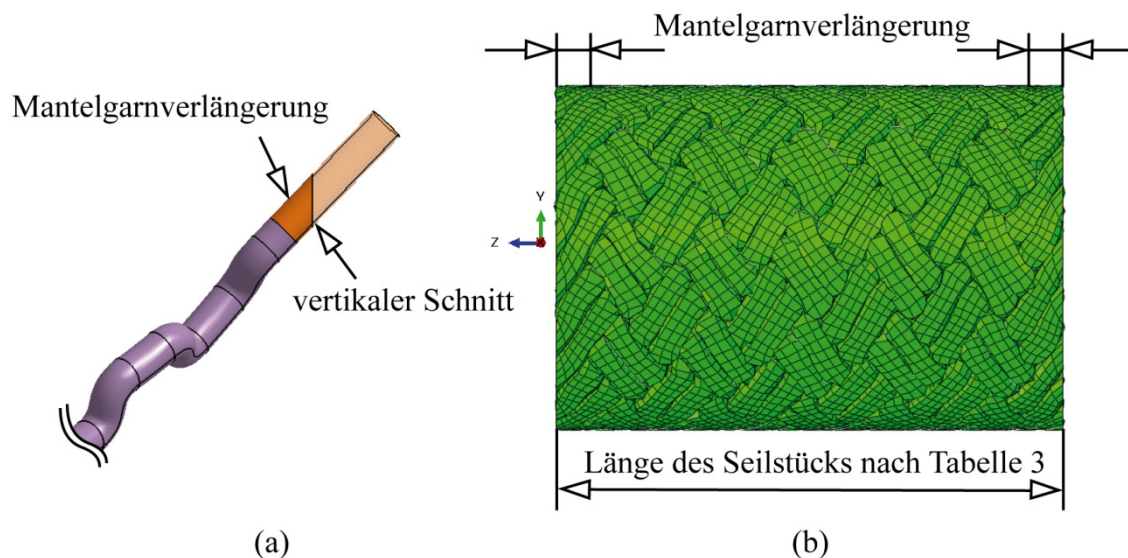


Abb. 3-3 Veranschaulichung der Mantelgarnverlängerung (a) für ein einzelnes Mantelgarn (violett) und die Mantelgarnverlängerung (orange) und (b) für ein Seilstück

Wie schon im vorherigen Kapitel erklärt, wurde für die Erzeugung des Mantelgarns ein kreisrunder Querschnitt entlang der Mantelgarnkurve extrudiert. Man erhält ein Mantelgarn ohne vertikale Stirnfläche (vertikaler Schnitt), siehe Abb. 3-3 (a) (violett). Würde das Mantelgarn so verwendet werden, so erhält man keine einheitliche gerade Stirnfläche am Seilstück. Ein Abschneiden dieser Mantelgarne ist nicht möglich, da dadurch beim Vernetzen der Geometrie Keile enthalten sein würden, die zu keinem sauberen Netz führen. Deshalb wurden die Stirnflächen der Mantelgarne verlängert und vertikal abgeschnitten, siehe Abb. 3-3 (a). Der Schnitt erfolgte auf der einen Seite bei 0 mm - 0,44 mm und auf der anderen Seite bei 16,5 mm+1,32 mm, was zu einer Gesamtlänge des Seilstücks von 18,26 mm führt. Man hat nun Mantelgarne (violett) mit einer Mantelgarnverlängerung (orange) und einer geraden Stirnfläche des Seilstücks, die sich gut vernetzen lassen. Der Kern wurde dementsprechend an

Ergebnisse

den Stirnflächen angepasst und verlängert, damit das gesamte Seilstück eine einheitliche Stirnfläche besitzt. Betrachtet man nun die Abb. 3-3 (b), so sieht man im Bereich der Mantelgarnverlängerung, dass die Mantelgarne dort länger sind als jene im mittleren Bereich der Seillänge.

Die Seildehnung $\varepsilon_{18,26\text{ mm}}$ für das Seilstück der Länge $L=18,26\text{ mm}$ wird nach Gl. (44) berechnet:

$$\varepsilon_{18,26\text{ mm}} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2 \cdot \text{Verschiebung in Referenzpunkten}}{\text{Seillänge}} = \frac{2 \cdot 1\text{ mm}}{18,26\text{ mm}} = 10,95\% \quad (44)$$

Da in der Simulation auf beiden Stirnflächen eine Verschiebung aufgebracht wird, muss die Längenänderung ΔL mal zwei gerechnet werden. Für eine Biegebelastung wird der Biegeradius R nach Gl. (45) berechnet:

$$R = \frac{\text{Seillänge}}{2 \cdot \sin(\text{Verschiebung in Referenzpunkten})} = \frac{18,26\text{ mm}}{2 \cdot \sin(17,5^\circ)} = 30,36\text{ mm} \quad (45)$$

die Krümmung κ wird nach der der Gl. (46) berechnet:

$$\kappa = \frac{1}{R} = 0,033 \left[\frac{1}{\text{mm}} \right] \quad (46)$$

3.1 Netzstudie

Nachfolgend wird eine Netzstudie mit der Seilgeometrie unter Zugbelastung durchgeführt, um herauszufinden, welche Netzgröße für nachfolgende Ergebnisse geeignet ist. Dafür wurde die Seilgeometrie mit unterschiedlichen Netzgrößen, siehe Tabelle 7, simuliert und ausgewertet.

Tabelle 7: Netzgröße für die Netzstudie

	Netzgröße [mm]		
	grob	mittel	fein
Garn eines Stranges	0,51	0,41	0,31
Mantelgarn	0,41	0,31	0,21

Damit der Mantel sich bei der Geometrieerstellung optimal an den Kern anlegt, wurde für den Mantel stets eine feinere Netzgröße als für den Kern gewählt. Um lokale Spannungen auszuwerten, wurde einerseits entlang eines Garns des Kerns und andererseits entlang eines Mantelgarns ein Pfad gelegt, an dem die Spannungen ausgewertet wurden, siehe Abb. 3-4.

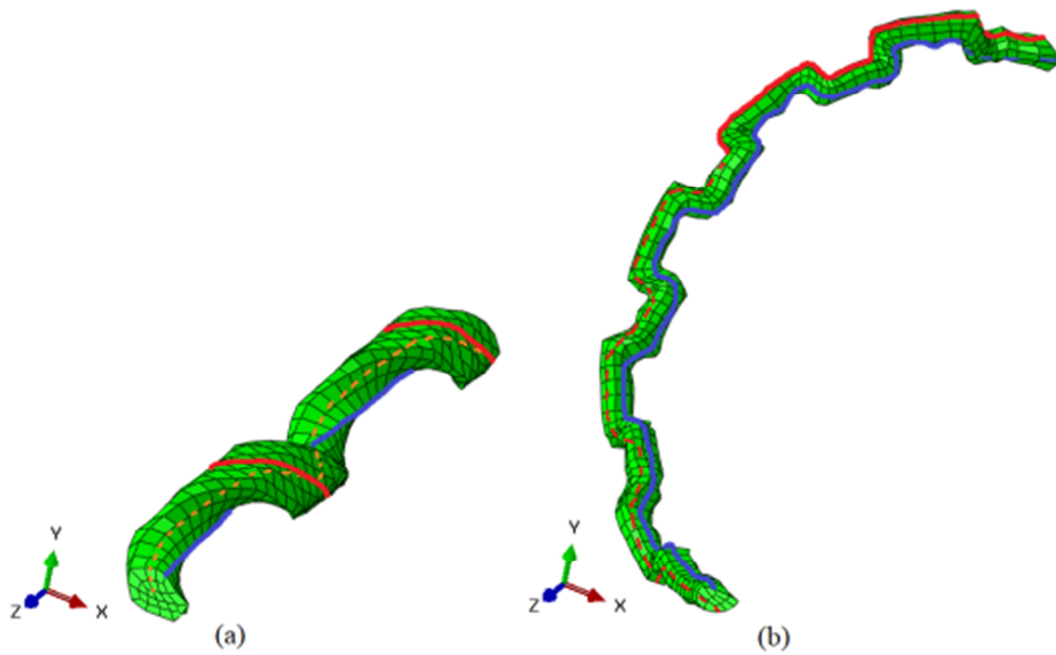


Abb. 3-4 Pfade schematisch gekennzeichnet an der Außenseite (rot), an der Innenseite (blau) und in der Mitte (orange) für (a) ein Garn des Kerns und (b) ein Mantelgarn

Das Mantelgarn rotiert entlang des Garns, weshalb der Pfad der Außenseite (rot), siehe Abb. 3-4 (b), einmal strichliert und das andere Mal als volle Linie zu sehen ist.

3.1.1 Zugbelastung

Man sieht die Ergebnisse der Verschiebungen (U3) und der Normaldehnungen (LE33) in Längsrichtung (Z-Richtung) für die Zugbelastung nach Tabelle 6, siehe Abb. 3-5. Die U3-Werte sind in mm angegeben und die LE33-Werte besitzen die Einheit 1. Die maximalen logarithmischen Dehnungen LE33 sind 12,2% und werden in einem der Garne im Kern erreicht.

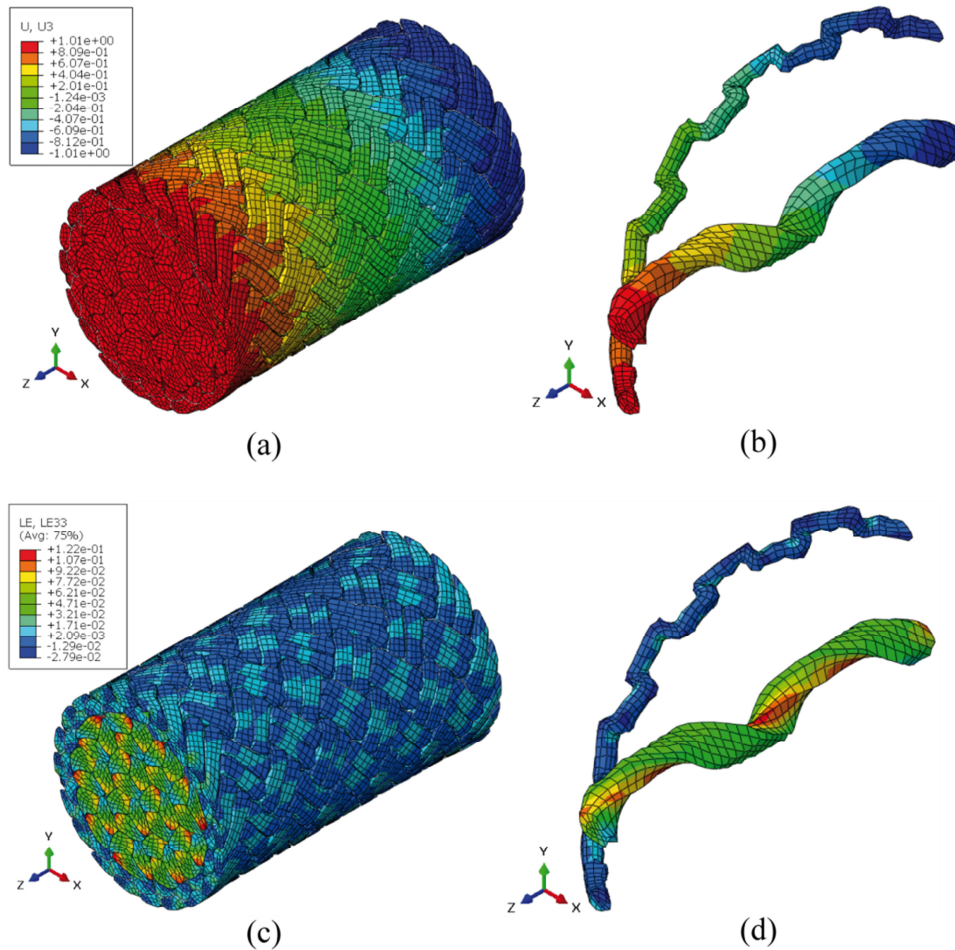


Abb. 3-5 Die Felder von Verschiebung in Z-Richtung (U3 in mm) für (a) das ganze Seilstück; (b) für ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn; und die Normaldehnungen in Z-Richtung (LE33) für (c) das ganze Seilstück und (d) ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn für eine Zugbelastung in Seilrichtung

Man erkennt, dass die Stirnflächen eine maximale Verschiebung in Z-Richtung (U3) von je 1 mm aufweisen und sich die Seilstückmitte fast nicht verschoben hat, siehe Abb. 3-5 (a). Für eine deutlichere Darstellung der nachfolgenden Spannungsauswertungen ist in Abb. 3-5 (b) das jeweilige Garn des Kerns und das Mantelgarn mit der Verschiebungsbelastung zu sehen. In Abb. 3-5 (c) ist die logarithmische Dehnung in Z-Richtung des Seilstücks und in Abb. 3-5 (d) die logarithmische Dehnung in Z-Richtung für ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn zu sehen. An den Stirnflächen ist das Seilstück wie vorher erwähnt eingespannt, was zu

Ergebnisse

Artefakten in diesem Bereich führt. Außerdem hat man im Modell eine Biegesteifigkeit, die in Wirklichkeit bei den einzelnen Garnen nicht vorhanden sind. Dies kann dazu führen, dass höhere Spannungen als in der Realität auftreten. So hat PA66 ungefähr eine Festigkeit von 100 MPa. Mit der aufgebracht Belastung von etwa 11% Längsdehnung und einer Krümmung, die einem Biegeradius von etwa 30 mm entspricht, ist man in einem Bereich, der über den typischen Belastungen eines Seils liegt. Trotzdem ist ein relativer Vergleich der Spannungen und der Steifigkeiten mit den folgenden Ergebnissen möglich.

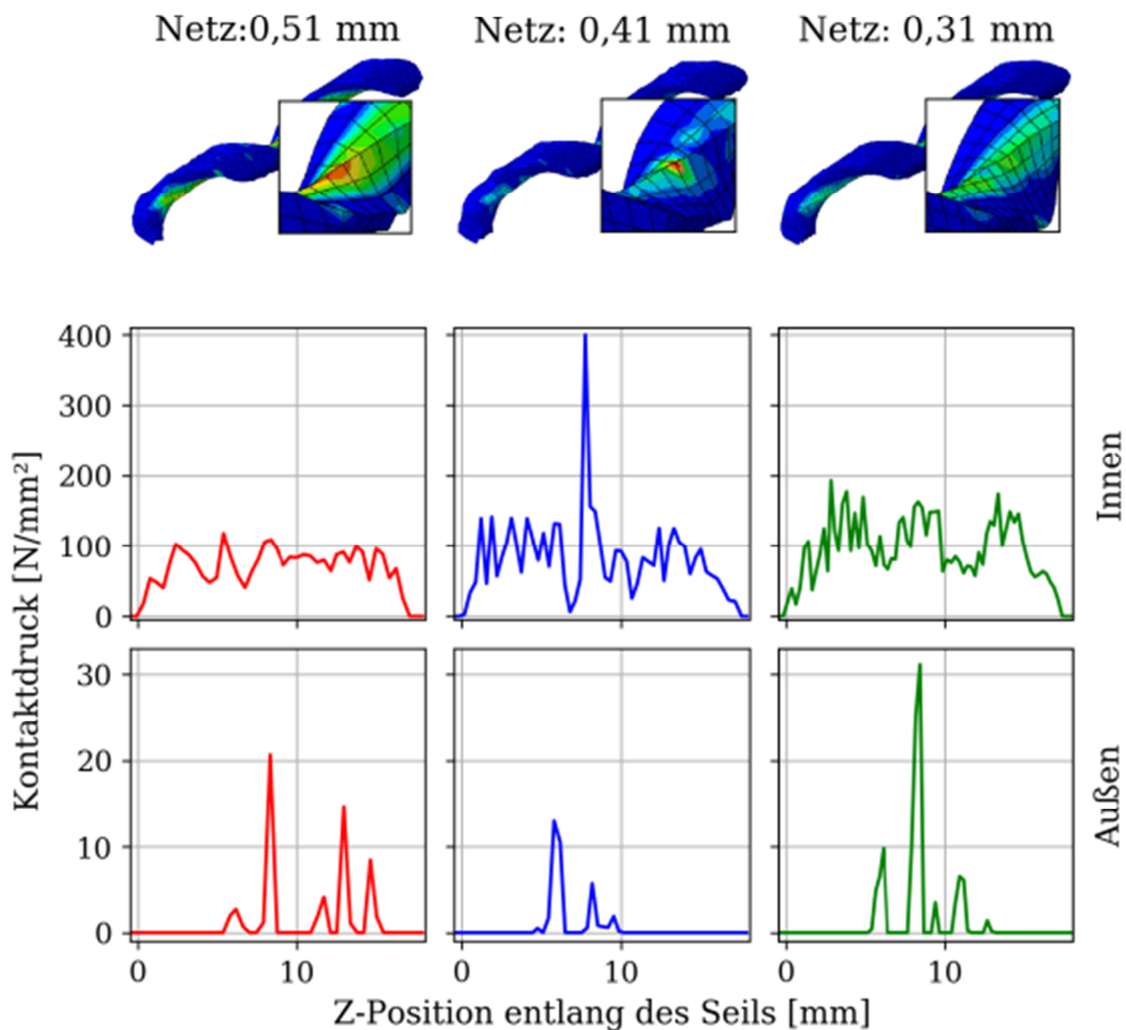


Abb. 3-6 Netzstudie; Kontaktdruck aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen

In Abb. 3-6 sieht man den Kontaktdruck eines Garns entlang der Pfade. Darunter ist die Innen- und Außenseite des Garnes nach dem Pfad der Abb. 3-4 (a) zu verstehen. Auf der Innenseite des Garnes bei grobem Netz (0,51 mm) tritt ein relativ gleichmäßiger Kontaktdruck auf. Je feiner das Netz wird, umso höher wird die Spannung und umso besser

Ergebnisse

wird die Spannungssituation abgebildet. Durch das Ziehen des Seilstücks, und daher ein Zusammenziehen des Querschnitts der einzelnen Stränge, ist an der Außenseite ein vernachlässigbarer Kontaktdruck mit einzelnen Ausreißern zu erkennen. Einzelne Knoten weisen einen sehr hohen Kontaktdruck auf, die eigentlich für die Zugbelastung von $\epsilon_{18,26 \text{ mm}} = 10,95\%$ kleiner sein müssten.

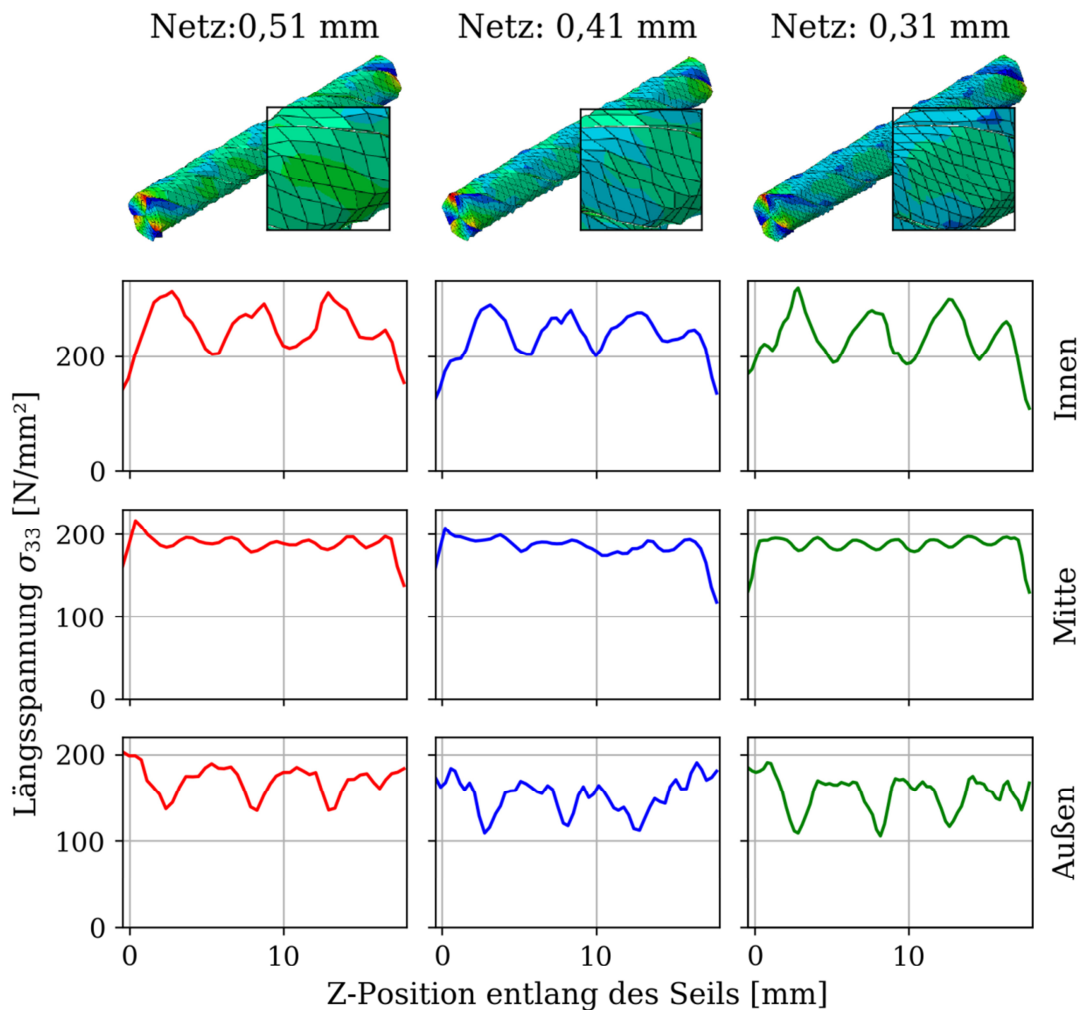


Abb. 3-7 Netzstudie; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen

Die Spannungen σ_{33} aufgetragen über die Position entlang der Längsachse des Pfades, siehe Abb. 3-4 (a), sind der Abb. 3-7 zu entnehmen. In den Bildern der Abbildung sind Stränge des Kerns zu sehen und nicht nur einzelne Garne. Die Diagramme gelten für ein einzelnes Garn. Die Oszillation der Spannungen ist durch die Schlaglänge der Garne zu begründen. An der Innenseite sind deutlich höhere Spannungen als auf der Außenseite zu sehen. An der Innenseite des Garns verläuft der Kraftfluss direkter als auf der Außenseite, weshalb an der

Ergebnisse

Innenseite des Garns mit ca. 220 MPa (im Mittel), deutlich höhere Spannungen aufgenommen werden als auf der Außenseite, wo dieselben Spannungen 170 MPa betragen. Außerdem wechseln sich die Spannungsberge und Spannungstäler auf der Innen- und Außenseite ab, weshalb sich in der Mitte des Garns eine annähernd gleichbleibende mittlere Längsspannung σ_{33} von ca. 190 MPa einstellt. Die Abweichung der äußeren und inneren Spannungen von den Spannungen in der Mitte können auf der einen Seite durch eine Biegung der Garne erklärt werden und auf der anderen Seite durch Kontaktspannungen mit anderen Garnen. Am Anfang sowie am Ende des Seilstücks tritt aufgrund der Einspannung an der Stirnfläche eine Abweichung von der Oszillation der Spannungen auf, die durch ein Abfallen beziehungsweise ein Ansteigen der Spannungen am Anfang und Ende des Seilstücks bemerkbar ist.

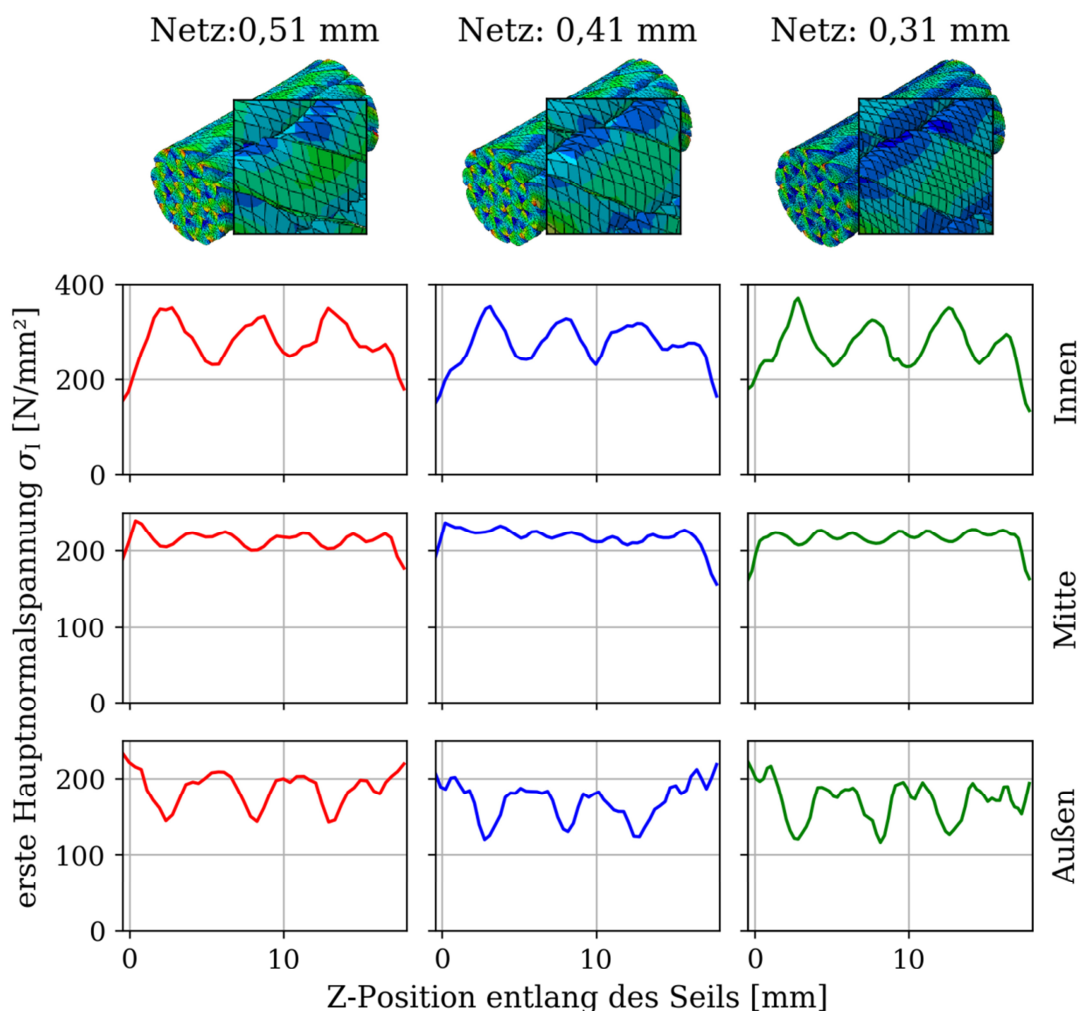


Abb. 3-8 Netzstudie; erste Hauptnormalspannungen σ_1 aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen

Auch die ersten Hauptnormalspannungen σ_1 entlang des Pfades eines Garns weisen eine Periodizität an der Innen- und Außenseite des Garns auf, siehe Abb. 3-8. In den Bildern der

Ergebnisse

Abbildung sind Seilkerne und nicht nur einzelne Garne zu sehen. Die Diagramme gelten für ein einzelnes Garn. Die Spannungsberge und die Spannungstäler der Innen- und Außenseite des Garnes heben sich in der Mitte des Garnes auf und bilden so eine annähernd gleichbleibende Spannung. Bei der hohen Dehnung von $\varepsilon_{18,26\text{ mm}} = 10,95\%$ tritt eine mittlere erste Hauptnormalspannung σ_I von ca. 220 MPa auf.

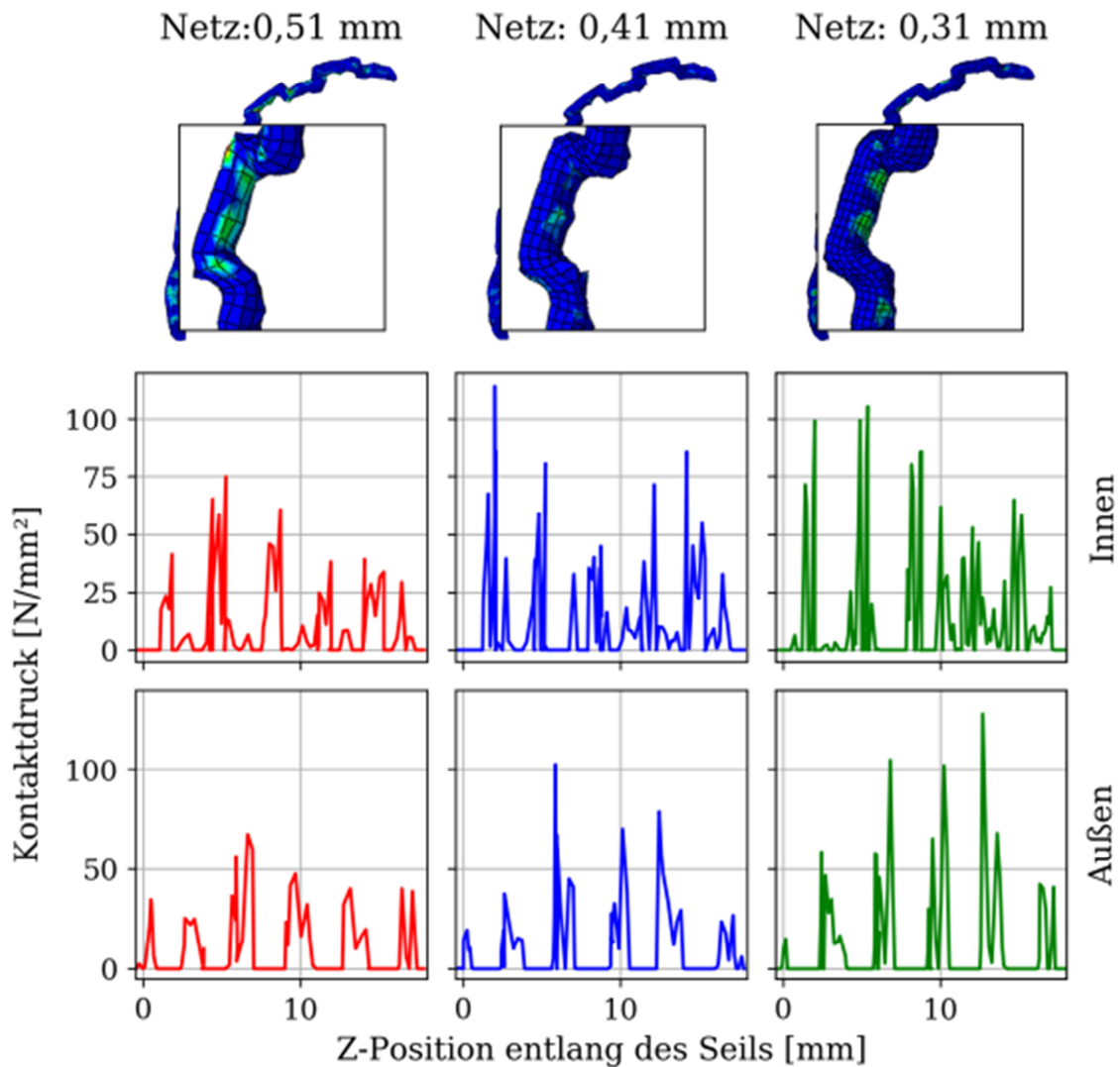


Abb. 3-9 Netzstudie; Kontaktdruck aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen

Der Kontaktdruck des Mantelgarns ist der Abb. 3-9 zu entnehmen. Dabei ist die Innen- und Außenseite des Mantelgarns nach dem Pfad der Abb. 3-4 (b) zu verstehen. Da die Mantelgarne verflochten sind, entsteht an der Innen- und Außenseite ein kontinuierliches Oszillieren der Spannungen. Das Mantelgarn steht sowohl mit den verflochtenen Mantelgarne an der Innenseite als auch mit dem Kern des Seils an der Außenseite in

Ergebnisse

Kontakt. Die Innenseite weist nur einen nennenswerten Kontaktdruck in jenen Bereichen auf, an denen ein anderes Mantelgarn anliegt. Durch eine Netzverfeinerung werden zwar die Bereiche des Kontaktes besser definiert, jedoch steigt dadurch auch die Anzahl der Ausreißer beziehungsweise die lokalen Spannungen. An der Außenseite ist der Kontaktdruck in klare Bereiche geteilt und ändert sich durch eine Verfeinerung des Netzes nicht signifikant.

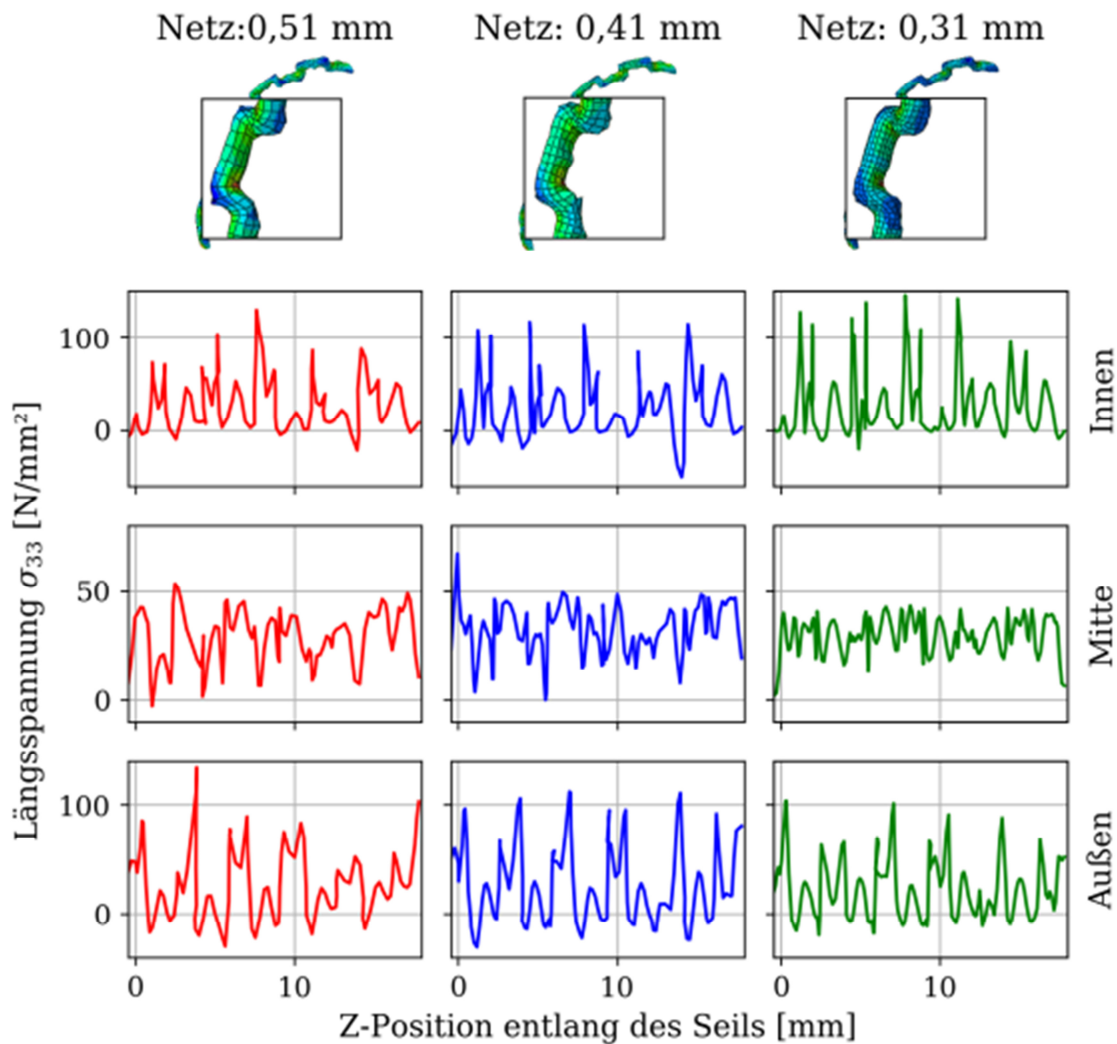


Abb. 3-10 Netzstudie; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen

Das Mantelgarn weist aufgrund der Verflechtung und der höheren Zykluslänge wie zu erwarten geringere Spannungen als ein Garn des Kerns auf, siehe Abb. 3-10. Die mittlere Längsspannung σ_{33} in der Mitte des Mantelgarns beträgt ca. 30 MPa. Im Gegensatz dazu weisen die Garne des Kerns eine mittlere Längsspannung σ_{33} von ca. 190 MPa auf. Auch am Mantelgarn ist ein Oszillieren der Spannungen an der Innen- und Außenseite zu erkennen. Durch die starke Verflechtung der Mantelgarne, die aufeinander drücken und dadurch

Ergebnisse

gebogen werden, kommt es zu einer Oszillation der Spannungen, wobei die Frequenz und die Amplitude deutlich höher sind als bei den Garnen des Kerns. Die Spannungsberge und Spannungstäler auf der Innen- und Außenseite wechseln sich ab, weshalb sich in der Mitte des Mantelgarnes mit feiner werdendem Netz eine relativ gleichbleibende Spannung einstellt. Am Anfang sowie am Ende des Seilstücks tritt aufgrund der Einspannung an der Stirnfläche eine Abweichung der oszillierenden Spannungen auf, die durch ein Abfallen beziehungsweise ein Ansteigen der Spannungen am Anfang und Ende des Seilstücks bemerkbar ist.

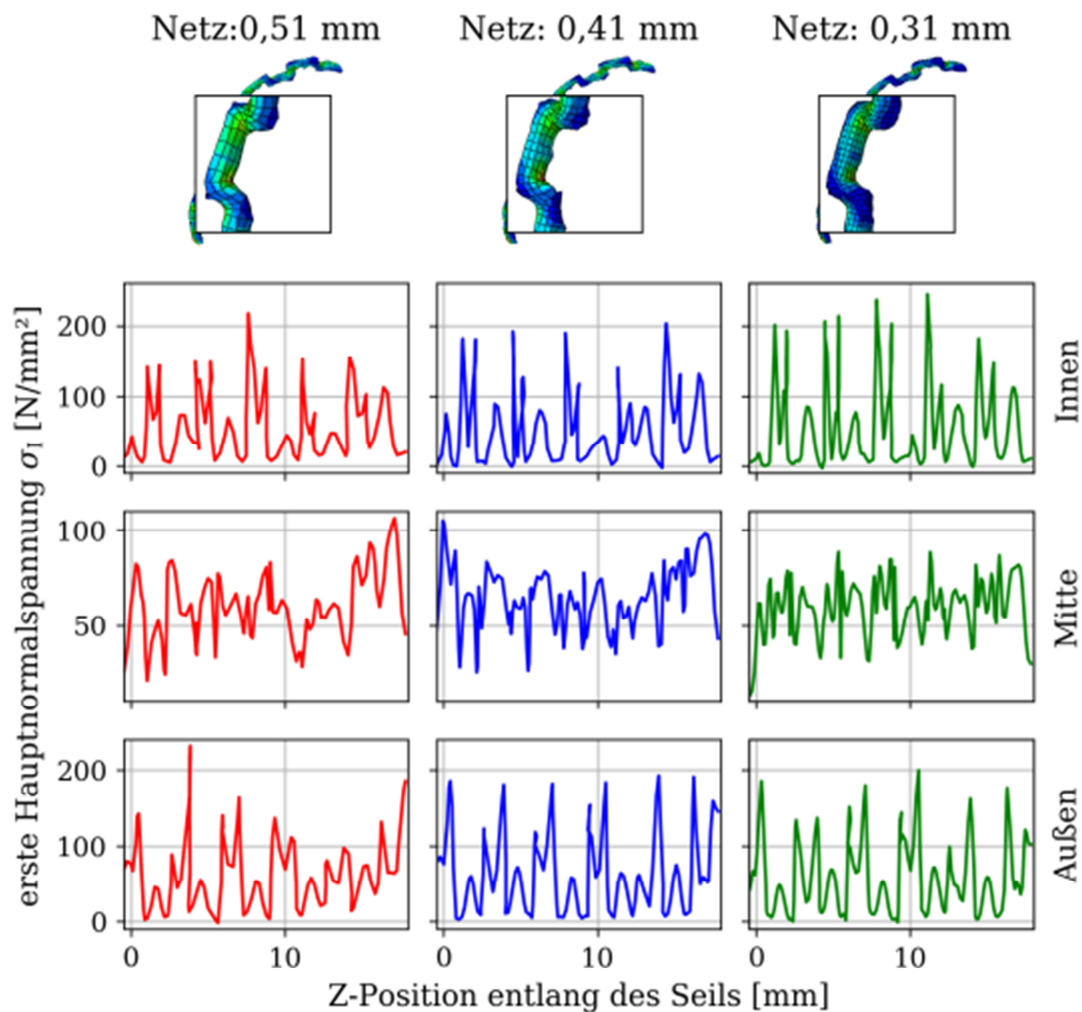


Abb. 3-11 Netzstudie; erste Hauptnormalspannungen σ_1 aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen

Auch die ersten Hauptnormalspannungen entlang des Pfades eines Mantelgarns weisen ein Oszillieren an der Innen- und Außenseite des Garnes auf, siehe Abb. 3-11. Die mittlere erste Hauptnormalspannung σ_1 in der Mitte des Mantelgarns beträgt ca. 60 MPa. Im Gegensatz dazu weisen die Garne des Kerns eine mittlere erste Hauptnormalspannung σ_1 von ca. 220 MPa auf. Die Spannungsberge und die Spannungstäler der Innen- und Außenseite des

Ergebnisse

Garnes heben sich in der Mitte des Mantelgarnes auf und bilden so eine Superpositionierung der Innen- und Außenseite über den Querschnittsmittelpunkt entlang des Garnes. Lediglich die ersten Hauptnormalspannungen σ_I an der Innenseite des Garnes sind deutlich höher als die Zugspannungen σ_{33} in Richtung der Längsachse. Eine Änderung der Netzgröße stellt allerdings keine signifikante Änderung der Spannungen dar.

Zusammenfassend kann über die Spannungsverteilung bei einer Verfeinerung des Netzes folgendes gesagt werden: Die Bereiche des Kontaktdruckes werden mit feinerem Netz detaillierter und die lokalen Spannungen steigen. Die Anzahl an Spannungsausreißern häuft sich speziell beim Kontaktdruck. Sowohl die oszillierenden Spannungen und die Spannungen bei halber Länge des Seilstücks als auch bei den Stirnflächen, mit deren Randbedingungen der Einspannung und der Mantelgarnverlängerung, werden mit feinerem Netz detaillierter abgebildet. Die Verfeinerung des Netzes bringt jedoch einen enormen Anstieg der Berechnungszeit mit sich. Um möglichst genaue Spannungen zu erhalten, entschied ich mich dafür, die weiteren Modelle mit einer Netzgröße von 0,31 mm zu erstellen. Da die benutzten Elemente lineare Elemente sind und in Abaqus Explizit keine quadratischen Hexaederelemente verwendet werden können, ist es umso besser, wenn für die spätere Simulation der Seilbiegung, siehe Kap. 3.2, ein feineres Netz zur Verfügung steht. Der Kraft-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm für die unterschiedlichen Netzgrößen kann der Abb. 3-12 entnommen werden.

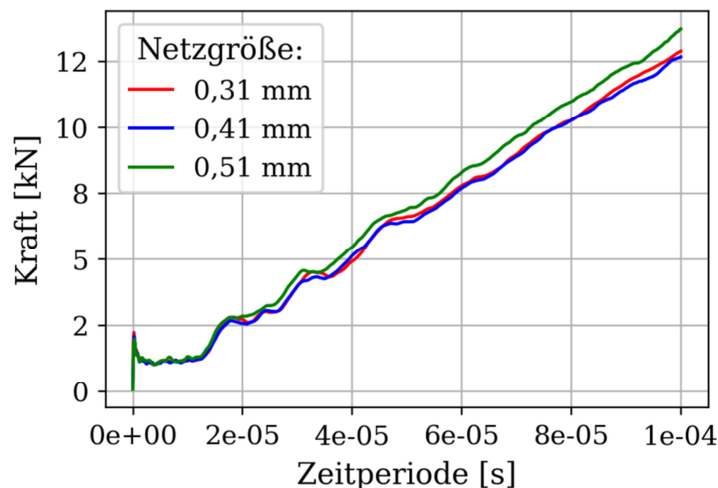


Abb. 3-12 Kraft-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm für die Netzstudie

Die Verschiebung wird an den Stirnflächen eingebracht, wodurch eine Kraft entsteht. Die Kraft hat so wie die aufgebrachte Verschiebung über die Zeit eine annähernd lineare Zunahme. Durch die abrupte Einbringung der Kraft tritt vor allem am Anfang eine Kraftspitze auf, die im Laufe der Simulation abklingt. Die maximal eingebrachte Kraft F und die

Ergebnisse

Zugsteifigkeiten $S_{Zug\ 18,26\ mm}$ nach Gl. (49) für die unterschiedlichen Netzgrößen des Seilstücks der Länge $L=18,26\ mm$ können der Tabelle 8 entnommen werden.

$$S_{Zug\ 18,26\ mm} = \frac{F}{\varepsilon_{18,26\ mm}} \quad (49)$$

Tabelle 8: Maximal eingebrachte Kraft F und Steifigkeit S_{Zug}

Netzgröße	Max. Kraft F	Steifigkeit S_{Zug}
0,31 mm	12,87 kN	117.534 N
0,41 mm	12,65 kN	115.525 N
0,51 mm	13,71 kN	125.205 N

3.1.2 Studie der Randeffekte: Längenstudie

Um festzustellen, ob sich durch die Randbedingungen an den Stirnflächen dieselben Spannungen in der Seilmitte ergeben, wurde das Seilstück von $L=18,26\ mm$ auf $L=34,76\ mm$ verlängert und die Belastung gleich belassen, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Parameter für die weitere Simulation

Länge des Seilstücks	34,76 mm	Längsdehnung $\varepsilon_{34,76\ mm}=11,51\%$
Netzgröße	0,31 mm	
Verschiebung in Referenzpunkten	2 mm	

Die Dehnung für das Seilstück aus der Netzstudie der Länge $L=18,26\ mm$ beträgt $\varepsilon_{18,26\ mm}=10,95\%$. Im direkten Vergleich dazu ist die Dehnung $\varepsilon_{34,76\ mm}$ für ein Seilstück der Länge $L=34,76\ mm$ $\varepsilon_{34,76\ mm}=11,51\%$.

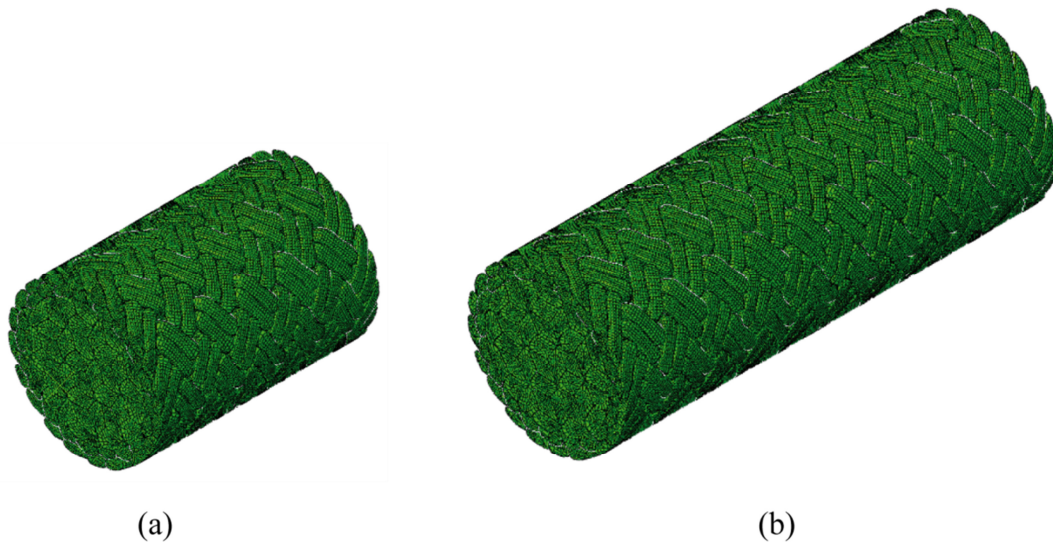


Abb. 3-13 Übersicht zweier Seilstücke zum Längenvergleich (a) Länge 18,26 mm (b) Länge 34,76 mm

Die kinetische Energie ist bei einer Seillänge von 34,76 mm hinreichend klein, um keine dynamischen Trägheitseffekte in das Modell einzubringen, siehe Abb. 3-14.

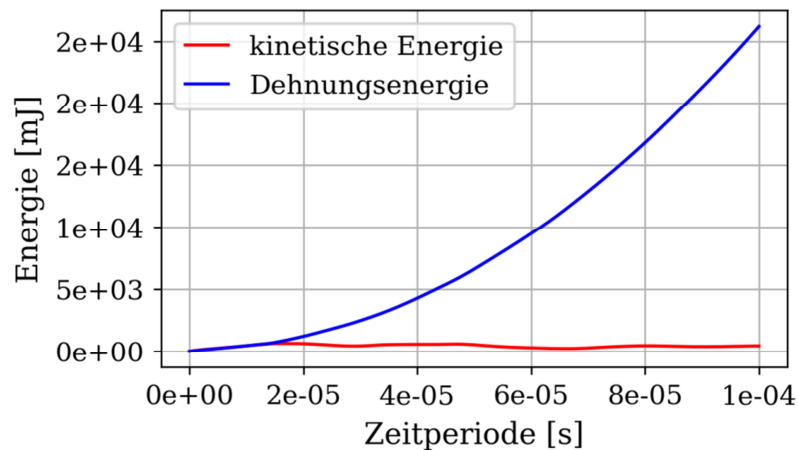


Abb. 3-14 Kinetische Energie und Dehnungsenergie über die Zeitperiode T für Ziehen mit der Seillänge $L=34,76$ mm

Um die zwei Seilstücke miteinander zu vergleichen, wurde bei Zugbelastung der Kontaktdruck für ein Garn des Kerns (Abb. 3-16), die Längsspannung σ_{33} für ein Garn des Kerns, siehe Abb. 3-17, die erste Hauptnormalspannung σ_1 für ein Garn des Kerns (Abb. 3-18), der Kontaktdruck für ein Mantelgarn (Abb. 3-19), die Längsspannung σ_{33} für ein Mantelgarn (Abb. 3-20), und die erste Hauptnormalspannung σ_1 für ein Mantelgarn (Abb. 3-21) für das Seilstück der Länge $L=18,26$ mm und das Seilstück der Länge $L=34,76$ mm gegenübergestellt. Der Kraft-Zeit Verlauf eines Seilstücks mit der Länge $L=18,26$ mm und eines Seilstücks der Länge $L=34,76$ mm mit je einer Netzgröße von 0,31 mm kann der Abb. 3-15 entnommen werden.

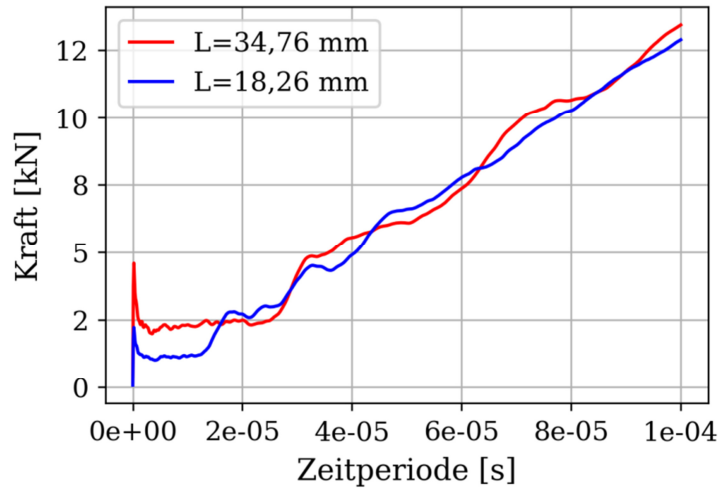


Abb. 3-15 Kraft-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm und $L=34,76$ mm bei einer Netzgröße von $0,31$ mm bei annähernd selber Seildehnung ε .

Man erkennt, dass der Kraftanstieg für die beiden Seilstücke annähernd linear ist und die maximale Kraft $F_{18,26\text{ mm}}=12,87$ kN und $F_{34,76\text{ mm}}=13,42$ kN ist. Daraus kann die Zugsteifigkeit S_{Zug} nach Gl. (48) für das Seilstück der Länge $L=18,26$ mm und nach Gl. (49) für das Seilstück der Länge $L=34,76$ mm errechnet werden:

$$S_{Zug\ 18,26\text{ mm}} = \frac{F_{18,26\text{ mm}}}{\varepsilon_{18,26\text{ mm}}} = \frac{12,87\text{ kN}}{10,95\%} = 117.534\text{ N} \quad (48)$$

$$S_{Zug\ 34,76\text{ mm}} = \frac{F_{34,76\text{ mm}}}{\varepsilon_{34,76\text{ mm}}} = \frac{13,42\text{ kN}}{11,51\%} = 116.594\text{ N} \quad (49)$$

Damit sieht man, dass die Zugsteifigkeiten der Seile annähernd gleich sind, also die Randeffekte keinen großen Einfluss auf Steifigkeiten haben. Der gemittelte Elastizitätsmodul \bar{E}_{Zug} über das Seilstück bei Zugbelastung lässt sich nach Gl. (50) berechnen, wobei A die Fläche des Querschnitts mit dem simulierten Seildurchmesser $D_{Seil,simuliert}=12,39$ mm und φ_{PA} der Füllgrad ist.

$$\bar{E}_{Zug} = \varphi_{PA} * \frac{S_{Zug\ 18,26\text{ mm}}}{A} = \varphi_{PA} * \frac{S_{Zug\ 18,26\text{ mm}}}{\frac{D_{Seil,simuliert}^2 * \pi}{4}} = 941,7\text{ MPa} \quad (50)$$

Ein Zylinder mit dem Elastizitätsmodul \bar{E}_{Zug} und dem Durchmesser $D_{Seil,simuliert}$ hat die gleiche Zugsteifigkeit wie das modellierte Seil.

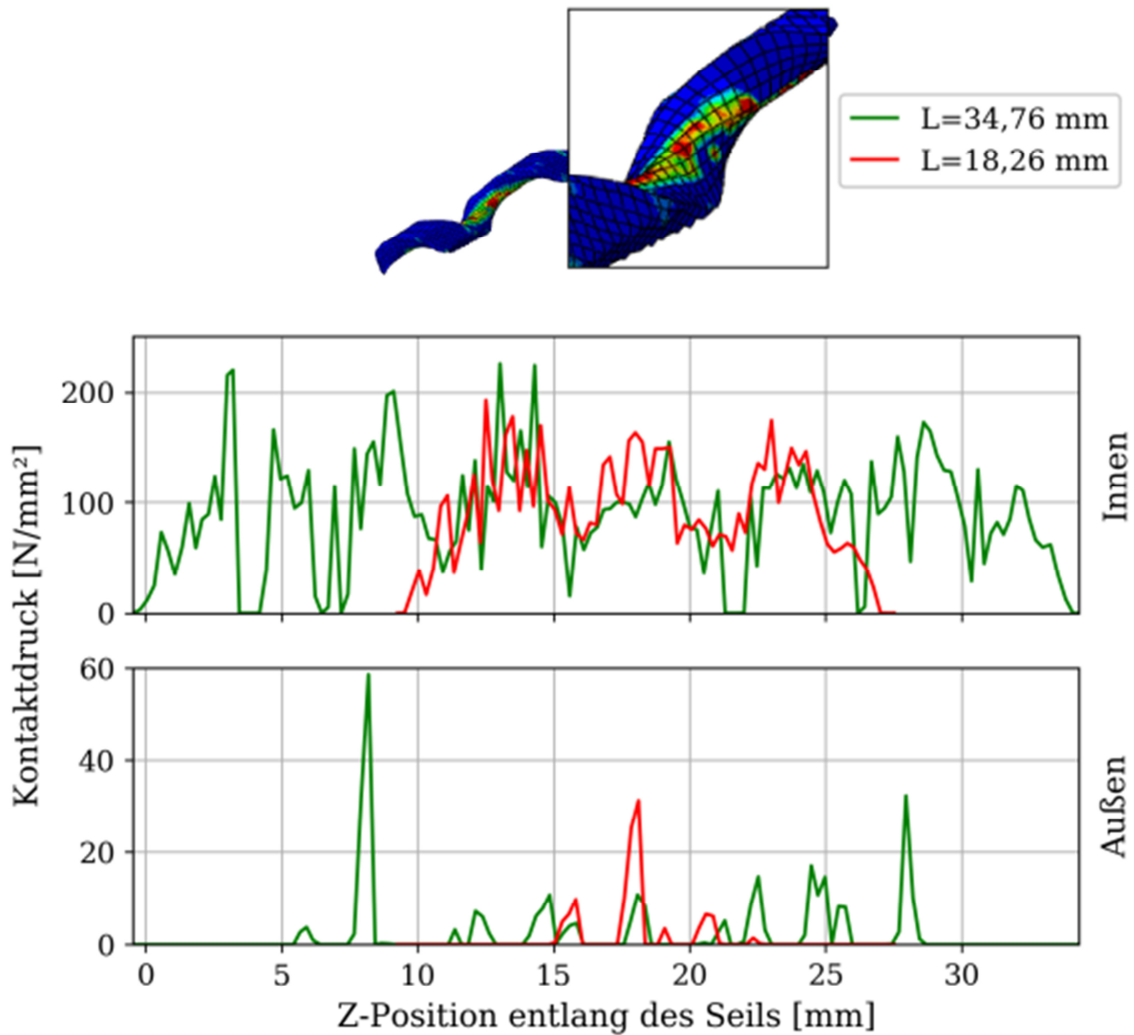


Abb. 3-16 Zugbelastung; Kontaktdruck aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen

Im Folgenden werden die Spannungen und Kontaktdrücke der Seile mit unterschiedlichen Längen so übereinander gelegt, dass das kürzere Seil ca. in der Mitte des längeren liegt und die einzelnen Garne an den gleichen Positionen liegen. Der Kontaktdruck eines Garns des Kerns ist beim längeren Seilstück nicht maßgeblich anders als bei dem kurzen Seilstück, siehe Abb. 3-16. Vereinzelt sind einige Ausreißer zu sehen, jedoch bleibt der Kontaktdruck annähernd auf demselben Niveau. Entlang des äußeren Pfades ist der Kontaktdruck aufgrund der Schrumpfung des Querschnittes bei Zugbelastung vernachlässigbar. Die Kontaktdrücke werden nicht als wichtig erachtet, weshalb nachfolgend die Längsspannungen σ_{33} verglichen werden.

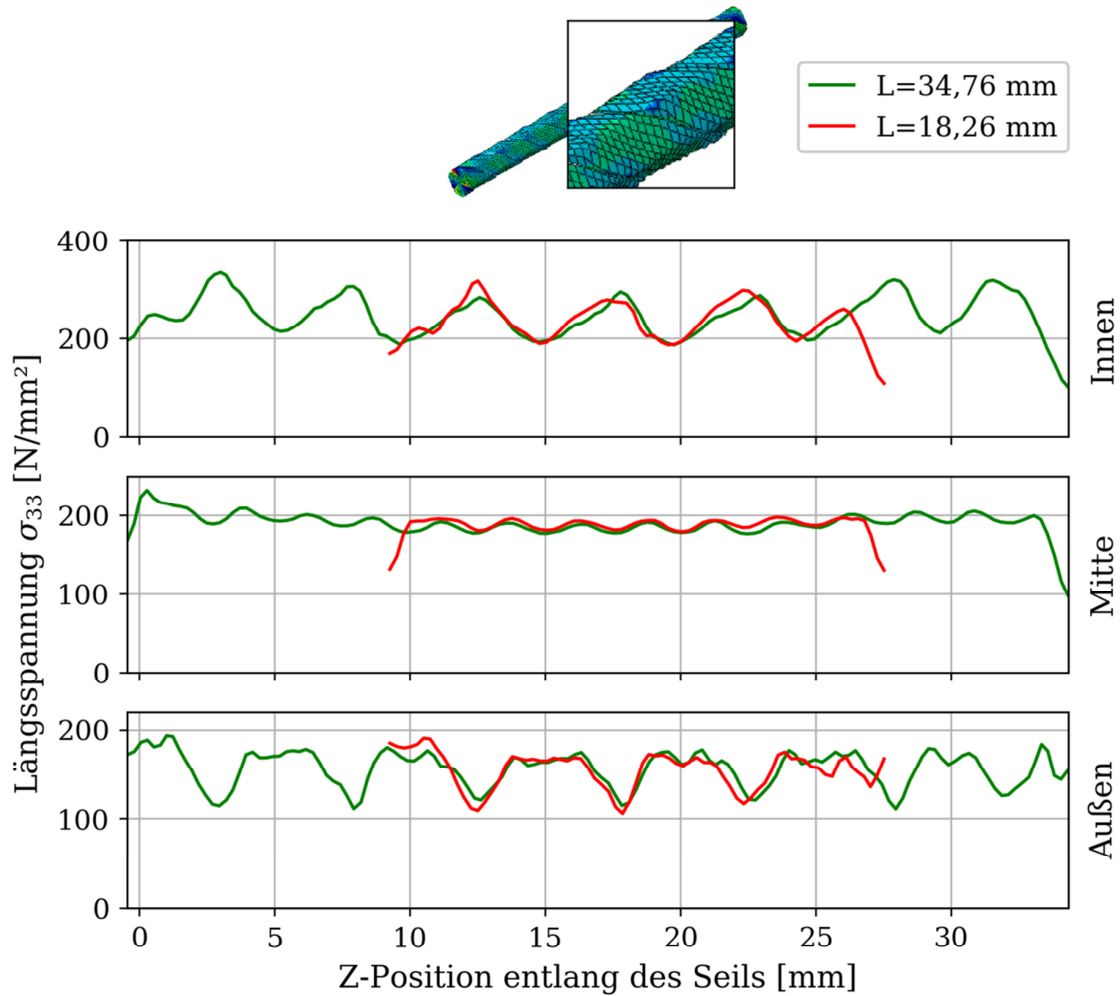


Abb. 3-17 Zugbelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen

Die unterschiedliche Länge hat keinen Einfluss auf die Oszillation der Längsspannungen σ_{33} genommen, siehe Abb. 3-17. So sind die Spannungen an den Rändern gleich jenen in der Seilmitte. Daraus folgt, dass die Einspannung an der Stirnfläche eines Garns des Kerns keinen Einfluss durch die unterschiedliche Länge erfahren hat. Dies war zu erwarten, denn lediglich das Mantelgarn hat durch den Aufbau der Geometrie eine Mantelgarnverlängerung an den Stirnflächen erhalten.

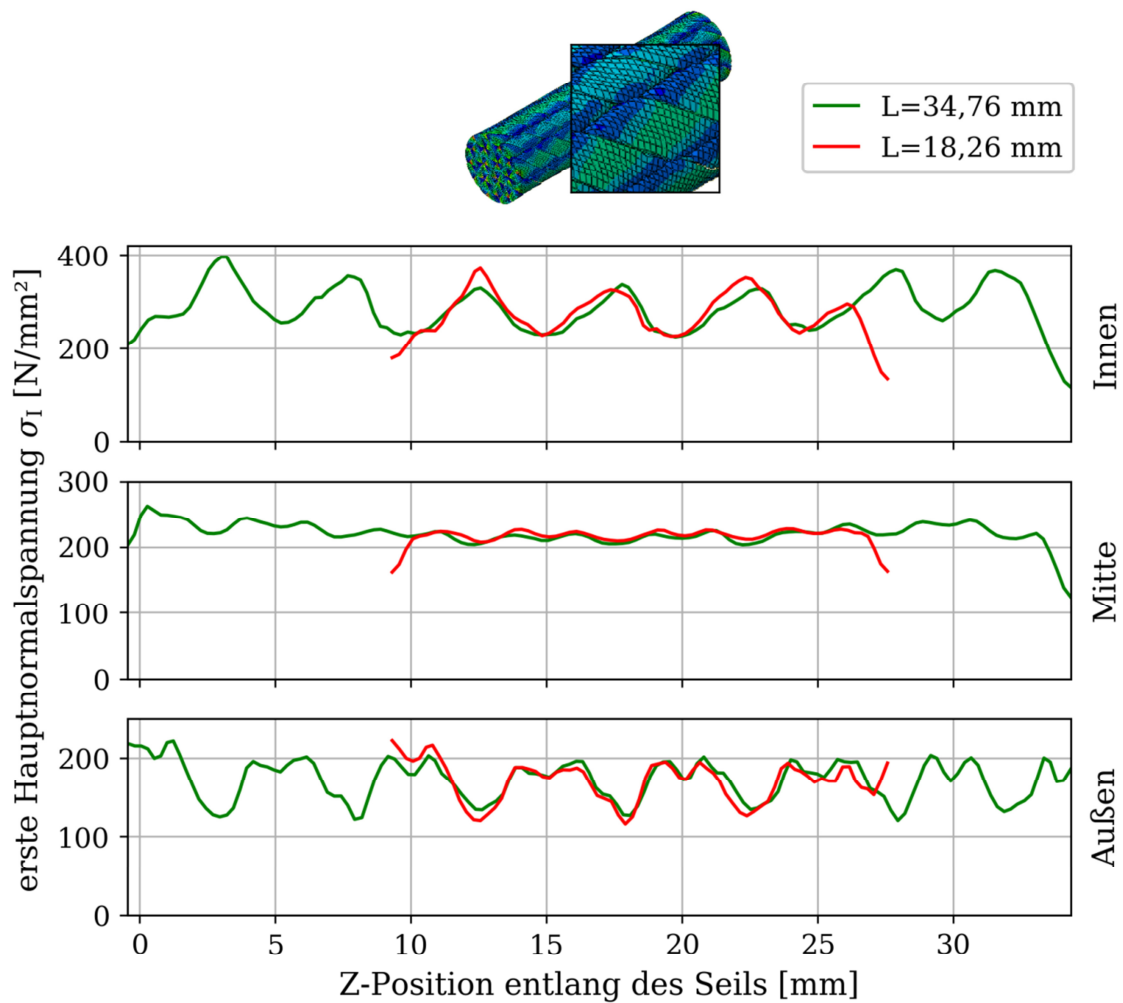


Abb. 3-18 Zugbelastung; erste Hauptnormalspannungen σ_1 aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen

Auch die ersten Hauptnormalspannungen σ_1 weisen an den Stirnflächen durch die unterschiedliche Länge keine signifikante Änderung auf, siehe Abb. 3-18. Das periodische Oszillieren der Spannungen bleibt für das längere Seilstück erhalten und die σ_1 -Werte liegen annähernd übereinander.

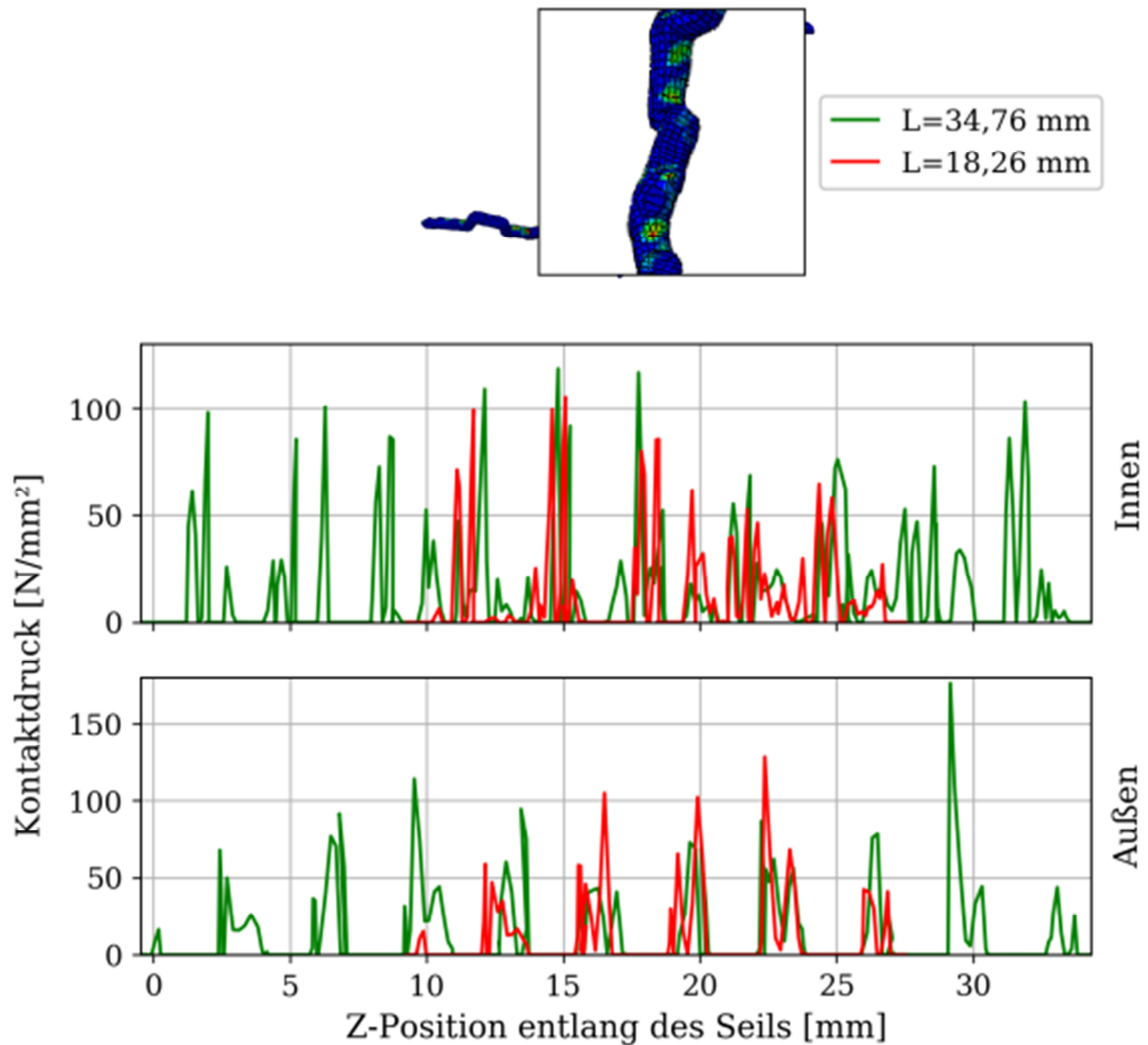


Abb. 3-19 Zugbelastung; Kontaktdruck aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen

Der Kontaktdruck an einem Mantelgarn des längeren Seilstücks weist keine deutlichen Veränderungen durch die unterschiedliche Länge auf, siehe Abb. 3-19. Auf der Innenseite des Mantelgarns ist das Oszillieren der Spannungen auf den ersten Blick nicht so leicht zu erkennen. Dieses Verhalten ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich der Mantel durch die verflochtene Struktur eher zum Kern hin verformt und dadurch die Innenseite des Mantelgarns am Kern einen Kontaktdruck erhält. Auf der Außenseite des Mantelgarns sieht man deutlich, wie das Mantelgarn abwechselnd belastet beziehungsweise unbelastet ist.

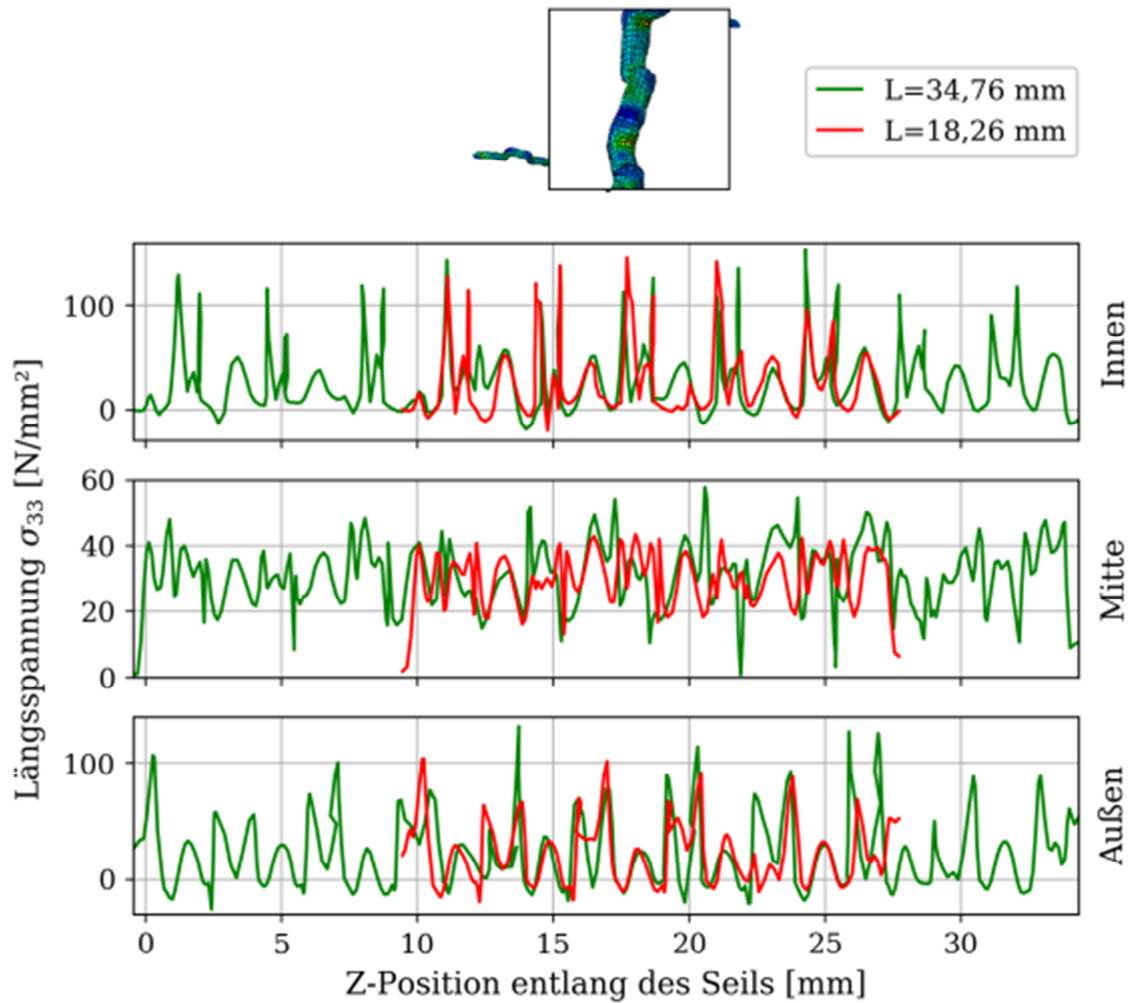


Abb. 3-20 Zugbelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen

Die Normalspannungen σ_{33} an einem Mantelgarn entlang des Pfades, in Richtung der Längsachse sind in Abb. 3-20 dargestellt. Diese Verläufe liegen relativ gut übereinander. Einige Ausreißer sind doch unterschiedlich, jedoch ist bei der halben Seillänge eine gute Übereinstimmung sichtbar. Das bedeutet, dass die Spannungssituation im kürzeren Seil relativ gut abgebildet wurde.

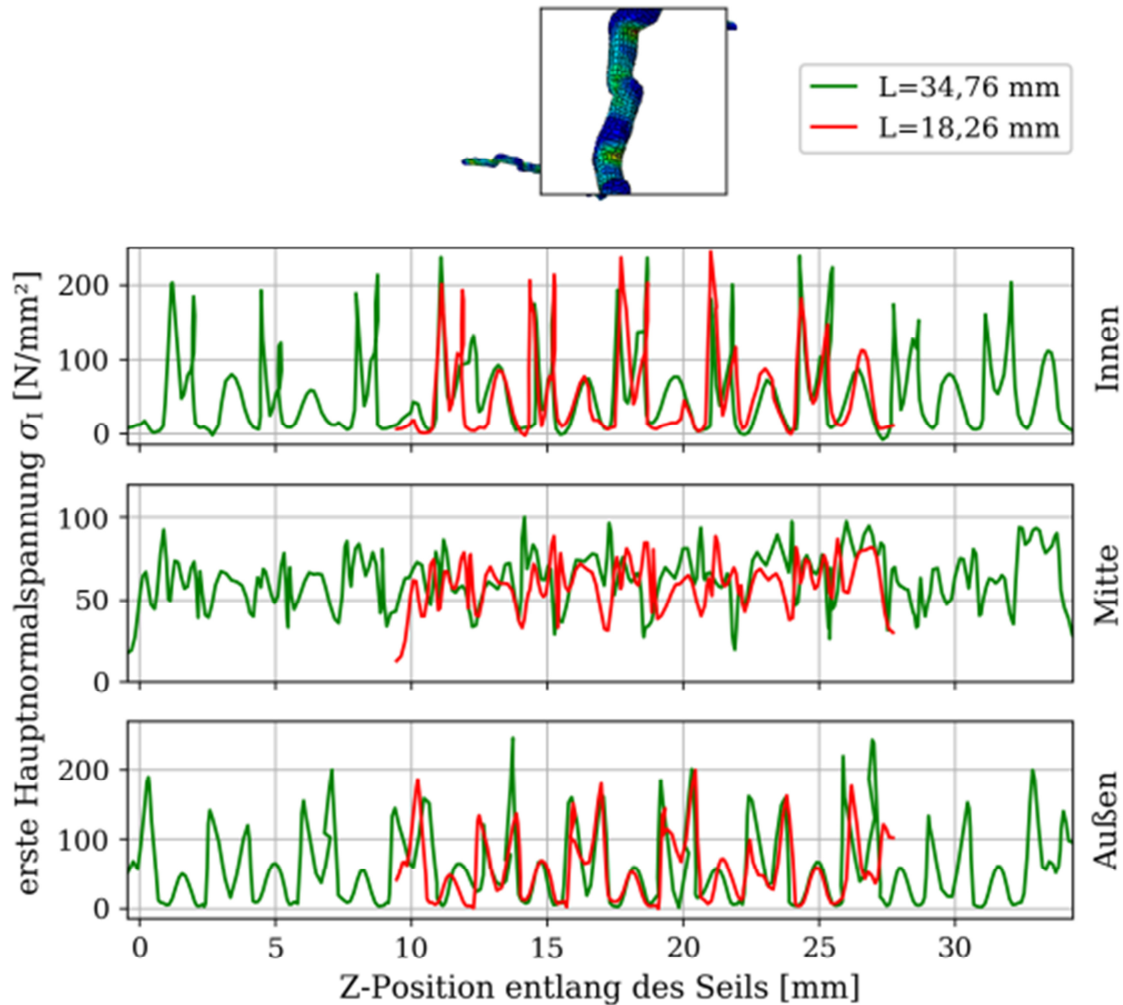


Abb. 3-21 Zugbelastung; erste Hauptnormalspannungen σ_1 aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen

Auch die ersten Hauptnormalspannungen σ_1 am Mantelgarn entlang des Pfades weisen ein zu erwartendes Oszillieren auf, siehe Abb. 3-21. Die σ_1 des kurzen und des langen Seilstücks liegen relativ genau übereinander.

Zusammenfassend kann folgendes über die unterschiedliche Länge des Seilstücks gesagt werden: Ein Garn des Kerns erfährt durch die unterschiedliche Länge nur kleine Änderungen des Kontaktdrucks an der Außen- beziehungsweise Innenseite des Garns und kleine Spannungsänderungen an den Stirnflächen. Die Längsspannungen σ_{33} und die ersten Hauptnormalspannungen σ_1 weisen durch die unterschiedliche Länge des Seilstücks nur kleine Unterschiede auf. Man erkennt, dass die Spannungen in der Mitte des kurzen und langen Seilstücks nicht exakt sind. Da sich ein derartiges periodisches Oszillieren der Spannungen einstellt und sowohl eine volle Zykluslänge des Mantelgarns als auch die volle Schlaglänge eines Garns des Kerns innerhalb des Seilstücks der Länge $L=34,76$ mm enthalten ist, kann vorausgesagt werden, dass sich dieses Verhalten über eine beliebige Länge des

Ergebnisse

Seilstücks periodisch wiederholt und somit keine weitere Simulation mit längeren Seilstücken nötig ist. Hinzuzufügen ist noch, dass man über die gesamte Seillänge erkennt, dass die Garne des Kerns deutlich mehr Spannung aufnehmen als die Mantelgarne. Dies ist jedoch nicht unvorhersehbar gewesen, da genau dieses Verhalten ein Kernmantelseil auszeichnet.

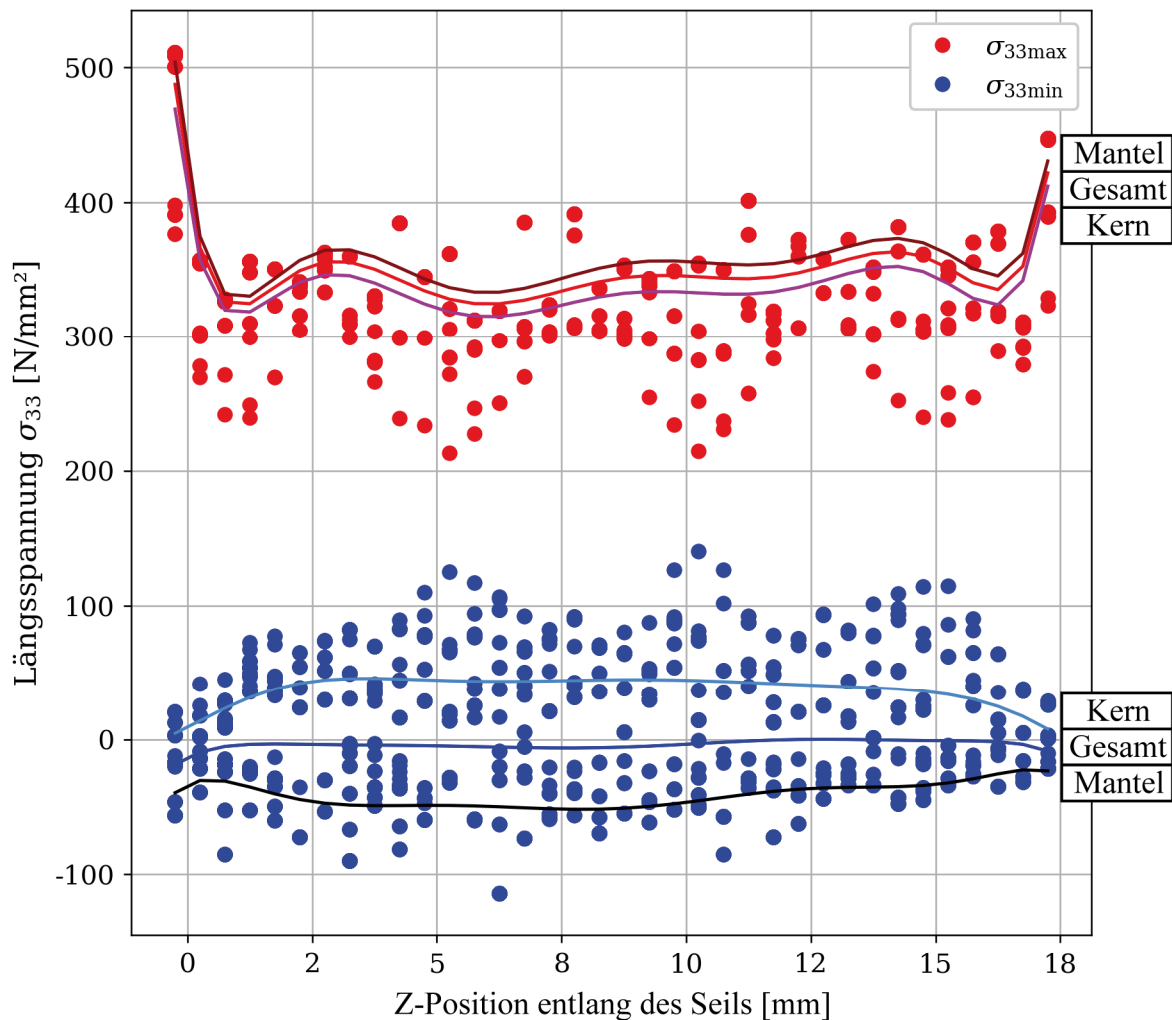


Abb. 3-22 Punktwolke der Längsspannungen σ_{33} separat aufgetragen für alle Garne des Seilstücks $L=18,26$ mm bei Zugbelastung, entlang des Seils

Um noch etwaige Randeffekte an den Stirnflächen zu überprüfen, hervorgerufen durch die Randbedingungen der Einspannung und der Mantelgarnverlängerung, wurde eine Punktwolke der lokalen Längsspannungen σ_{33} entlang der Längsachse dargestellt, siehe Abb. 3-22. Obwohl der Kern im Mittel deutlich mehr Längsspannungen aufnimmt als der Mantel, treten im Mantel relativ hohe lokale Biegespannungen innerhalb eines Mantelgarne auf. Es wurde das Seilstück in viele „Scheiben“ entlang der Längsachse geschnitten und die Spannung $\sigma_{33\max}$ (rot) und die Spannung $\sigma_{33\min}$ (blau) in diesem Bereich ausgewertet. In der Abb. 3-23 sieht man eine schematische Darstellung eines Seilstücks, welches in Scheiben geschnitten wurde.

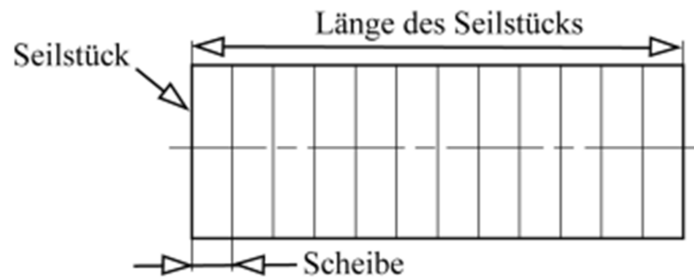


Abb. 3-23 Schematische Darstellung für das Schneiden des Seilstücks in Scheiben

Das Seilstück für die Seillänge $L = 18,26$ mm wurde in $0,5$ mm lange Scheiben geschnitten. Daraus ergaben sich 36 Scheiben, mit einem Punkt an einer Z-Position für jedes Garn. In der Abb. 3-22 erkennt man, dass die horizontale Achse (Z-Position entlang des Seils) kleiner Null ist, beziehungsweise der Länge $L=18,26$ mm entspricht. Dies kommt durch die zuvor beschriebene Mantelgarnverlängerung zustande. Ein roter Punkt beschreibt die maximale Spannung σ_{33max} entlang des Seils in jenem Bereich der Scheibe, wohingegen ein blauer Punkt die minimale Spannung σ_{33min} entlang des Seils in jenem Bereich beschreibt. Das bedeutet, dass für jedes Garn des Kerns und jedes Mantelgarn eine Maximalspannung und eine Minimalspannung je Scheibe dargestellt sind. Durch die Polynomiale Regression achten Grades der Maximal- und Minimalwerte erkennt man einen Verlauf der maximalen und minimalen Spannungen entlang der Seillänge. In der Seilmitte sind diese Werte annähernd gleichbleibend. Lediglich am Rand erkennt man ein Ansteigen der Maximalspannungen beziehungsweise ein Abfallen der Minimalspannungen. Daraus folgt, dass die Mantelgarnverlängerung und die Einspannung der Stirnflächen als „Rigid Body“ Spannungsabweichungen an den Stirnflächen auslösen. Um nun herauszufinden, ob die Garne des Kerns oder die Mantelgarne den größeren Einfluss darauf ausüben, wurden separate Kurven für alle Garne des Kerns und alle Mantelgarne erzeugt.

Es ist deutlich zu sehen, dass die Garne des Kerns ein stärkeres Ansteigen beziehungsweise Abfallen der Spannungen an den Stirnflächen besitzen, siehe Abb. 3-22. So sind die Minimalspannungen der Mantelgarne annähernd gleichbleibend über die Z-Koordinate. Die Garne des Kerns nehmen mehr Belastung auf als die verflochtenen Mantelgarne und verringern bei Zug ihren Querschnitt. Speziell durch die Verringerung des Querschnitts kommt es an den fixen Einspannungen (Stirnflächen) zu lokalen Spannungsspitzen und so zu dem Anstieg der Maximalspannungen und dem Abfallen der Minimalspannungen an den Rändern. Nachfolgend wird noch eine Punktwolke separat für alle Garne des Seilstücks bei einer Seillänge von $L=34,76$ mm betrachtet. Auch die Scheiben bei dieser Seillänge wurden in $0,5$ mm breite Bereiche geschnitten, was 69 Bereiche über die Länge ergibt. Zu ergänzen ist, dass diese Punktwolken nur lokale Minimal- und Maximalspannungen beinhalten und daraus

Ergebnisse

keine Aussage über die Spannungsverteilung des Kerns oder des Mantels getroffen werden kann, also wieviel Spannung der Kern oder der Mantel aufnimmt.

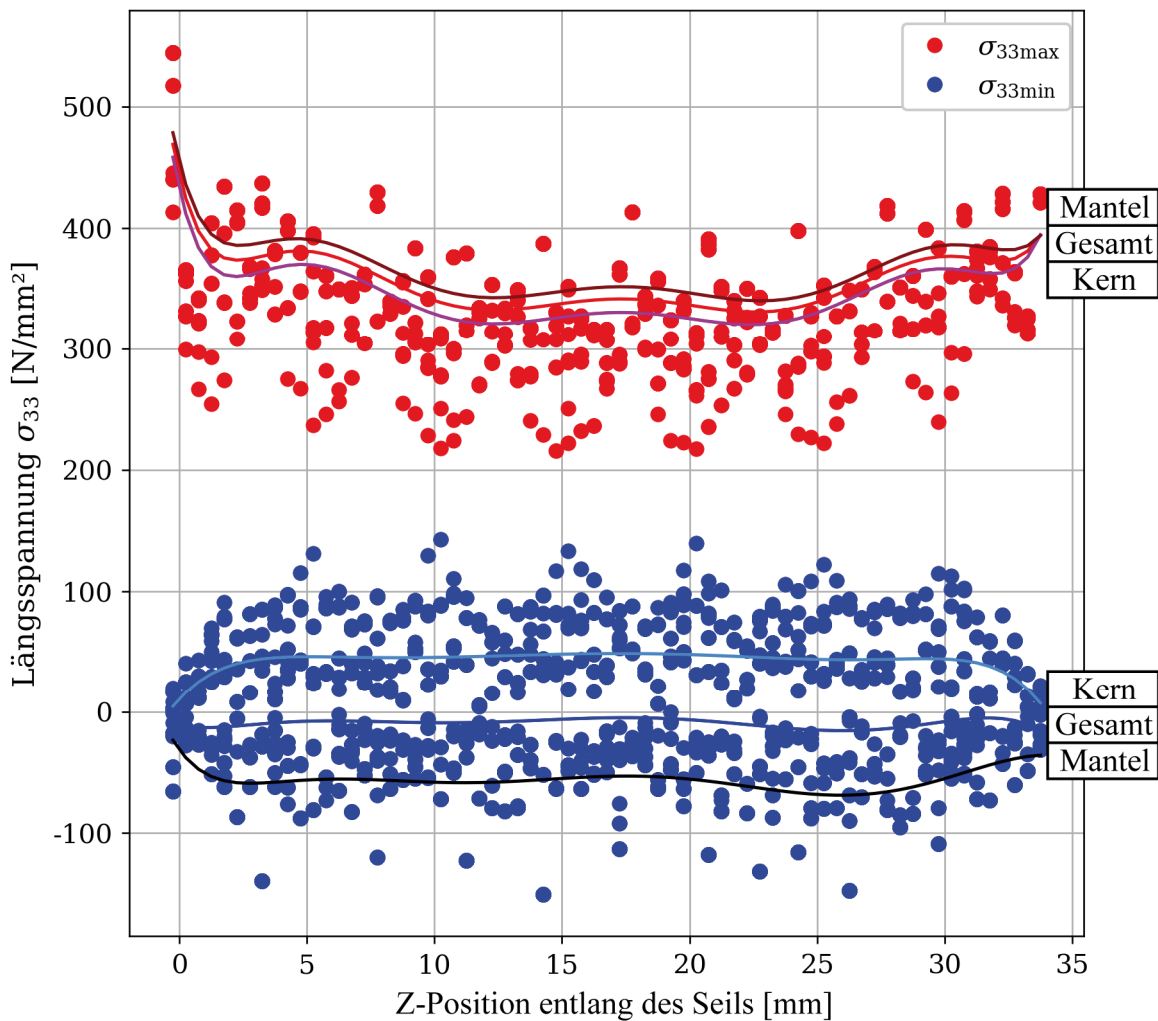


Abb. 3-24 Punktwolke der Längsspannungen σ_{33} separat aufgetragen für alle Garne des Seilstücks $L=34,76$ mm bei Zugbelastung, entlang des Seils

Auch bei einer Seillänge $L=34,76$ mm sind erhöhte oder verminderte Spannungen an den Stirnflächen zu erkennen, siehe Abb. 3-24. In dieser Abbildung sind separat für alle Garne des Kerns und alle Mantelgarne des Seilstücks Maximal- und Minimalspannungen aufgetragen. Die Garne des Kerns weisen einen Anstieg der Maximalspannungen und auch ein Abfallen der Minimalspannungen an den Stirnflächen auf, wohingegen die Mantelgarne in beiden Fällen ein Ansteigen an den Stirnflächen aufweisen. Die Spannungswerte und deren Verläufe des kurzen und des langen Seilstücks sind sehr ähnlich. Wie bei den Spannungsverläufen aus dem letzten Abschnitt zeigen die Punktwolken, dass man mit dem kurzen Seil einen relativ gleichmäßigen Bereich von Spannungen erreicht hat. Nichts desto trotz erkennt man an den Stirnflächen deutliche Spannungsspitzen gegenüber der Seilmitte, was dazu führt, dass die Spannungen an der Einspannstelle nicht mit jenen in der Seilmitte verglichen werden dürfen.

Ergebnisse

Die Randspannungen sind durch die Einspannung verfälscht und stellen sich erst entlang der Seillänge auf eine realistische Verteilung ein.

3.2 Biegung

Die Längsverschiebung und Längsdehnung zufolge der Biegebelastung nach Tabelle 6 ist in Abb. 3-25 für das gesamte Seilstück der Länge $L=18,26$ mm und für ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn dargestellt. Die Krümmung κ für das Seilstück beträgt $\kappa=0,033 \frac{1}{mm}$, was einem Krümmungsradius von 30,36 mm entspricht.

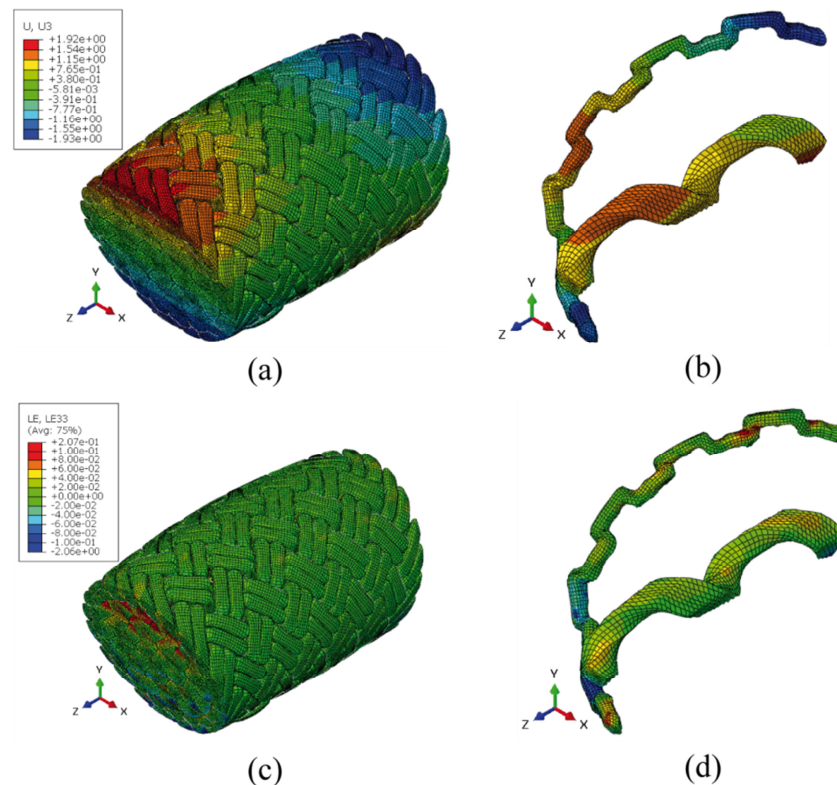


Abb. 3-25 Biegebelastung durch eine aufgebrauchte Rotation der Stirnflächen um die X-Achse für (a) das ganze Seilstück der Länge $L=18,26$ mm mit dem Verschiebungsfeld in Z-Richtung (U_3); (b) ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn mit dem Verschiebungsfeld U_3 ; (c) das ganze Seilstück der Länge $L=18,26$ mm mit der logarithmischen Dehnung in Z-Richtung (LE_{33}) und (d) ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn mit der logarithmischen Dehnung LE_{33}

Dabei erkennt man eine maximale beziehungsweise minimale Verschiebung in Z-Richtung an den Stirnflächen des Seilstücks. Das Seilstück wird aufgrund der Biegebelastung im unteren Teilquerschnitt des Seilstücks gestaucht und im oberen Bereich des Seilstücks gezogen, auch bekannt als Biegedruck und Biegezug. Ein verdrillter Strang des Kerns will sich bei einer Druckbelastung von seiner Verdrillung aufdrehen, weshalb dadurch sein Querschnitt vergrößert wird und die Garne voneinander abheben beziehungsweise sich voneinander lösen, siehe Abb. 3-26.

Ergebnisse

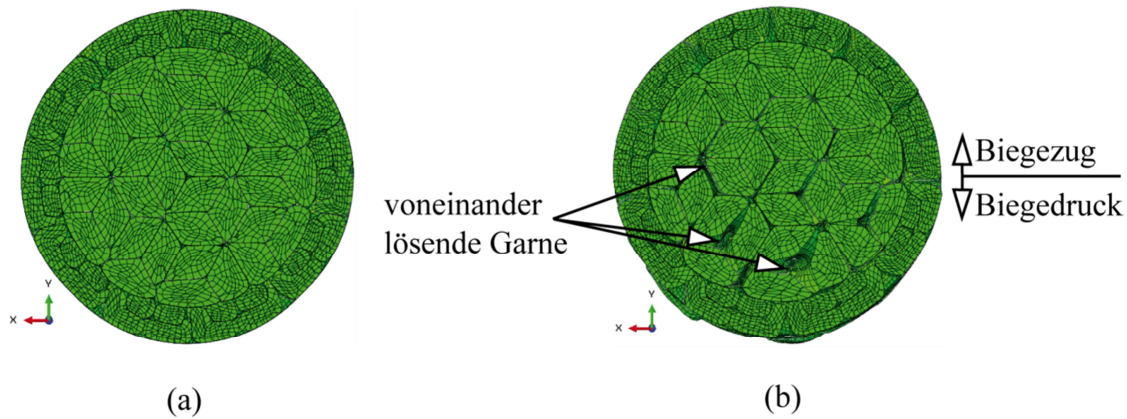


Abb. 3-26 (a) unbelasteter Seilquerschnitt mit anliegenden Garnen (b) belasteter Seilquerschnitt mit sich voneinander lösenden Garnen im Bereich des Biegedrucks

Im Bereich des Biegezugs werden die Garne auf Zug belastet, weshalb dort auch keine sich voneinander lösenden Garne zu finden sind. Am Übergang vom Biegedruck zum Biegezug liegt die neutrale Faser der Biegung, an welcher kein Biegezug und kein Biegedruck vorherrschen.

Es hat sich erwiesen, dass bei der Biegebelastung eine Zeitperiode T von 0,00087 s ausreichend lang ist, um eine quasistatische Simulation zu erreichen. Die Energiebetrachtung kann der Abb. 3-27 entnommen werden. Da die kinetische Energie deutlich unter der Dehnungsenergie liegt, kommt es im Modell nur zu kleinen dynamischen Effekten und die Analyse ist quasistatisch.

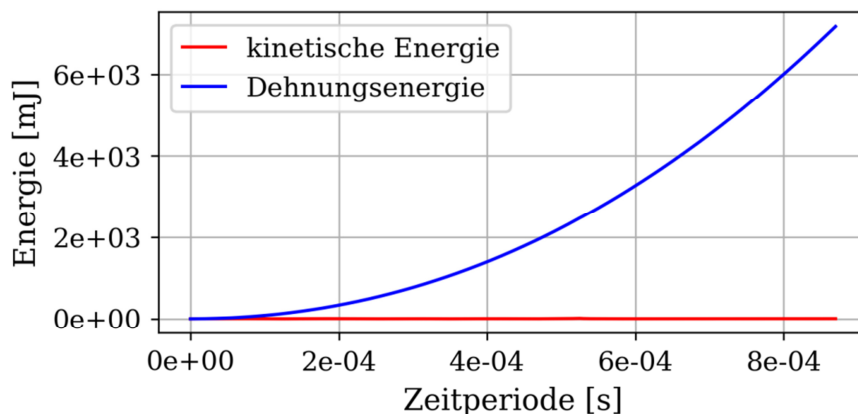


Abb. 3-27 Kinetische Energie und Dehnungsenergie über die Zeitperiode T für Biegung mit der Seillänge $L=18,26$ mm

Der Moment-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm für eine Biegebelastung nach Tabelle 6 kann der Abb. 3-28 entnommen werden.

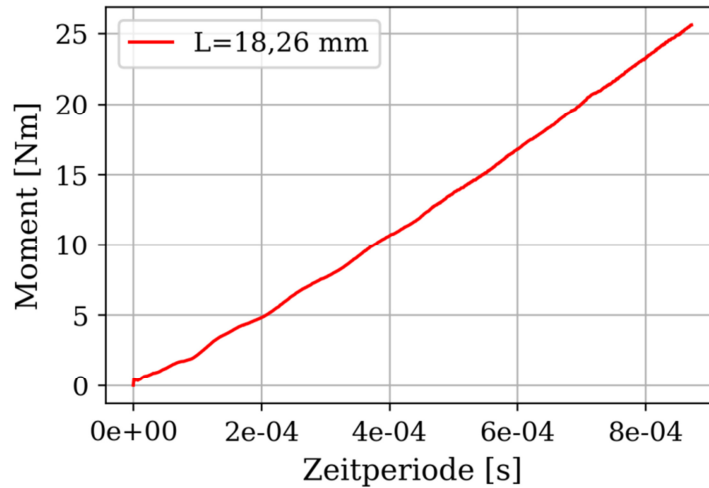


Abb. 3-28 Moment-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm bei Biegebelastung nach Tabelle 6

Durch die eingebrachte Rotation an den Referenzpunkten sieht man das annähernd linear steigende Biegemoment. Das maximale Biegemoment M_b beträgt 25,5 Nm. Daraus kann die Biegesteifigkeit S_{Biege} nach Gl. (51) errechnet werden:

$$S_{Biege} = \frac{M_b}{\kappa} = \frac{25,5 \text{ Nm}}{0,033 \frac{1}{\text{mm}}} = 772,727 \text{ Nmm}^2 \quad (51)$$

Der gemittelte Elastizitätsmodul \bar{E}_{Biege} über das Seilstück bei Biegebelastung lässt sich nach Gl. (52) berechnen, wobei I das Flächenträgheitsmoment des Querschnitts mit dem simulierten Seildurchmesser $D_{Seil,simuliert}=12,39$ mm und φ_{PA} der Füllgrad ist.

$$\bar{E}_{Biege} = \varphi_{PA} * \frac{S_{Biege}}{I} = \varphi_{PA} * \frac{S_{Biege}}{\frac{D_{Seil,simuliert}^4 * \pi}{64}} = 645,3 \text{ MPa} \quad (52)$$

Ein Zylinder mit dem Elastizitätsmodul \bar{E}_{Biege} und dem Durchmesser $D_{Seil,simuliert}$ hat die gleiche Biegesteifigkeit wie das modellierte Seil.

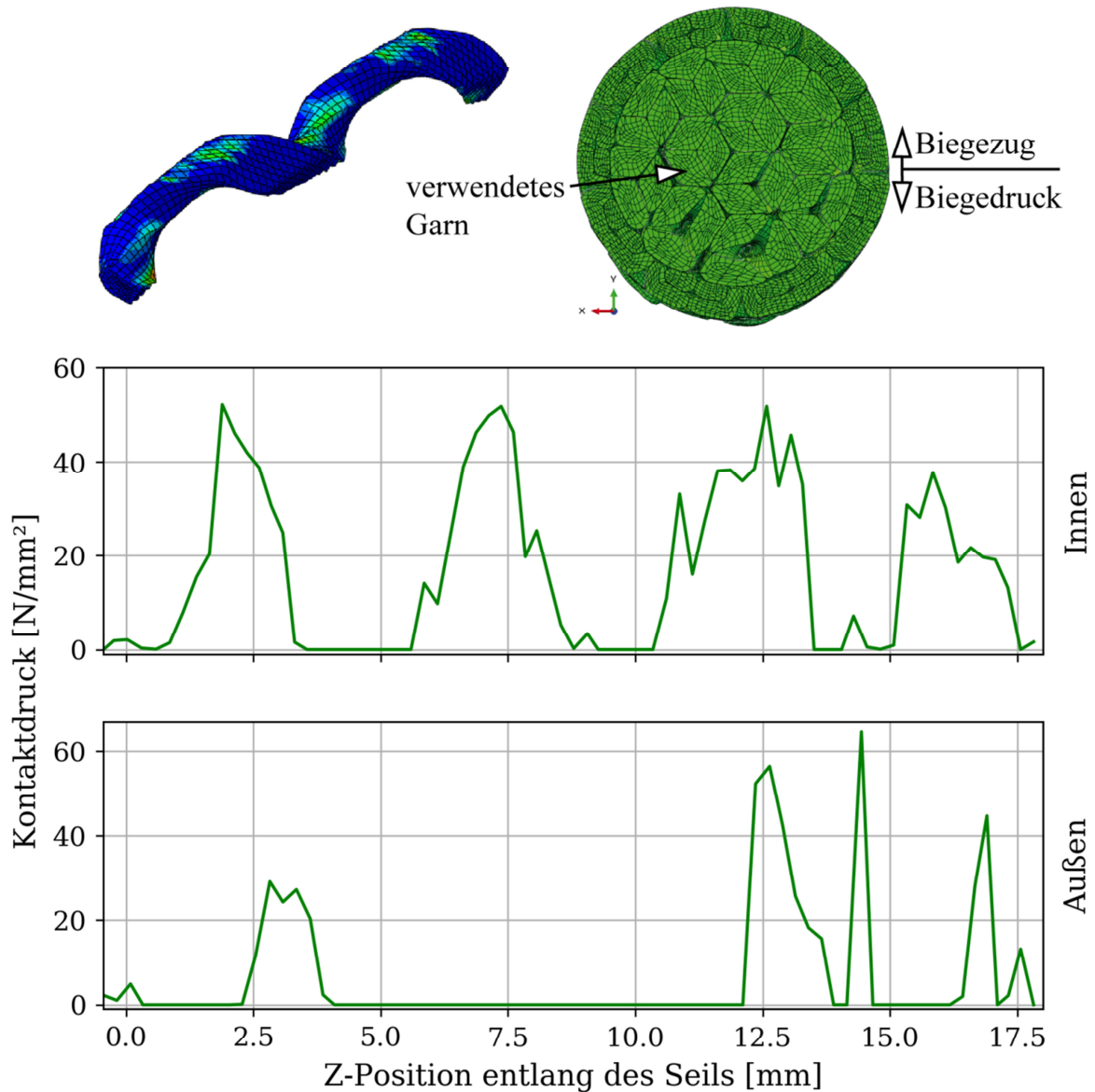


Abb. 3-29 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus der Mitte des Seilquerschnittes

Der Kontaktdruck bei Biegebelastung eines Garns des Kerns entlang des Pfades kann Abb. 3-29 entnommen werden, wobei das verwendete Garn in der Mitte des Seilquerschnittes zwischen Biegezug und Biegedruck liegt. Hierfür sieht man auf der Innenseite des Garns vier Kontaktbereiche. Somit stützt sich ein Garn des Kerns bei Biegebelastung auf anderen Garnen ab und erfährt einen periodisch oszillierenden Verlauf der Kontaktspannung, hervorgerufen durch andere Garne, die auf dieses Garn drücken. An der Außenseite erkennt man drei größere Kontaktbereiche, einmal bei 3 mm und zwei weitere ab einer Position von 13 mm.

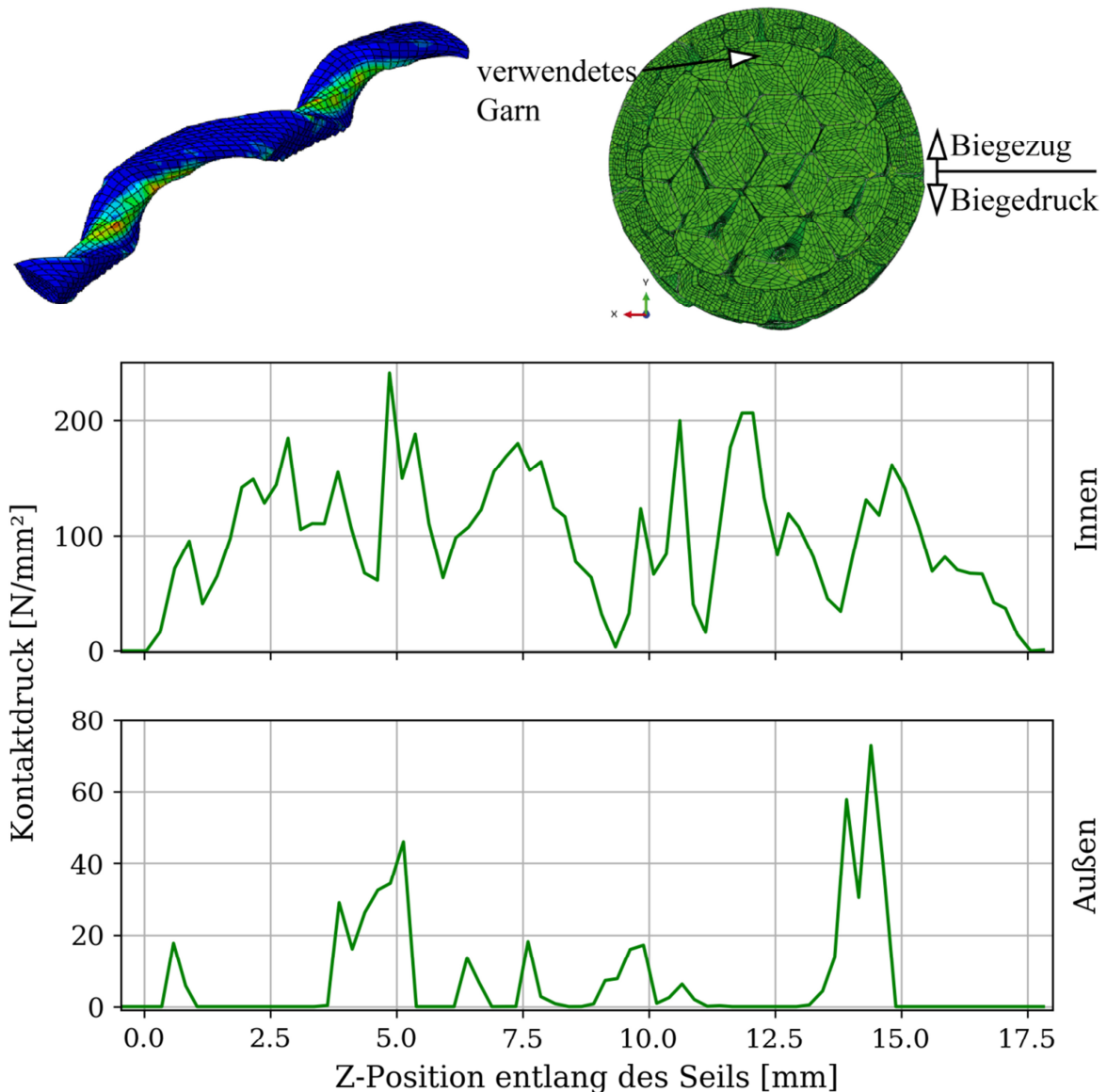


Abb. 3-30 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegezugs des Seilquerschnittes

Der Kontaktdruck eines Garns des Kerns aus dem Bereich des Biegezugs kann Abb. 3-30 entnommen werden. Dieses Garn wird durch die Biegung stets auf Zug belastet, was sich auch am Kontaktdruck der Innenseite widerspiegelt. Der Verlauf des Kontaktdrucks auf der Innenseite des Garns entlang des Pfades zeigt, dass das Garn durchgehend in Kontakt mit anderen Garnen desselben Strangs ist. Der Kontaktdruck fällt über die Seillänge des Seilstücks entlang des Pfades nie auf null ab. Auf der Außenseite entlang des Pfades gibt es lediglich zwei größere Kontaktstellen am Rand, bei 4 mm und bei 14 mm. Bei halber Seillänge ist der Kontaktdruck relativ klein.

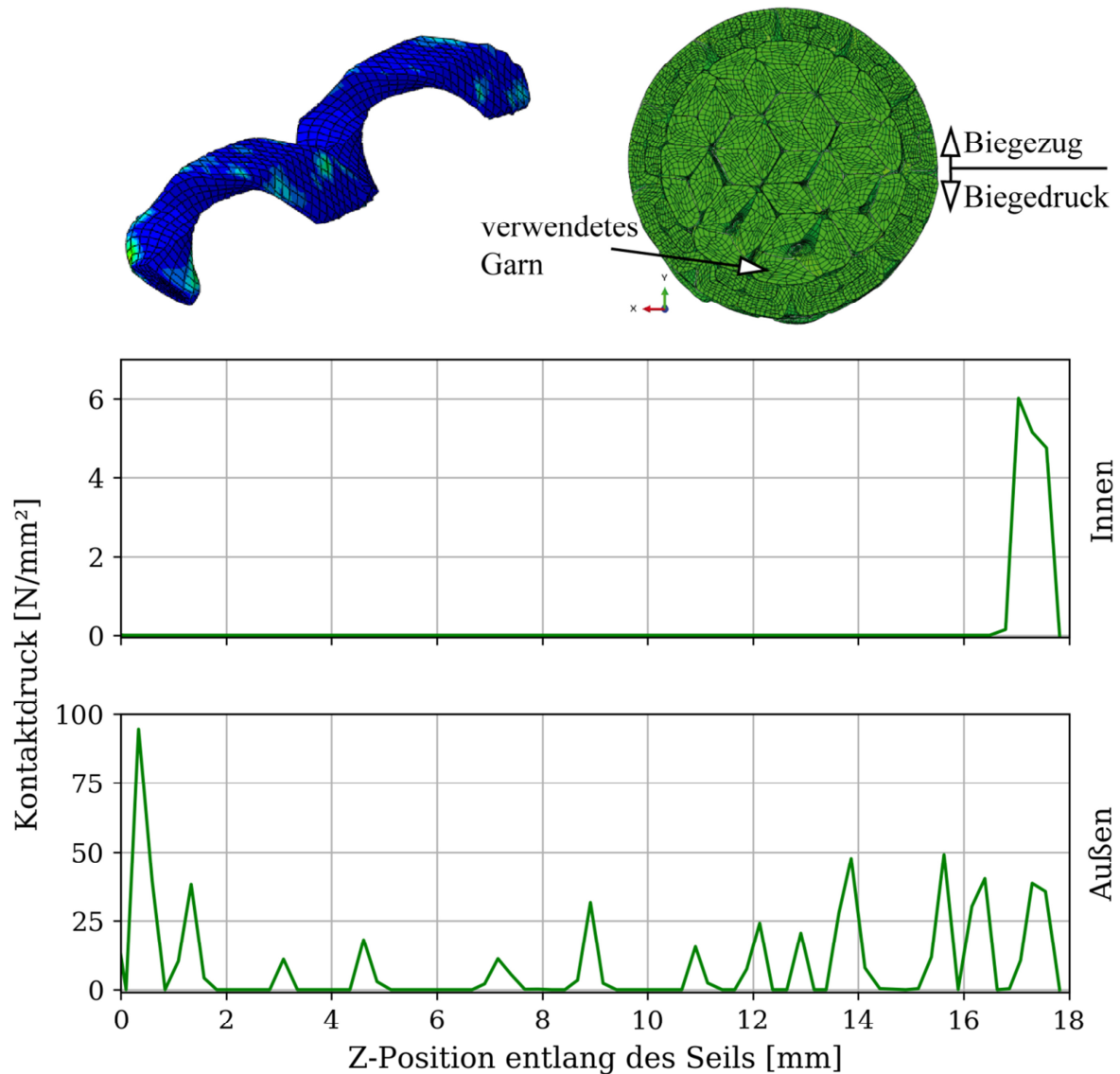


Abb. 3-31 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegedrucks des Seilquerschnittes

Der Kontaktdruck eines Garns des Kerns aus dem Bereich des Biegedrucks kann Abb. 3-31 entnommen werden. Dieses Garn wird durch die Biegebelastung gestaucht und hat somit keinen Kontaktdruck an der Innenseite des Garns, da sich dieses Garn von den anderen in seinem befindlichen Strang ablöst. Somit herrscht nur ein Kontaktdruck an der Außenseite des Garns entlang des Pfades. Dieser ist zwar nicht durchgehend konstant, jedoch über die gesamte Länge immer wieder vorhanden.

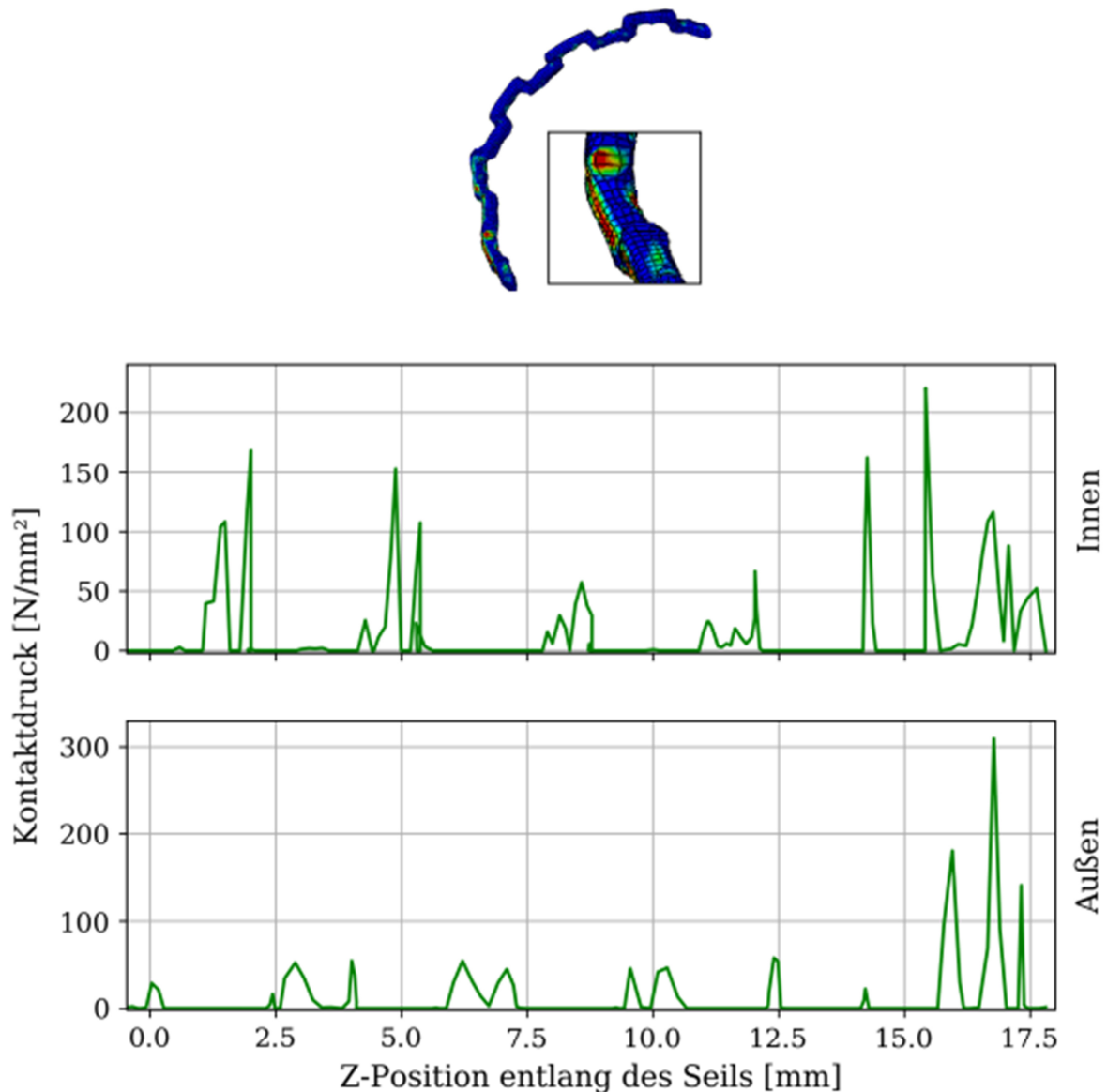


Abb. 3-32 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Mantelgarn entlang des Pfades

Der Kontaktdruck eines Mantelgarns bei einer Biegebelastung entlang des Pfades kann Abb. 3-32 entnommen werden. Dabei erkennt man den Kontaktdruck auf der Innenseite beziehungsweise der Außenseite des Mantelgarns. Der Kontaktdruck eines Mantelgarns weist durch die Verflechtung ein Oszillieren der Spannungen auf.

Zur Vervollständigung sind die Längsspannungen σ_{33} der Garne des Kerns entlang der Pfade für ein Garn aus der Mitte des Seilquerschnittes, siehe Abb. 3-33, für ein Garn aus dem Bereich des Biegedrucks, siehe Abb. 3-34, für ein Garn aus dem Bereich des Biegezugs, siehe Abb. 3-35, und für ein Mantelgarn, siehe Abb. 3-36, dargestellt.

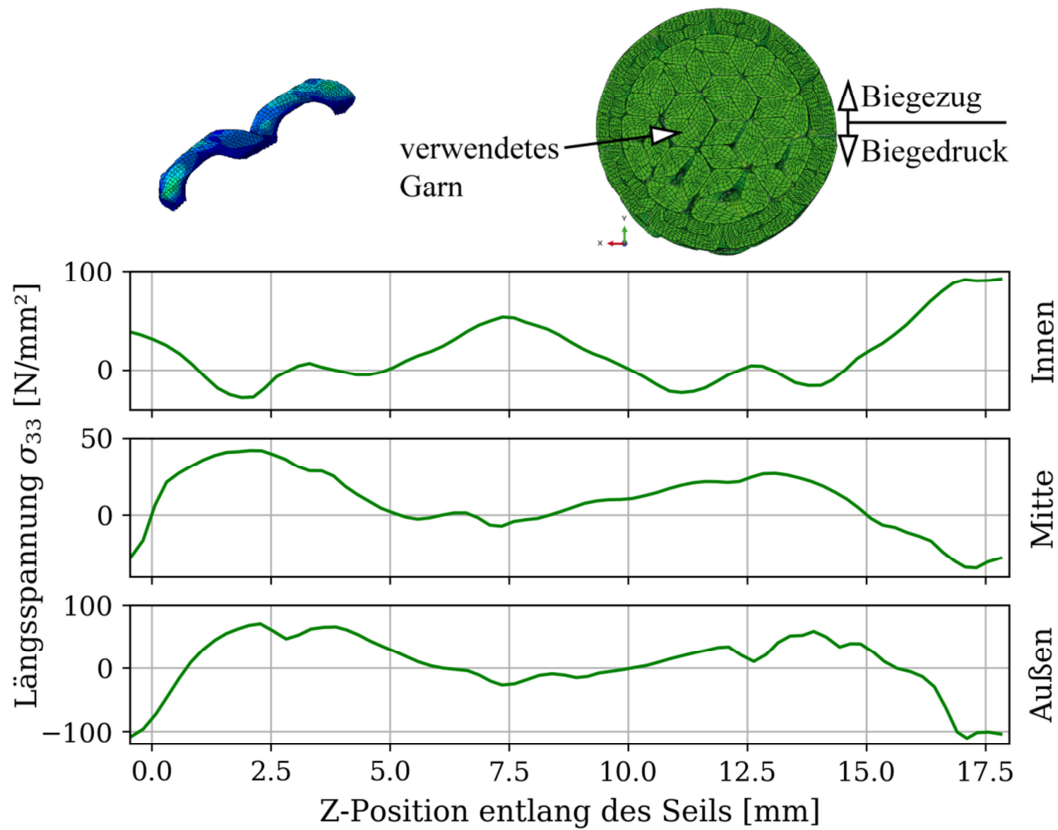


Abb. 3-33 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus der Mitte des Seilquerschnittes

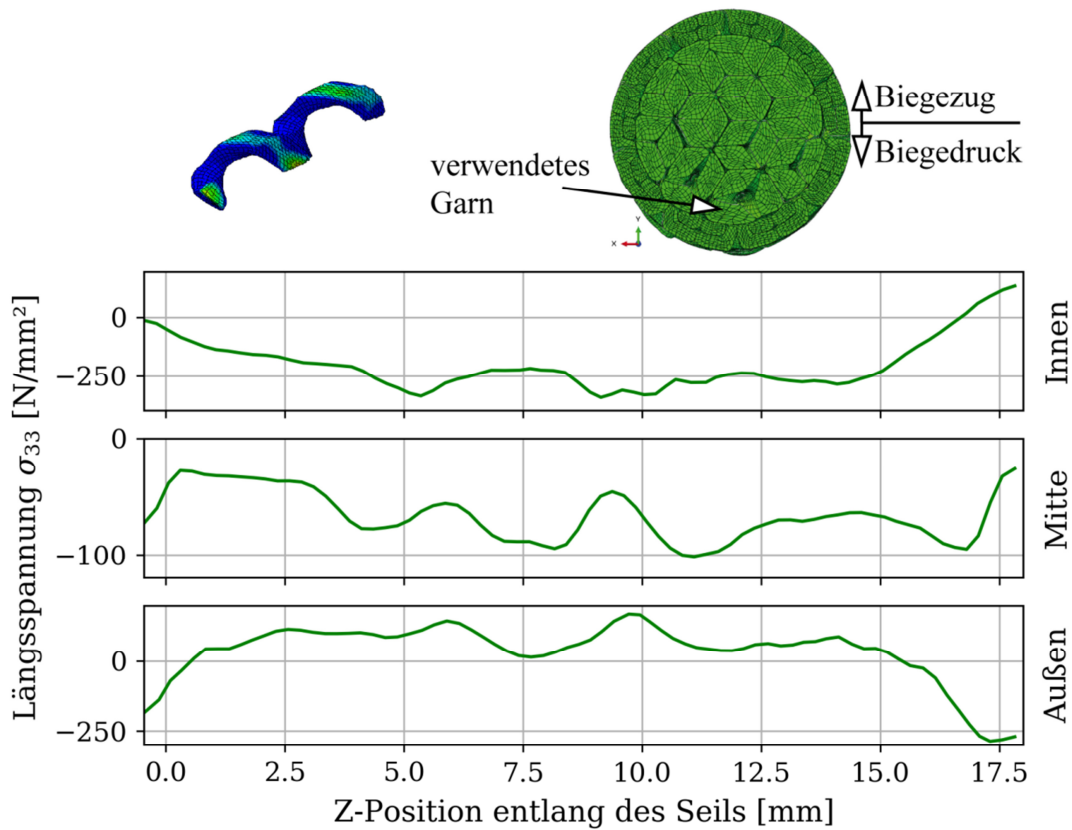


Abb. 3-34 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegedrucks des Seilquerschnittes

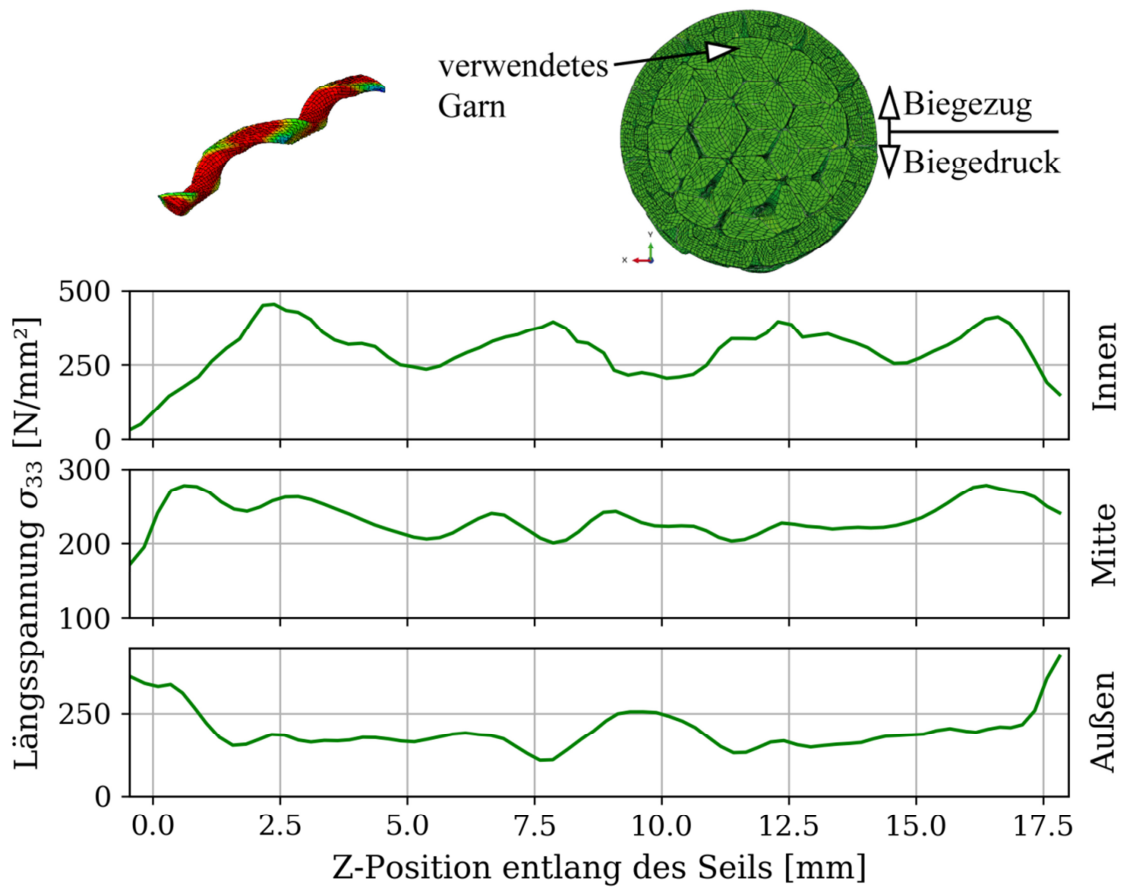


Abb. 3-35 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegezugs des Seilquerschnittes

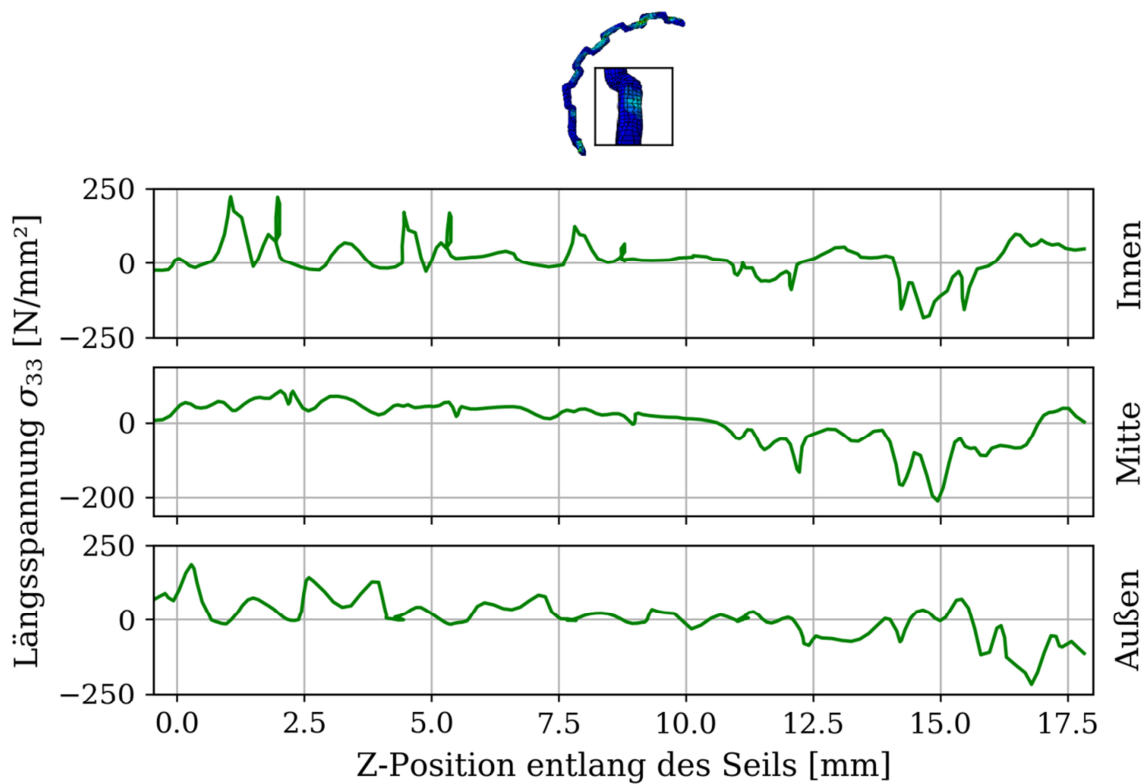


Abb. 3-36 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades

Ergebnisse

Die Biegebelastung ist relativ kompliziert über die Längsspannungen σ_{33} in der Mitte der Garne. Im mittleren Bereich der Seillänge am Pfad der Mitte sind die gemittelte Längsspannung σ_{33} für ein Garn des Kerns aus der Mitte des Seilquerschnittes 10 MPa (Abb. 3-33), für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegedrucks des Seilquerschnittes -60 MPa (Abb. 3-34), für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegezugs des Seilquerschnittes 240 MPa (Abb. 3-35) und für ein Mantelgarn -30 MPa (Abb. 3-36).

Daraus sieht man, dass die jeweiligen gemittelten Spannungen den Bereichen des Biegezugs und Biegedrucks entsprechen. Im Zugbereich sind die Zugspannungen betragsmäßig deutlich größer als die betragsmäßigen Druckspannungen im Druckbereich. Das bedeutet, dass im Kern die Druckspannungen nicht so leicht übertragen werden können als die Zugspannungen im Zugbereich. Dies dürfte daran liegen, dass die einzelnen Garne lokal ausknicken können, und dabei nur teilweise von den anderen Garnen abgestützt werden. Wie man in der Punktwolke bei Biegebelastung sieht, ist dies beim Mantel umgekehrt, siehe Abb. 3-37. Dort stützen sich die Mantelgarne in einer Form ab, sodass im Druckbereich betragsmäßig höhere Spannungen auftreten als im Zugbereich. Die Spannungen im Mantel sind jedoch generell relativ gering im Vergleich zum Kern, wie man in Abb. 3-36 sehen kann.

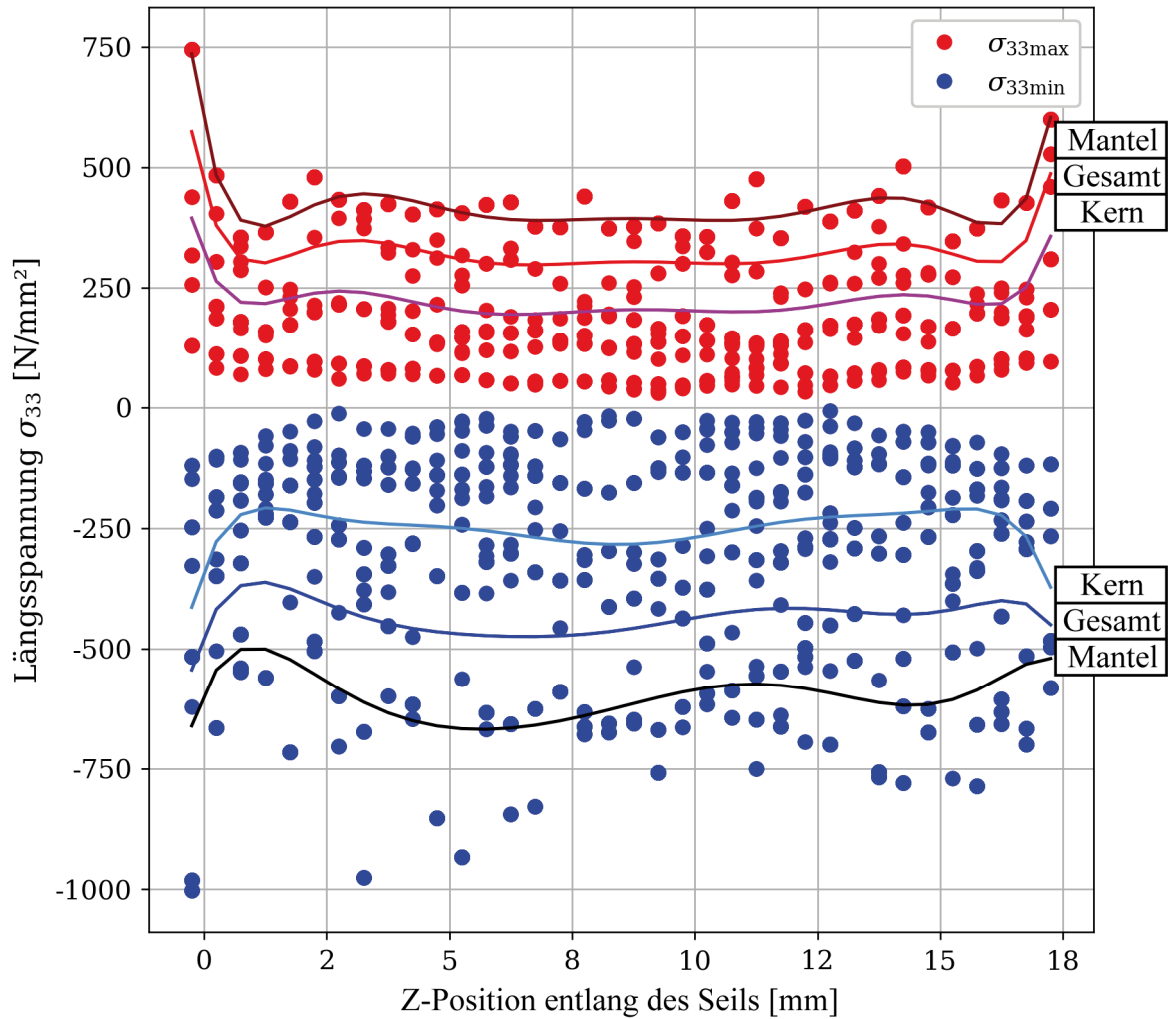


Abb. 3-37 Punktwolke der Längsspannung σ_{33} separat aufgetragen für alle Garne des Seilstücks $L=18,26$ mm bei Biegebelastung, entlang des Seils

Für die Biegebelastung wurde eine Punktwolke mit der Längsspannung σ_{33} erzeugt, um Spannungsabweichungen an den Einspannstellen aufzuzeigen, siehe Abb. 3-37. Diese Spannungsabweichungen kommen von der geometrischen Mantelgarnverlängerung, beziehungsweise von der Einspannung der Stirnflächen zur Lastaufbringung. Das gebogene Seilstück wurde wie bei der Zugbelastung in 36 „Scheiben“ geschnitten und die maximale beziehungsweise die minimale lokale Längsspannung σ_{33} in dem Bereich der Scheibe aufgetragen. Durch eine Polynomiale Regression achten Grades über alle Spannungsmaxima und Spannungsminima stellt sich ein Verlauf der Spannungen ein, bei dem deutlich zu sehen ist, dass die Spannungen an den Rändern ansteigen. In dieser Abbildung sind separat alle Garne des Kerns und alle Mantelgarne aufgetragen. Sowohl die Maximalspannungen als auch die Minimalspannungen steigen beziehungsweise fallen an den Rändern an/ab. Daraus kann erneut geschlossen werden, dass die eingespannten Stirnflächen Abweichungen gegenüber der Seilmitte erzeugen. Hervorgerufen werden diese Abweichungen durch die

Ergebnisse

Mantelgarnverlängerung und die Einspannung der Stirnfläche als „Rigid Body“ zur Lastaufbringung. Der Kern wird einmal gestaucht und einmal gezogen, wobei die Druck- und Zugspannungen relativ gleich groß sind. Der Mantel hingegen verhält sich durch die Biegebelastung anders. Die Mantelgarne werden auf der Unterseite gestaucht und drücken auf andere Garne. Dadurch werden die Druckspannungen größer als die Zugspannungen. Die ausgearbeiteten Spannungswerte beschreiben erste Ergebnisse, will man genauere Aussagen über das Biegeverhalten eines Seilstücks machen, so muss eine Längensstudie durchgeführt werden.

4 Zusammenfassung

Durch die Erstellung der Geometrie von einem verdrehten Garn zu einem verdrehten Strang, zu einem Kern bestehend aus mehreren Strängen, bis mit einem geflochtenen Mantel ein halbstatistisches Kernmantelseil entstand, brauchte es zahlreiche Versuche.

Was sich am Zielführendsten herausgestellt hat, war eine Ausgangsgeometrie mit dem CAD Programm zu erzeugen. So eine Geometrie hat noch sehr große Hohlräume zwischen den Garnen, die bei den realen Seilen weitgehend ausgefüllt sind. Um eine annähernd reale Geometrie zu erreichen, wurde die Ausgangsgeometrie plastisch zu einem Kreisquerschnitt gedrückt. Dies erfolgte in mehreren Stufen: a) ein Strang aus drei Garnen, b) der Kern aus zwölf Strängen und c) das gesamte Seilstück aus dem Kern und den Mantelgarnen. Nach erfolgtem Geometrieaufbau konnten mittels Simulation von mechanischer Belastung eines Seilstücks die einzelnen Garne des Kerns und die Mantelgarne genauer betrachtet werden. Informationen über die lokalen Spannungen an den Garnen wurden dargestellt und ausgewertet. Es war bereits bekannt, dass der Kern eines Kernmantelseils eine größere Belastung als der Mantel aufnimmt, jedoch konnte durch die Simulation und Auswertung gezeigt werden, wo die Spannungen auftreten und wie groß diese bei den verwendeten Materialparametern und aufgebrachten Belastungen sind. Ein Beispiel ist die Betrachtung eines Querschnittes eines Stranges, der sich bei Zugbelastung zusammenzieht und an der Außenseite weniger stark auf die anderen Stränge drückt als die Garne des Stranges aufeinander. Somit kann jeder Strang bei Zugbelastung als eigenes System betrachtet werden (Parallelschaltung). Im Gegensatz dazu stehen die Mantelgarne durch ihre verflochtene Struktur bei Belastung ständig in Interaktion miteinander. Die aufgebrachte Dehnung ε bei Zugbelastung für ein kurzes Seilstück der Länge $L=18,26$ mm betrug $\varepsilon_{18,26\text{ mm}}=10,95\%$ und für ein Seilstück der Länge $L=34,76$ mm $\varepsilon_{34,76\text{ mm}}=11,51\%$. Die Zugsteifigkeit S_{Zug} betrug für die Seillänge $L=18,26$ mm $S_{Zug\ 18,26\text{ mm}}=117.534$ N und für die Seillänge $L=34,76$ mm $S_{Zug\ 34,76\text{ mm}}=116.594$ N. Zusätzlich kann die Zugspannung bei Zugbelastung an der Innenseite beziehungsweise der Außenseite des Garns des Kerns entlang eines Pfades betrachtet werden. Durch die Auswertung der Spannung entlang des Pfades an der Außen- und Innenseite konnte eine deutliche Oszillation der Spannungen erkannt werden, wobei sich in der Garnmitte eine nahezu gleichbleibende Spannung ergab. Da eine Simulation immer nur ein Modell ist und im Vergleich zur Realität Vereinfachungen aufweist, mussten die Einspannungen an den Stirnflächen auf Spannungsspitzen oder Abweichungen der Spannung gegenüber der Seilmitte überprüft werden. Durch die Auswertung der Spannungsmaxima und

Zusammenfassung

Spannungsminima über die Längsposition im Seil konnte gezeigt werden, dass Spannungen in den Stirnflächen des Modells Abweichungen gegenüber denen in der Seilmitte haben. Ein Grund dafür ist die geometrisch bedingte Mantelgarnverlängerung an den Stirnflächen, um die Stirnfläche als eine gerade Fläche abzubilden. Des Weiteren wurde die Belastung an der Stirnfläche (starre Fläche – „Rigid Body“) aufgebracht, was zu Spannungsunterschieden führte. Zusammenfassend bedeutet dies, dass sich die Spannungen erst über die Seillänge einstellen und die Spannungen im Mittelbereich der Seillänge ausgewertet werden können und realistisch sind.

Im Modell der Biegebelastung konnte gezeigt werden, dass verdrehte Garne des Kerns eines halbstatischen Kernmantelseiles sich voneinander lösen und lediglich durch den Mantel zusammengehalten werden. Einerseits indizieren die Kontaktdrücke und die Spannungen sowohl Zugspannungen an der Oberseite als auch Druckspannungen an der Unterseite des Seilstücks. Um die Spannungsunterschiede zwischen Stirnflächen und mittlerem Bereich bei Biegebelastung aufzuzeigen, wurden bei dieser Simulation die maximalen und minimalen Längsspannungen des Seilstücks über die Längsposition im Seil dargestellt. So konnte gezeigt werden, dass auch bei Biegebelastung die Spannungen an den Stirnflächen nicht mit jenen der Seilmitte übereinstimmen. Die Biegesteifigkeit S_{Biege} für die Seillänge $L=18,26$ mm beträgt $S_{Biege\ 18,26\ mm}=772.727$ Nmm². Der homogenisierte Elastizitätsmodul \bar{E} für das simulierte Seilstück der Länge $L=18,26$ mm ist bei Zugbelastung $\bar{E}_{Zug}=941,7$ MPa und bei Biegebelastung $\bar{E}_{Biege}=645,3$ MPa, wobei für das im Modell verwendete PA66 der Elastizitätsmodul bei 3000 MPa liegt.

Die Biegebelastung ist eine weitaus komplexere Belastung für das Seil als eine Zugbelastung, da die einzelnen Garne deutlich stärker aneinander gedrückt werden und somit mehr Kontakt zwischen den Garnen entsteht. Dies spiegelt sich vor allem auch darin wieder, dass die Simulation der Biegung im Vergleich mit der Zugbelastung bei gleicher Seillänge die zehnfache Rechenzeit aufwies. Um nicht zu viel kinetische Energie in das Modell einzubringen, wurde bei expliziter Berechnung die Lastaufbringung hinreichend langsam aufgebracht, um eine quasistatische Simulation zu erzeugen.

Die Festigkeiten wurden bei diesem Modell nicht überprüft. Jedoch gab es vorweg dahingehend keine großen Erwartungen, da der generelle Modellaufbau mit dem Zusammendrücken der Garne zu einer komplexen Seilgeometrie stets im Vordergrund stand. Ziel war es vielmehr, die Garne realitätsnah zu verflechten und diese miteinander in Kontakt stehen zu lassen, siehe Abb. 4-1. Weiters konnte ein Verständnis über die Spannungen in den einzelnen Garnen und deren Kontaktsituation gewonnen werden.

Zusammenfassung

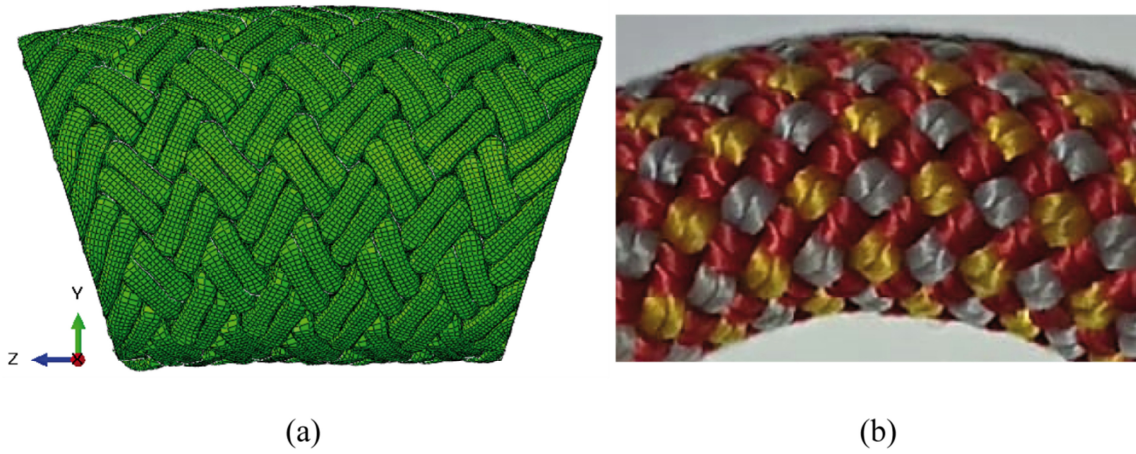


Abb. 4-1 Biegebelastung eines (a)simulierten Seilstücks; (b) realen halbstatistischen Kernmantelseiles

5 Übertragbarkeit und Ausblick

Seilhersteller haben ihr eigenes Know-how in der Entwicklung von Seilen und sind teilweise begrenzt durch die Verfügbarkeit der Produktionsmaschinen. Nichtsdestotrotz gibt es durch die Bandbreite an unterschiedlichen Strukturaufbauten, Faserarten und Materialparametern eine Vielzahl an Permutationen von Seilen. Auch die Aspekte der bevorzugten Optik, der Geometrie und des Materials, das der Seilhersteller verwendet, dürfen nicht außer Acht gelassen werden, weshalb es noch schwieriger ist, das optimale Seil herzustellen. [2, S. 76]

Es gibt für jeden Anwendungsbereich ein spezielles Seil, welches den Anforderungen entsprechen muss. Ob es das Beste ist, kann pauschal nicht beantwortet werden. Deswegen dient dieses FEM Modell als Stütze für einen speziellen Typ des halbstatistischen Kernmantelseiles und kann noch sehr viel weiter ausgebaut werden. Beispielsweise wurde kein anisotropes Materialverhalten für die Filamente berücksichtigt, was aber bei Seilen aufgrund der Faserlänge sehr wohl sinnvoll wäre. Somit kann diese Masterarbeit als Basis für zukünftige Untersuchungen an Seilgeometrien mit Unterstützung der FEM dienen, um beispielsweise noch reißfestere Seile herzustellen. Das Reißen eines halbstatistischen Kernmantelseiles kommt bei sachgerechter Benützung so gut wie gar nicht mehr vor, jedoch darf die Scharfkantenthematik, also der Aspekt, dass ein Seil über eine scharfe Kante belastet wird, nicht außer Acht gelassen werden. Unter diesem Aspekt kann dieses FEM Modell dazu dienen, ein anderes Material für ein Garn zu verwenden, um der Scharfkantenthematik entgegen zu wirken. Zusätzlich sieht man sofort, wie dieses Garn durch das unterschiedliche Material mit den anderen interagiert und es kann ein optimales Ergebnis für eine spezielle Anwendung erzeugt werden. Unter anderem können mit diesem Modell auch zahlreiche weitere Simulationsmodelle erzeugt werden, um Produktionskosten und reale Fallteststudien der Seile einzusparen. Diese Arbeit liefert somit Ansätze zur Optimierung eines Seiles mithilfe der heutzutage verfügbaren Technik der computerbasierenden numerischen Berechnungsanalyse.

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Textilgarne getrennt voneinander, nach erstem Verzwirnen [2, S. 78]	1
Abb. 1-2 Garn, produziert aus drei zuerst verzwirnten Textilgarnen [2, S. 78].....	2
Abb. 1-3 (a) Z-Drall, rechtsschlag; (b) S-Drall, linksschlag [3, S. 25]	2
Abb. 1-4 Evolution von Textilgarn zu Garn [2, S. 79].....	3
Abb. 1-5 3 Stränge Seil, aufgeteilt in seine Komponenten [2, S. 80]	4
Abb. 1-6 Übersicht und Auszug verschiedener Seilkonstruktionen	5
Abb. 1-7 Parallelkern-Kernmantelkonstruktion - Parallel Strang Seil mit 3-Strang Teilseil aus S-Drall und Z-Drall mit geflochtenem Mantel [2, S. 96].....	6
Abb. 1-8 (a) Abspulen einer rotierenden Spule ohne Verdrehung; (b) Abziehen mit Verdrehung [2, S. 191].....	8
Abb. 1-9 Äußerer Drillwinkel eines Garns [2, S. 191].....	8
Abb. 1-10 (a) Tellerspanner; (b) federgespannte Ringwinde [2, S. 193].....	8
Abb. 1-11 Rundgeflecht - Konfiguration an Klöppeln [2, S. 204].....	9
Abb. 1-12 (a) „Diamond“ Verflechtung; (b) „Twill“ Verflechtung [2, S. 205].....	10
Abb. 1-13 Eine Verflechtungsmaschine von Herzog [2, S. 210].....	11
Abb. 1-14 Detailansicht des Kerns (geflochten) und des Mantels [2, S. 209].....	12
Abb. 1-15 verdrilltes Garn mit Winkel θ zur Seilachse [2, S. 143]	13
Abb. 1-16 (a) ideal verdrillte Garngeometrie; (b) und (c) Ausgerollte Oberflächendiagramme [2, S. 149].....	14
Abb. 1-17 Schematische Darstellung einer typischen Reaktion eines Polyesterseiles bei Belastung [2, S. 144].....	15
Abb. 1-18 einzelnes Garn (a) Spannung entlang einer griffigen Faser; (b) Effekt des Dralls [5] [2, S. 146].....	16
Abb. 1-19 Kombinierte Verlängerung und Verdrehung [6] [2, S. 149].....	17
Abb. 1-20 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Moden. (a) Mode 1 und (b) Mode 2 aufgrund axialer Verschiebung; (c) Mode 3 Rotation; (d) Mode 4 und Mode 5 Überschneidung der Geometrie; (e) Mode 6 Querschnittsdeformation [7, S. 372] [2, S. 155]	19
Abb. 1-21 Belastung-Dehnungskurve eines parallel Strang Seiles (a) Strang; (b) Teilseil; (c) Seil [7, S. 374] [2, S. 156]	20
Abb. 1-22 Kräfte an einem gebogenen Seil [8] [2, S. 161].....	22
Abb. 1-23 Strangspannungen bei der Biegung eines Stranges ohne verdrillte Garne; (a) Garne unverschoben; (b) Garne verschoben [10, S. 15].....	23
Abb. 1-24 Geometrie des Strangquerschnittes [10, S. 16].....	23
Abb. 1-25 Strang als Ganzes und Garn (strichliert) [10, S. 10]	24
Abb. 2-1 Schlaglänge eines Seils mit 3 Strängen [2, S. 319].....	26
Abb. 2-2 Zykluslänge an einem 12-Strang geflochtenen Seilmantel [2, S. 319].....	26
Abb. 2-3 Querschnitt eines (a) halbstatistisches Kernmantelseils (b) Stahlseils	27

Abb. 2-4 (a) Schematische 2D Darstellung des Kerns mit den einzelnen Strängen; (b) 3D Ansicht zweier Stränge.....	27
Abb. 2-5 Übersicht des Geometrieaufbaus; (a) Ausgangsgeometrie-Strang bestehend aus 3 Garnen, konstruiert mit einem CAD Programm; (b) Simulationsergebnis Komprimieren eines Stranges bestehend aus 3 Garnen; (c) 12 nebeneinander angeordnete Stränge; (d) Simulationsergebnis Komprimieren des Kerns bestehend aus 12 Strängen; (e) Kern (grün) mit verflochtenen Mantelgarnen aus dem CAD Programm (blau); (f) Simulationsergebnis Komprimieren des Seilstücks und fertiger Geometrieaufbau	28
Abb. 2-6 Vergleich zweier Simulationen mit gleichem stabilem Zeitinkrement n und unterschiedlicher Anzahl an Inkrementen.....	32
Abb. 2-7 Kinetische Energie und Dehnungsenergie über die Zeitperiode T für eine Zugbelastung mit der Seillänge $L=18,26$ mm	33
Abb. 2-8 C3D8R-Element [12 Kap.28.1.4]	33
Abb. 2-9 (a) kein „hourglassing“; (b) „hourglassing“	34
Abb. 2-10 Biegung eines vollintegrierten Elementes mit „shear locking“ Effekt	34
Abb. 2-11 (a) Sweep Algorithmus; (b) vernetztes Garn mit Hexaederelementen	35
Abb. 2-12 Verfestigungskurve des PA 66 für den Geometrieaufbau	36
Abb. 2-13 (a) Ausgangsgeometrie: 3 Garne (violett) mit den Flächen und den Verschiebungsvektoren (Pfeile); (b) 1 Strang bestehend aus 3 komprimierten (plastisch verformten) Garnen	37
Abb. 2-14 Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum	37
Abb. 2-15 Schematische Darstellung (a) der Stränge 1.Lage (grün) und der Stränge 2.Lage (blau); (b) der Verschiebungen $U0^\circ$, 90° und $U45^\circ$	38
Abb. 2-16 Schematische Darstellung des Seilgeometrieaufbaus	39
Abb. 2-17 Translation und Rotation eines Garns	40
Abb. 2-18 Rohgeometrie eines Stranges des Kerns mit 3 Garnen	40
Abb. 2-19 Strang aus 3 Garnen (violett) mit 8 Flächen umhüllt (beige)	41
Abb. 2-20 Eingespannte Flächen (rot) für die Simulation des Stranges	42
Abb. 2-21 (a) akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung eines Strangs mit drei Garnen nach plastischer Berechnung zur Erzeugung der Geometrie (b) reale Geometrie eines Strangs mit drei Garnen.....	42
Abb. 2-22 (a) 3 Stränge in 1. Lage (grün) und 9 Stränge in 2. Lage (blau) mit den Flächen und den Verschiebungsvektoren (Pfeile) (b) Kern bestehend aus 12 Strängen	43
Abb. 2-23 Eingespannte Knoten (rot) für die Simulation des Kernes.....	44
Abb. 2-24 (a) akkumulierte äquivalente plastische Vergleichsdehnung des Kernes nach plastischer Berechnung zur Erzeugung der Geometrie (b) reale Geometrie eines Kerns; 12 Stränge zu je 3 Garnen	45
Abb. 2-25 Simulierte Kerngeometrie	45
Abb. 2-26 Seilgeometrie vor der Simulation; Kern (grün), Mantel (blau)	46

Abb. 2-27 (a) Helix zur Mantelgarnerzeugung (b) Schematische Darstellung der Verflechtungskurve für die Mantelverflechtung.....	47
Abb. 2-28 Schematische Darstellung der geometrischen Erzeugung eines Mantelgarns	47
Abb. 2-29 Mantelgarn mit Kreisquerschnitt	48
Abb. 2-30 (a) Normalabstand zur Erzeugung des zweiten Mantelgarns (b) Zwei Mantelgarne in Z-Drall.....	48
Abb. 2-31 (a) Mantelgarne 1-4 (b) Mantelgarne 1-4 von der Seite betrachtet mit verlängerten und abgeschnittenen Stirnflächen.....	49
Abb. 2-32 (a) Rohgeometrie mit dem Kern (grün), dem Mantel (blau) und den Verschiebungsvektoren (Pfeile) (b) Seilgeometrie	49
Abb. 2-33 Eingespannte Bereiche (rot) für die Simulation des Mantels.....	50
Abb. 2-34 (a) Fertige Seilgeometrie, nach Beendigung der Simulation des Mantels (b) reale Geometrie eines Seilmantels	51
Abb. 2-35 Beispielbild für die erzeugte Seilgeometrie	51
Abb. 2-36 Vergleichsmodell mit Beam-Elementen und Verschiebungen als Pfeile dargestellt	52
Abb. 2-37 Ersatzmodell mit Mantelgarnen aus Beam-Elementen und Verschiebung der Stirnflächen in Z-Richtung bzw. entgegen der Z-Richtung	53
Abb. 2-38 Das Vergleichsmodell für Balkenkontakt mit feinerem Netz.....	54
Abb. 3-1 Schematische Darstellung der Simulationen Ziehen und Biegen	55
Abb. 3-2 Schematische Darstellung der Belastung mit den Knoten (rot) der Elemente an den Stirnflächen und den Referenzpunkten RP1 und RP2 zur Einleitung der Belastung mit den Belastungen (Pfeile) für (a) Zug und (b) Biegung	56
Abb. 3-3 Veranschaulichung der Mantelgarnverlängerung (a) für ein einzelnes Mantelgarn (violett) und die Mantelgarnverlängerung (orange) und (b) für ein Seilstück	57
Abb. 3-4 Pfade schematisch gekennzeichnet an der Außenseite (rot), an der Innenseite (blau) und in der Mitte (orange) für (a) ein Garn des Kerns und (b) ein Mantelgarn.....	59
Abb. 3-5 Die Felder von Verschiebung in Z-Richtung (U_3 in mm) für (a) das ganze Seilstück; (b) für ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn; und die Normaldehnungen in Z-Richtung (LE_{33}) für (c) das ganze Seilstück und (d) ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn für eine Zugbelastung in Seilrichtung	60
Abb. 3-6 Netzstudie; Kontaktdruck aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen	61
Abb. 3-7 Netzstudie; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen.....	62
Abb. 3-8 Netzstudie; erste Hauptnormalspannungen σ_I aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen.....	63
Abb. 3-9 Netzstudie; Kontaktdruck aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen	64

Abb. 3-10 Netzstudie; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen.....	65
Abb. 3-11 Netzstudie; erste Hauptnormalspannungen σ_I aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für unterschiedliche Netzgrößen.....	66
Abb. 3-12 Kraft-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm für die Netzstudie	67
Abb. 3-13 Übersicht zweier Seilstücke zum Längenvergleich (a) Länge 18,26 mm (b) Länge 34,76 mm.....	69
Abb. 3-14 Kinetische Energie und Dehnungsenergie über die Zeitperiode T für Ziehen mit der Seillänge $L=34,76$ mm	69
Abb. 3-15 Kraft-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm und $L=34,76$ mm bei einer Netzgröße von 0,31 mm bei annähernd selber Seildehnung ε	70
Abb. 3-16 Zugbelastung; Kontaktdruck aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen.....	71
Abb. 3-17 Zugbelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen.....	72
Abb. 3-18 Zugbelastung; erste Hauptnormalspannungen σ_I aufgetragen an einem Garn des Kerns entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen	73
Abb. 3-19 Zugbelastung; Kontaktdruck aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen.....	74
Abb. 3-20 Zugbelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen.....	75
Abb. 3-21 Zugbelastung; erste Hauptnormalspannungen σ_I aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades für zwei modellierte Seillängen.....	76
Abb. 3-22 Punktwolke der Längsspannungen σ_{33} separat aufgetragen für alle Garne des Seilstücks $L=18,26$ mm bei Zugbelastung, entlang des Seils	77
Abb. 3-23 Schematische Darstellung für das Schneiden des Seilstücks in Scheiben.....	78
Abb. 3-24 Punktwolke der Längsspannungen σ_{33} separat aufgetragen für alle Garne des Seilstücks $L=34,76$ mm bei Zugbelastung, entlang des Seils	79
Abb. 3-25 Biegebelastung durch eine aufgebrachte Rotation der Stirnflächen um die X-Achse für (a) das ganze Seilstück der Länge $L=18,26$ mm mit dem Verschiebungsfeld in Z-Richtung (U3); (b) ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn mit dem Verschiebungsfeld U3; (c) das ganze Seilstück der Länge $L =18,26$ mm mit der logarithmischen Dehnung in Z-Richtung (LE33) und (d) ein Garn des Kerns und ein Mantelgarn mit der logarithmischen Dehnung LE33	80
Abb. 3-26 (a) unbelasteter Seilquerschnitt mit anliegenden Garnen (b) belasteter Seilquerschnitt mit sich voneinander lösenden Garnen im Bereich des Biegedrucks	81
Abb. 3-27 Kinetische Energie und Dehnungsenergie über die Zeitperiode T für Biegung mit der Seillänge $L=18,26$ mm	81

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-28 Moment-Zeit Verlauf eines Seilstücks der Länge $L=18,26$ mm bei Biegebelastung nach Tabelle 6	82
Abb. 3-29 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus der Mitte des Seilquerschnittes	83
Abb. 3-30 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegezugs des Seilquerschnittes.....	84
Abb. 3-31 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegedrucks des Seilquerschnittes	85
Abb. 3-32 Biegebelastung; Kontaktdruck aufgetragen am Mantelgarn entlang des Pfades	86
Abb. 3-33 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus der Mitte des Seilquerschnittes	87
Abb. 3-34 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegedrucks des Seilquerschnittes.....	87
Abb. 3-35 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen am Garn entlang des Pfades für ein Garn des Kerns aus dem Bereich des Biegezugs des Seilquerschnittes.....	88
Abb. 3-36 Biegebelastung; Längsspannung σ_{33} aufgetragen an einem Mantelgarn entlang des Pfades	88
Abb. 3-37 Punktwolke der Längsspannung σ_{33} separat aufgetragen für alle Garne des Seilstücks $L=18,26$ mm bei Biegebelastung, entlang des Seils.....	90
Abb. 4-1 Biegebelastung eines (a)simulierten Seilstücks; (b) realen halbstatistischen Kernmantelseiles	94

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale typischer halbstatistischer Kernmantelseile.....	7
Tabelle 2: Werte für den Faktor $1\cos(\theta)$ von θ [2, S. 144].....	14
Tabelle 3: Randbedingungen für die Geometrie	25
Tabelle 4: Materialparameter für den Geometrieaufbau [14, S. 537]	35
Tabelle 5: Materialparameter für die Simulationsergebnisse [14, S. 537].....	55
Tabelle 6: Belastungen in Referenzpunkten.....	57
Tabelle 7: Netzgröße für die Netzstudie	58
Tabelle 8: Maximal eingebrachte Kraft F und Steifigkeit $SZug$	68
Tabelle 9: Parameter für die weitere Simulation.....	68

8 Literaturverzeichnis

- [1] WERFT, W. *Grundlagen der Absturzsicherung*. 2. Auflage: ecomed Sicherheit, 2011. ISBN 9783609624068.
- [2] MACKENNA, H.A., J.W.S. HEARLE und N. O'HEAR. *Handbook of fibre rope technology*. Cambridge: Woodhead; CRC Press, 2004. Woodhead Publishing series in textiles. 34. ISBN 1855736063.
- [3] FEYRER, K. *Wire ropes. Tension, endurance, reliability*. Berlin: Springer, 2007. ISBN 3540338217.
- [4] Austrian Standards International. ÖNORM EN 1891: 1998 08 01, *Persönliche Schutz-ausrüstung zur Verhinderung von Abstürzen - Kernmantelseile mit geringer Dehnung*.
- [5] HEARLE, J.W.S., P. GROSBERG und S. BACKER. *Structural mechanics of fibers, yarns, and fabrics*. New York, NY: Wiley-Interscience, 1969.
- [6] HEARLE, J.W.S. und M. KONOPASEK. On united approaches to twisted yarn mechanics. *Appl Polym Symp*, 1975, **No. 27**, 253-273.
- [7] LEECH, C.M., J.W.S. HEARLE, M.S. OVERINGTON und S.J. BANFIELD. Modelling tension and torque properties of fibre ropes and splices. *3rd ISOPE Conf., Singapore*, 1993, **II**, 370-376.
- [8] HIMMELFARB, D. *The technology of cordage fibres and rope*: London : Leonard Hill, 1957.
- [9] REULEAUX, F. *Der Konstrukteur I. Aufl.*: Braunschweig: Vieweg, 1861.
- [10] PAPAILIOU, K.O. *Die Seilbiegung mit einer durch die innere Reibung, die Zugkraft und die Seilkrümmung veränderlichen Biegesteifigkeit*: ETH Zurich, 1995.
- [11] KLEIN, B. *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN 978-3-8348-1603-0.
- [12] *Abaqus Analysis User's Guide (2016)* [online]. 7 Juli 2015 [Zugriff am: 9. Juli 2019]. Verfügbar unter: <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/books/usb/default.htm>
- [13] Klettern [online]. Klassiker im Allgäu. *DAV Panorama*, 2014, **66(5)**, 1-124. Verfügbar unter: https://www.alpenverein.de/chameleon/public/30d2f1d5-d0ad-fd2f-5d18-df6c1cc5b709/DAV-Panorama-5-2014-Komplettversion_24320.pdf

[14] BAUR, E., S. BRINKMANN, T.A. OSSWALD und E. SCHMACHTENBERG.

Saehtling Kunststoff Taschenbuch. 30. Ausgabe. München: Hanser, 2007. ISBN 978-3-446-40352-9.