

# Modellierung und mechanische Simulation klassischer Freileitungsseile

P. Novák, R. Baumann \*  
Swiss CADFEM Users' Meeting 2011

22. Jun 2011

## Zusammenfassung

Der steigende Bedarf an elektrischer Energie stellt zukünftig hohe Anforderungen an die für den Transport notwendige Infrastruktur. Dabei fordert die stetig wachsende Anzahl an dezentralen Energieerzeugern, wie z. B. Offshore-Windparks, die bestehenden Freileitungen immer wieder aufs Neue. So hat beispielsweise eine windbedingte Erhöhung der Übertragungsleistung des Netzes einen kurzzeitigen Anstieg der Netzauslastung zur Folge. Diese und weitere Faktoren machen den Ausbau und eine Optimierung der bestehenden Leitungskapazitäten unumgänglich.

Klassische Hochspannungsleitungen sind komplizierte Spiralseile, deren innere Mechanik bis heute nicht vollständig verstanden ist. Häufig entstehen für den Netzbetreiber hohe Kosten durch Schäden, die meist an den Einspannstellen entstehen. Eine exakte Vorhersage der mechanischen Spannungen in den einzelnen Drähten, welche als Grundlage für Lebensdauerberechnungen dienen, ist immer noch unmöglich. Zur Zeit basiert die Berechnung der Spannungen an Einspannstellen auf empirischen Modellen, die in der Anwendung einfach sind, aber in der Praxis nicht immer zutreffen.

\*Pavel.Novak@hslu.ch / Ralf.Baumann@hslu.ch  
Hochschule Luzern - Technik & Architektur  
CC Mechanische Systeme  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
www.hslu.ch/ccms

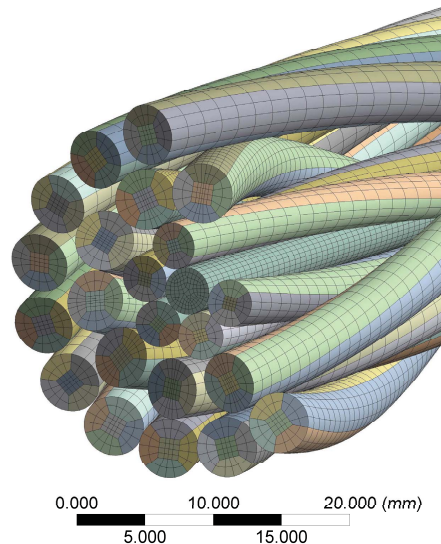


Abbildung 1: Modell eines ACSR-Freileitungsseils

Im Rahmen eines durch die «swisselectric research» und dem Industriepartner PFISTERER SEFAG AG finanzierten Forschungsprojektes entwickelt die Hochschule Luzern ein robustes und praktikables Simulationsmodell für Spiralseile. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk der inneren Seilmechanik und dem Einfluss von Klemmstellen auf das Freileitungsseil. Das entwickelte Modell ermöglicht eine Reduzierung der aufwendigen Laborversuche und die zielgerichtete Auslegung seilschonender Klemmstellen. Der vorliegende Artikel beschreibt den Stand der Forschungsarbeiten in Bezug auf das Freileitungsseil.

# 1 Einleitung

Hinsichtlich der aktuellen Diskussion rund um den Atomkraftausstieg stellt sich die Frage der zukünftigen Energieversorgung. Klar ist, wenn wir unser Konsumverhalten nicht ändern, wird der Bedarf an elektrischer Energie künftig weiter steigen. Eine mögliche Lösung dieses energetischen Dilemmas bietet die Nutzung alternativer Energiequellen. Die optimale Nutzung erneuerbarer Energien erfordert jedoch oftmals deren dezentrale Standorte und somit teilweise weite Transportstrecken. Gleichzeitig kann dabei, bedingt durch die Art der Energiequelle beispielsweise bei Offshore-Windparks, keine kontinuierliche Energieausbeute sichergestellt werden. Diese und andere Faktoren machen es unumgänglich, dass bestehende Leitungstrassen weiter ausgebaut und optimiert genutzt werden.

Die PFISTERER SEFAG AG ist als Spezialist für Kontaktelemente und Systeme im Bereich von Nieder- Mittel- und Hochspannungsnetzen daran interessiert, mit ihren Produkten und individuellen Gesamtlösungen, den bevorstehenden Netzausbau zu unterstützen. Um das bestehende Produktangebot stets zu erweitern und zu verbessern sind neue Ansätze zur Vorhersage des mechanischen Verhaltens klassischer Freileitungsseile notwendig.



Abbildung 2: Geschädigte Klemmstelle

Gängige empirische Modelle sind in der Anwendung einfach, treffen jedoch in der Praxis nicht immer zu. Schäden wie in Abb. 2 und Ausfälle an Stromleitungen führen zu hohen Kosten nicht nur in der Energiewirtschaft sondern auch bei Konsu-

umenten. Um die Vorhersagequalität existierender Modelle zu verbessern, initiierte PFISTERER SEFAG mit «swisselectric research» und der Hochschule Luzern ein Forschungsprojekt, das sich mit der Modellierung und mechanischen Simulation von Freileitungsseilen befasst.

## 1.1 Projektpartner

### 1.1.1 PFISTERER SEFAG

1921 als Familienunternehmen gegründet ist die PFISTERER SEFAG bis heute ihren Wurzeln treu geblieben. Das Unternehmen ist vollständig in Familienbesitz, wobei die Unabhängigkeit von Grosskonzernen wichtig ist. Sie gewährleistet, dass Produkte und Lösungen ohne Einschränkungen auf die Anforderungen der Kunden abgestimmt werden können.

Die PFISTERER SEFAG sucht nicht nur nach der jeweils optimalen Produktlösung, sondern arbeitet auch beständig an der Verbesserung der Fertigungsmethoden, auch hinsichtlich der Kosteneffizienz. Die hohe Fertigungstiefe und flachen Organisationsstrukturen machen unabhängig, flexibel und verbindlich.

PFISTERER SEFAG arbeitet weltweit, mit eigenen Produktionsstätten auf 3 Kontinenten und 18 Gesellschaften in 17 Ländern.

### 1.1.2 «swisselectric research»

Die langfristige Sicherung der Energieversorgung ist eine grosse Herausforderung. Zielgerichtete Forschung ist notwendig, sollen effiziente neue Technologien rechtzeitig verfügbar sein. Zukunftsweisende Projekte für die heutige und für kommende Generationen legen dabei den Grundstein der Elektrizitätsversorgung von morgen.

«swisselectric research» unterstützt im Auftrag der schweizerischen Stromverbundunternehmen Alpiq, Axpo, BKW, CKW, EGL und im Dienste der Kunden die angewandte Forschung und Entwick-

lung auf allen Gebieten der Elektrizität. Von der Produktion über die Übertragung und Verteilung bis zur Anwendung, von der Weiterentwicklung bewährter Technologien bis zur Nutzung erneuerbarer Energien.

### 1.1.3 Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Die Hochschule Luzern - Technik & Architektur ist die technische Fachhochschule der Zentralschweiz mit überregionaler Ausstrahlung. Sie bietet acht Bachelor- und zwei Masterstudiengänge in den Fachbereichen Bau und Technik an. Hinzu kommt ein breites Weiterbildungsangebot.

Eingebettet in die Abteilung Maschinenteknik der Hochschule Luzern - Technik & Architektur betreibt das CC Mechanische Systeme anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung.

Die mechanischen Fragestellungen im gesamten Produktentstehungsprozess sind die Schwerpunkte des CC Mechanische Systeme. Diese reichen von der Konstruktion, FEM Simulation und Visualisierung im Virtual Reality Labor über die Werkstoffprüfung und Messtechnik bis zur Herstellung von Prototypen in unserer Werkstatt oder mit Hilfe der 3D Printer-Technologie. Der Einsatz modernster Methoden und Tools ist dabei selbstverständlich.

## 2 Grundlagen der Seilmechanik

Ein klassisches Spiralseil besteht in der Regel aus einer Vielzahl an Runddrähten. Diese werden wie in Abb. 3 spiralförmig in mehreren Lagen mit gegenläufigem Schlagwinkel um den Kerndraht gewickelt. In Abhängigkeit des Seiltyps variiert dabei die Anzahl verwendeter Aussenlagen. Häufig kommen noch unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz. Während die äusseren Lagen aus Aluminiumdrähten bestehen, sind der Kerndraht und die erste Lage sehr oft aus Stahl.

Freileitungen werden in erster Linie durch eine

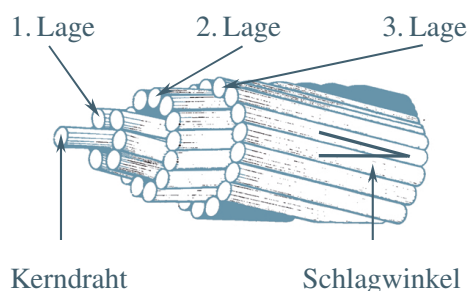


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau eines offenen Spiralseils

Vorspannung (Zugkraft) und Biegung beansprucht. Letzteres wird durch Wind erregte Schwingungen hervorgerufen, was zu Wechselbiegespannungen in den Leiterseilen führt. Hinzu kommen weitere äussere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung, Vereisung oder am Seil montierte Armaturen.

### 2.1 Kräfte am Spiralseil

An einem für sich betrachteten Wendeldraht können die wichtigsten Beanspruchungen gezeigt werden, wie sie auch im Seilverbund als Ganzes auftreten. Wird der Einzeldraht einer Zugbelastung längs der Seilachse ausgesetzt, reduziert sich der Windungsradius seiner Schraubenlinie. Im Einzeldraht entstehen Torsions-, Biege- und Zugspannungen die sich abhängig von der Lage und Position am Umfang ändern.

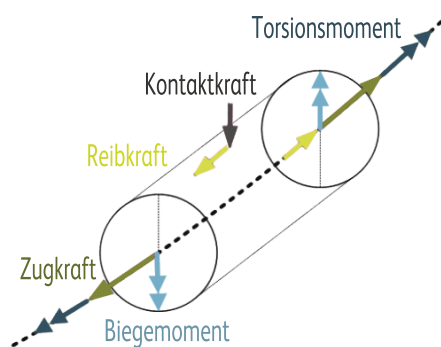


Abbildung 4: Belastungen auf einen Leiterdraht

Infolge der Verringerung des Windungsradius durch die vorab beschriebenen Effekte entsteht ein

auf die jeweils darunter liegenden Drahtlagen wirkender Schnürdruck. Dieser entspricht einer radial gerichteten Streckenlast. Erzeugen äussere Einflüsse zusätzlich eine Relativbewegung der Einzeldrähte, so wirkt dieser Bewegung stets auch eine Reibkraft entgegen. Für ein Drahtelement im Kontaktbereich ergeben sich somit die Belastungen wie in Abb. 4 dargestellt.

## 2.2 Biegesteifigkeit eines Spiralseils

Aus den einleitend beschriebenen Zusammenhängen wird ersichtlich, dass die im Leiterseil auftretenden mechanischen Spannungen in direktem Zusammenhang mit der Zugkraft und der lokalen Biegung stehen.

Im Gegensatz zu einfachen Biegeträgern ist die Biegesteifigkeit von Spiralseilen nicht konstant und liegt zwischen einem theoretisch maximalen und minimalen Wert. Dieser Sachverhalt soll an einem einfachen Ersatzmodell erläutert werden. Hierzu wird ein Zweibalkenmodell unter Querkrafteinfluss betrachtet.

Im ersten Fall berühren sich die beiden Balken reibungsfrei. Bei entsprechender Biegung können sich diese relativ zueinander verschieben. Es ergibt sich eine Durchbiegung wie in Abb. 5 dargestellt. Wird dagegen angenommen, dass beide Balken fest miteinander verbunden sind, resultiert aus der Biegung eine um Faktoren geringere Verformung (Abb. 6). Im ersten Fall ist das Flächenträgheitsmoment beider Balken für sich entscheidend. Für den zweiten Fall kommt versteifend der Steiner-Anteil hinzu. Wird Reibung berücksichtigt, stellt sich eine Biegesteifigkeit zwischen diesen beiden Extremwerten ein.

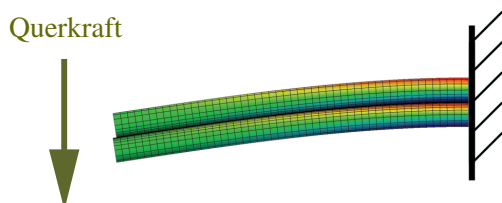


Abbildung 5: Biegespannung bei Kontakt ohne Reibung

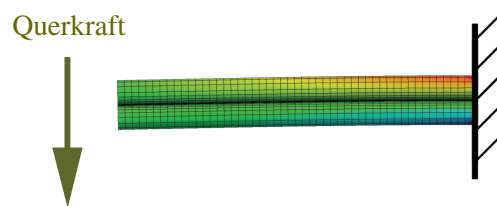


Abbildung 6: Biegespannung bei Verbundkontakt

Wird dies für ein Hochspannungsleiterseil betrachtet, wie dies Papailiou [3] in seiner Dissertation analysierte, folgt der in Abb. 7 dargestellte theoretische Biegesteifigkeitsverlauf. Bei geringer Biegebelastung, also kleinen Krümmungen des Drahtverbunds, existiert eine maximale Biegesteifigkeit. Diese entspricht der Biegesteifigkeit der Einzeldrähte plus dem Steiner-Anteil. Die Drähte haften aufgrund des wirkenden Schnürdrucks. Mit zunehmendem Krümmungsradius beginnen die Drähte im Leiter zu rutschen. Dieser Effekt mindert den Maximalwert kontinuierlich ab. Equivalent der Abb. 5 stellt sich somit bei genügend grosser Krümmung ein Zustand minimaler Biegesteifigkeit ein. Papailiou geht dabei davon aus, dass dieser Wert der Summe aller Einzelbiegesteifigkeiten entspricht.

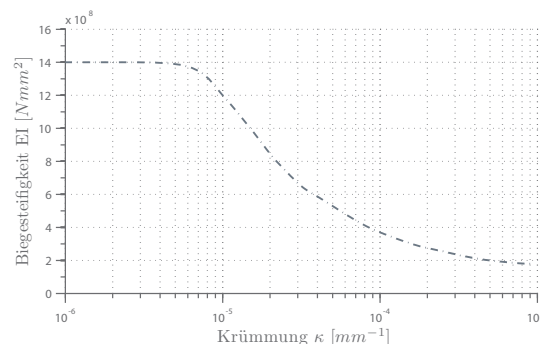


Abbildung 7: Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Krümmung für ein ACSR-Drake Leiterseil

## 3 Simulation eines Spiralseils

Die im Forschungsprojekt angestrebte Entwicklung eines robusten, validierten und praktikablen

Simulationsmodells zur Untersuchung von Freileitungsseilen wird anhand folgender Kriterien umgesetzt:

- Variable Randbedingungen und Lasten möglich (Vorspannung, Biegung)
- Mechanische Spannungen in den Einzeldrähten können bestimmt werden
- Das Modell ermöglicht eine Quantifizierung der durch Reibung dissipierten Energie
- Simulation mit kurzen Rechenzeiten (< 1 h) auf gängigen Workstations
- Schneller (automatisierter) Modellaufbau unter Berücksichtigung aller relevanten Leiterparameter
- Grosse Leiterlängen simulierbar (< 5 m)

Als Referenz wurde das 3-lagige ACSR - Drake<sup>1</sup> bzw. Dove gewählt. Ein Leiterseil dieses Typs verfügt über einen 1+6 Stahlkern, umwickelt mit zwei weiteren Lagen (10+16) aus Aluminium. So entsteht ein Aussendurchmesser von 28 mm bzw. 23.5 mm für den Dove-Leiter.

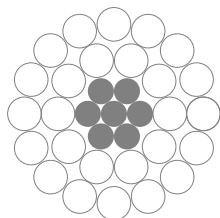


Abbildung 8: Querschnitt eines ACSR - Drake Leiterseils

### 3.1 Modellierungsstrategien

Um ein entsprechendes Simulationsmodell in ANSYS realisieren zu können bieten sich unterschiedliche Ansätze mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen an. Diese werden nachfolgend vorgestellt.

<sup>1</sup>ACSR - Aluminium Conductor Steel Reinforced

#### 3.1.1 Volumenmodelle

Ein Kontinuumsmodell mit "verschmierten" Materialeigenschaften, also ein zylindrischer Ersatzkörper mit virtuellem Material, bietet sich als einfacher Ansatz an. Jedoch müssen hierfür die speziellen Materialparameter ermittelt werden und das Kontaktverhalten einzelner Drähte im Leiter kann nicht abgebildet werden.

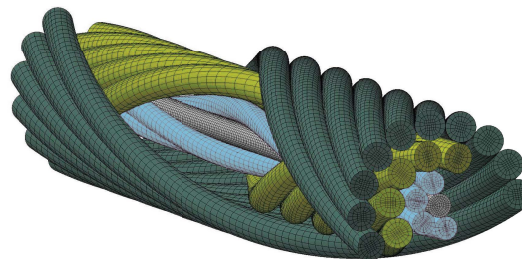


Abbildung 9: Volumenmodell eines Leiterseils

Alternativ kann die Geometrie des Leiterseils über Volumenelemente (siehe Abb. 9) erzeugt werden. Ein so generiertes Modell ermöglicht die exakte Abbildung in Realität vorhandener Kontaktstellen, jedoch erreicht die Modellgröße bereits ohne die notwendige Verfeinerung Freiheitsgrade von mehreren Millionen und erzeugt somit Rechenzeiten von mehreren Tagen bis Wochen. Zusätzlich ist die Handhabung erschwert, da sich das Modell nur schwer parametrisieren lässt und heikel auf Änderungen der Modellgeometrie und / oder der Randbedingungen reagiert.

#### 3.1.2 Balkenmodell

Eine weitere Möglichkeit bietet die Idealisierung der Einzeldrähte über Balkenelemente. Die Geometrie kann auf diese Weise sehr einfach erzeugt und nachträglich vernetzt werden. Bei genügend feiner Unterteilung werden die Verformungen und die mechanischen Spannungen im Leiterseil gut abgebildet. Einen ersten Eindruck dieser Modellierungsstrategie vermittelt Abb. 10.

So erzeugte Simulationsmodelle stellen den Anwender jedoch vor die Herausforderung der Kontaktidealisation. In realen Leiterseilen besteht

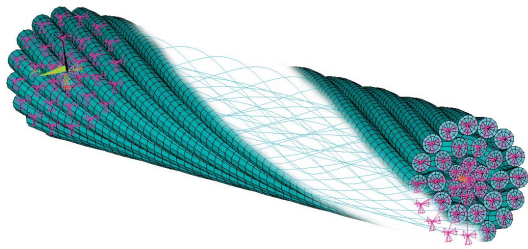


Abbildung 10: Balkenmodell eines Leiterseils

nicht nur zwischen den einzelnen Lagen, sondern auch zwischen den Drähten innerhalb einer Lage eine Berührung. Vereinfacht ist diese Kontaktsituation in Abb. 11 für ein einlagiges Spiralseil dargestellt.

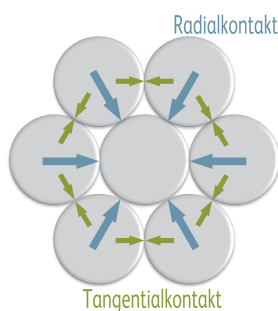


Abbildung 11: Kontaktsituation im 1+6 Drahtseil

Der Kontakt kann in ANSYS grundsätzlich über 3D Linie zu Linie Kontaktelementen realisiert werden. Nach Definition des Kontaktyps (parallel oder gekreuzt) wird bei Angabe des Durchmessers beider Kontaktpartner die Kontaktposition durch ANSYS ermittelt. Simulationstests mit diesem Ansatz zeigten ein schlechtes Konvergenzverhalten und waren daher unbefriedigend.

Nach Papailiou [3] ist die Biegesteifigkeit von Leiterseilen vorrangig vom Radialkontakt der Drahtlagen abhängig. Dieser kann als Punktkontakt idealisiert werden. Die Reduzierung des Modells auf diesen einen Kontaktyp vereinfacht den Modellaufbau.

Ein senkrecht zur Seillängsachse ausgerichtetes Knoten zu Knoten Kontaktelement bildet an der Berührungsstelle den Kontakt ab. Es ist in der Lage sowohl Normal- als auch Reibkräfte zu übertragen. Beide Endknoten des Kontaktelements müssen ge-

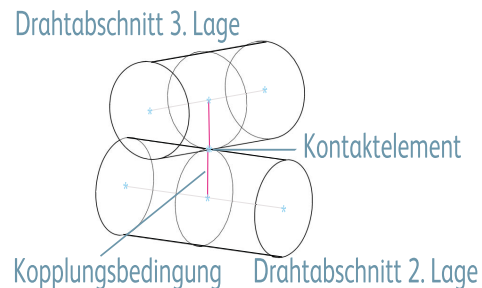


Abbildung 12: Kontaktsituation im Balkenmodell

nau am geometrischen Berührungspunkt der Drähte positioniert werden, da sonst ein unrealistisches Kontaktverhalten auftritt. Kopplungsgleichungen sorgen für die richtigen Verschiebungen an den Kontaktstellen.

Diese Modellierungsstrategie erfordert Kenntnisse der APDL - Programmiersprache<sup>2</sup>, ermöglicht jedoch einen vollständig parametrisierbaren Modellaufbau. Die mit Balkenelementen idealisierte Geometrie und die bereits bei Berechnungsstart fest definierten Kontaktstellen wirken sich positiv auf die Dauer der Berechnung aus. So kann ein 2 m langes Seilstück unter Zug und Biegebelastung in weniger als 20 Minuten über den gesamten Hystereseyklus auf gängigen Workstations simuliert werden.

Bleibt zu erwähnen, dass infolge des gewählten Kontaktyps ohne zusätzliche Massnahmen keine exakten Aussagen über lokale Kontaktspannungen möglich sind. Dennoch bietet diese Modellierung im Vergleich den vorteilhaftesten Ansatz.

## 4 Resultate und Verifikation der Simulationsergebnisse

### 4.1 Mechanische Spannungen im Simulationsmodell

Abb. 13 zeigt ein ACSR-Drake Leiterseil bei 28.5 kN Zuglast. Beide Seilenden wurden dabei gegen Verdrehung um die Seilachse gesichert. Der Kerndraht und die erste Lage weisen in diesem

<sup>2</sup>APDL - ANSYS Parametric Design Language

Zustand die höchsten Normalspannungen auf. Im geschnittenen Seilmodell ist dabei der punktuelle Einfluss einzelner Kontaktstellen auf die Spannungsverteilung im Leiterseil ersichtlich.

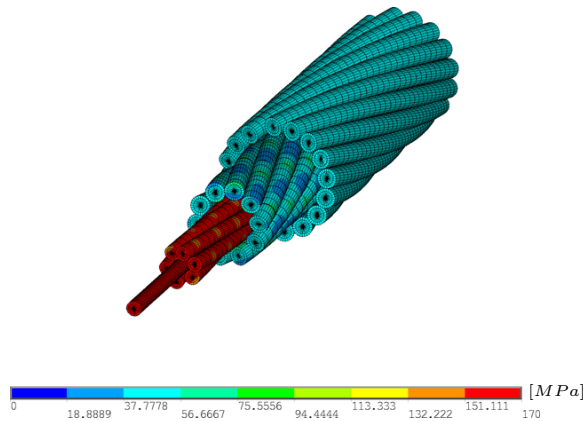


Abbildung 13: Normalspannungen bei 28.5 kN Zugbelastung

Nach K. Feyer [1] kann der unter Zug entstehende Schnürdruck und die aus der Zugbelastung resultierenden mechanischen Spannungen analytisch berechnet werden. Ein Vergleich der FEM-Resultate aus dem Balkenmodell mit der analytischen Lösung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

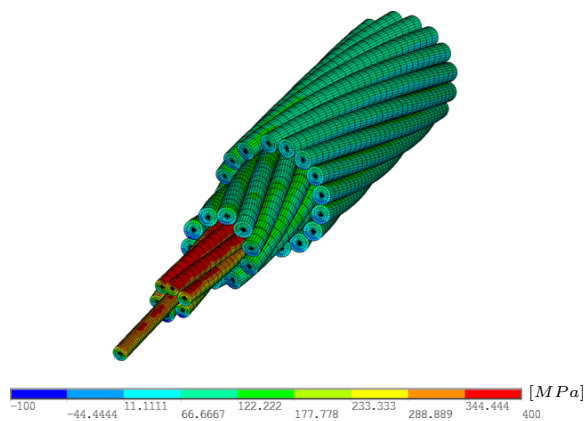


Abbildung 14: Normalspannungen bei 28.5 kN Zugbelastung und 50 Nm Biegung

Wird der Zuglast ein Biegemoment überlagert, zeigt der Drahtverbund ein globales Verhalten ähnlich dem eines auf Biegung belasteten Vollquerschnitts (vgl. Abb. 14).

## 4.2 Analytische Validierung der veränderlichen Biegesteifigkeit

Die mit dem Simulationsmodell berechnete variable Biegesteifigkeit zeigt ebenfalls die Abhängigkeit von der Krümmung wie in Abschnitt 2.2 diskutiert. Vergleiche mit den theoretischen Werten nach Papailiou [3] zeigen jedoch eine deutlich geringere max. Biegesteifigkeit bei Haften.

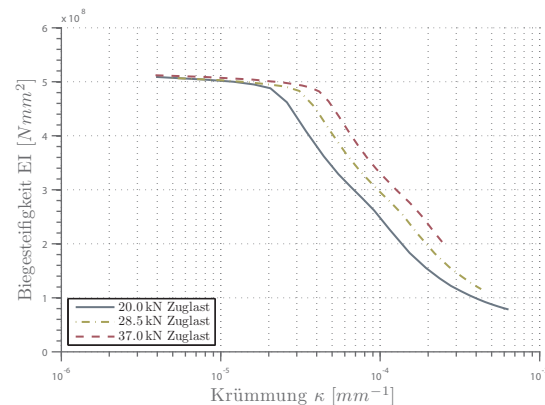


Abbildung 15: Simulierte veränderliche Biegesteifigkeit

Die geringere Steifigkeit aus der FEM-Simulation lässt sich mit dem Verhalten des verwendeten Kontaktelements erklären. Die Idealisierung berücksichtigt die Colomby'sche Reibung im Kontaktpunkt, verhält sich aber wie ein Gelenk. Eine mögliche stützende Wirkung durch einen flächigen Kontakt fehlt. Da die analytischen wie numerischen Werte auf Modellannahmen beruhen, können keine eindeutigen Aussagen zur Richtigkeit gemacht werden. Weitere Untersuchungen diesbezgl. stehen aus.

## 4.3 Experimentelle Validierung des Verformungsverhaltens und der Reibarbeit

Ergänzend zu den analytischen Vergleichen wurden Messungen an einem realen Freileitungsseil durchgeführt. Der Messaufbau zeigt Abb. 16.

Das beidseitig fest eingespannte Seil wird über einen Hydraulikzylinder vorgespannt und während

der Messung mit einer konstanten Zugkraft von 28.5 kN belastet. Die hintere Lagerstelle ist entlang der Seilachse verschiebbar. Somit kann die Zugkraft konstant gehalten werden. Die Momentenbelastung erfolgt über eine in der Mitte des 2 m langen Leiters aufgebraute Querkraft.

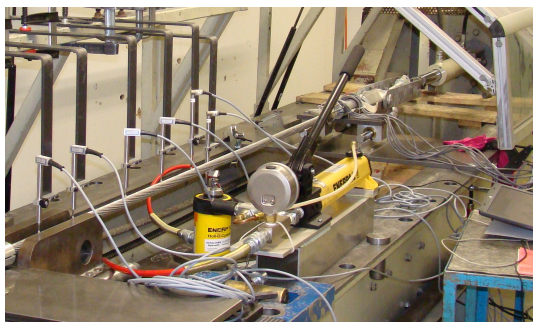


Abbildung 16: Messaufbau mit ACSR-Dove Leiterseil

Die gemessenen Verschiebungen der sechs Messpunkte sind in Abb. 17 der simulierten Biegelinie überlagert. Offensichtlich hat die zu tiefe Biegesteifigkeit keinen Einfluss auf das globale Verformungsverhalten des Hochspannungsleiters.

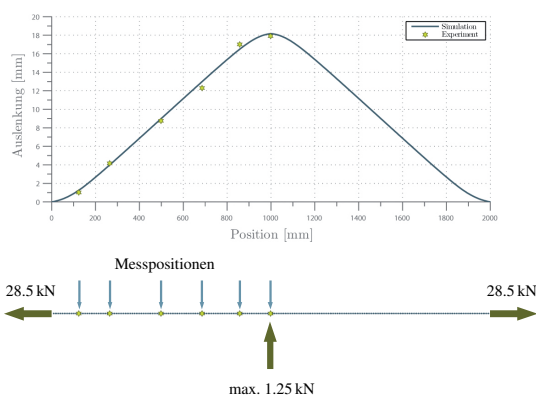


Abbildung 17: Verformungsverhalten

Entsprechend den anfangs gesetzten Simulationszielen wurde die dissipierte Energie an allen Messpunkten ausgewertet. Abb. 18 zeigt eine detaillierte Darstellung der ermittelten Messwerte an der Messstelle 3 (Position 498 mm). In dieser Ansicht ist die deutlich kleinere, durch die simulierte Kraft/Weg - Kurve eingeschlossene Fläche ersichtlich. Ob die zu tiefe Biegesteifigkeit (Anfangssteigung der Kraft/Weg - Kurve) oder der fehlende tangentielle Kontakt (Abb. 11) innerhalb jeweiliger

Drahtlagen für diese Abweichung verantwortlich sind, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Variationen des in der Simulation verwendeten Reibkoeffizienten (Standardwert:  $\mu = 0.5$ ) ergaben keine signifikanten Einflüsse auf die berechnete Reibarbeit.

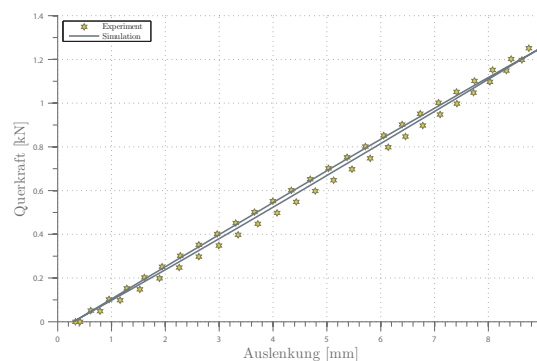


Abbildung 18: Hysterese, Messposition 498 mm

## 5 Fazit

Die vorgestellten Modellierungsansätze verfügen über Vor- und Nachteile. Sei es die einfache Handhabung beim Modellaufbau oder die Möglichkeit Kontaktbereiche während der Simulation extrem fein aufzulösen. Trotzdem scheitern die meisten gängigen Ansätze an Konvergenzproblemen oder Berechnungszeiten im Bereich von Wochen.

Einzig das Balkenmodell bietet einen effizienten Ansatz für die Berechnung von klassischen Freileitungsseilen. Das vorgestellte Simulationsmodell bildet die Steifigkeit von langen Hochspannungsleitern global gut ab und ermöglicht deren Berechnung auf gängigen Workstations. Im jetzigen Stadium ist es jedoch noch nicht möglich, die durch Reibung dissipierte Energie rechnerisch hinreichend genau ermitteln zu können.

Zukünftig ist eine Erweiterung des Balkenmodells um den noch unberücksichtigten Tangentialkontakt (vgl. Abb. 11) vorgesehen. Erste Untersuchungen bestätigten einen möglichen Einfluss der zusätzlichen Kontaktstellen auf das Steifigkeitsverhalten des Spiralseils. Gleichauf werden realistischere Werte der verrichteten Reibarbeit erwartet.



Um dennoch Kontaktspannungen an ausgewählten Stellen innerhalb des Leiterseils berechnen zu können, bietet sich ein hybrider Modellierungsansatz an. Dabei wird lediglich der unmittelbare Bereich um die zu betrachtende Kontaktzone herum mit Volumenelementen aufgelöst und das restliche Gebiet nach wie vor mit Balkenelementen diskretisiert. Erste Erfahrungen mit einem Einzeldrahtmodell (Abb. 19) und der Ankopplung von Volumen- mit Balkenelementen zeigten sehr gute Ergebnisse, die sich mit den analytischen Lösungen von Leider [2] deckten.

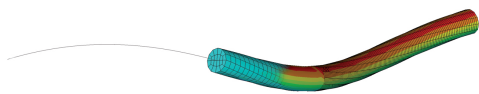


Abbildung 19: Einzeldrahtmodell mit gekoppelten Balken- und Volumenelementen

## Literatur

- [1] Feyer, K., Wire Ropes, Tension, Endurance, Reliability, Heidelberg, (2007)
- [2] Leider, Martin G., Dr.-Ing., Krümmung und Biegespannungen von Drähten in gebogenen Drahtseilen, Nr. 1, (1977)
- [3] Papailiou, Konstantin O., Die Seilbiegung mit einer durch die innere Reibung, die Zugkraft und die Seilkrümmung veränderlichen Biegesteifigkeit, (1995), doi:10.3929/ethz-a-001442538