

Ein effizienter Ansatz zur Modellierung und Simulation von Spiralseilen

Ralf Baumann, Pavel Novak

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, Schweiz

1 Einleitung

Klassische Spiralseile, so wie sie für Hochspannungsleitungen eingesetzt werden, sind komplexe Strukturen, deren Modellierung und Simulation nach wie vor eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Freileitungen werden in erster Linie durch eine Vorspannung (Zugkraft) und Biegung beansprucht. Letzteres wird durch Wind erregte Schwingungen hervorgerufen, welche zu Wechselbiegespannungen in den Leiterseilen führen. Hinzu kommen weitere äussere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung, Vereisung oder am Seil montierte Armaturen. Häufig entstehen für den Netzbetreiber hohe Kosten durch Schäden, die meist an den Einspannstellen auftreten. Eine exakte Vorhersage der mechanischen Spannungen in den Einzeldrähten oder die genaue Berechnung der inneren Seildämpfung ist immer noch unmöglich. Die Berechnungen basieren häufig auf empirischen Modellen, die in der Anwendung einfach sind, jedoch immer durch eine Vielzahl von Versuchen abgestützt werden müssen.

Ein klassisches Spiralseil besteht in der Regel aus einer Vielzahl an Runddrähten. Diese werden wie in Abb. 1 spiralförmig in mehreren Lagen mit gegenläufigem Schlagwinkel um den Kerndraht gewickelt. In Abhängigkeit des Seiltyps variiert dabei die Anzahl der verwendeten Aussenlagen. Häufig kommen unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz. Während die äusseren Lagen aus Aluminiumdrähten bestehen, sind der Kerndraht und die erste Lage sehr oft aus Stahl.

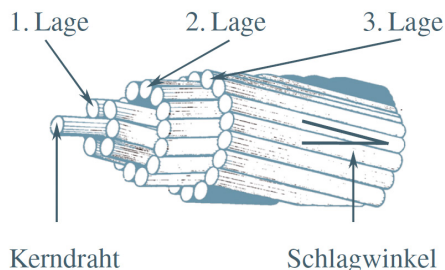


Abb. 1: Aufbau eines Spiralseils

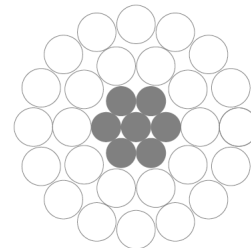


Abb. 2: Querschnitt eines ACSR¹ Drake Leiters

Im Rahmen eines durch die «swisselectric research» und dem Industriepartner PFISTERER SEFAG finanzierten Forschungsprojektes entwickelt die Hochschule Luzern ein mechanisches Simulationsmodell für Freileiter, welches in erster Linie auf Zug und Biegung belastet wird.

2 Modellierung

Die Struktur von Spiralseilen erlaubt keine einfache analytische Beschreibung des mechanischen Verhaltens. Eine besondere Schwierigkeit stellt hierbei die Modellierung der Kontakte und die in diesem Zusammenhang auftretende Reibung zwischen den einzelnen Drähten dar. Einfache Modelle vernachlässigen sehr häufig diesen Umstand oder stossen an die Grenzen der analytischen Lösbarkeit.

Der hier vorgestellte Modellierungsansatz über die Finite Element Methode orientiert sich an der Forderung, alle wichtigen Effekte insbesondere die der Drahtkontakte zu berücksichtigen, flexibel und für

¹ ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced

Leiterlängen mit mehreren Windungen einsetzbar zu sein. Des Weiteren soll die Umsetzung mit dem kommerziellen Softwarepaket ANSYS erfolgen.

Ein komplett aus Volumenelementen bestehendes Modell ist aufgrund der dafür notwendigen Rechenkapazitäten und Rechenzeiten nicht realisierbar. Punktuell wird ein solches Modell zur Verifizierung eingesetzt. Einen effizienten Lösungsansatz bietet die Idealisierung der Einzeldrähte mit Balkenelementen. Diese erlauben es, mit einer deutlich geringeren Anzahl von Freiheitsgraden alle im Einzeldraht auftretenden Belastungszustände wie Zug/Druck, Biegung und Torsion abzubilden. Darüber hinaus ist es einfacher möglich, einen parametrischen Aufbau zu realisieren, da die Knoten und Elemente der Drähte entlang einer mathematisch simplen Helix angeordnet werden können.

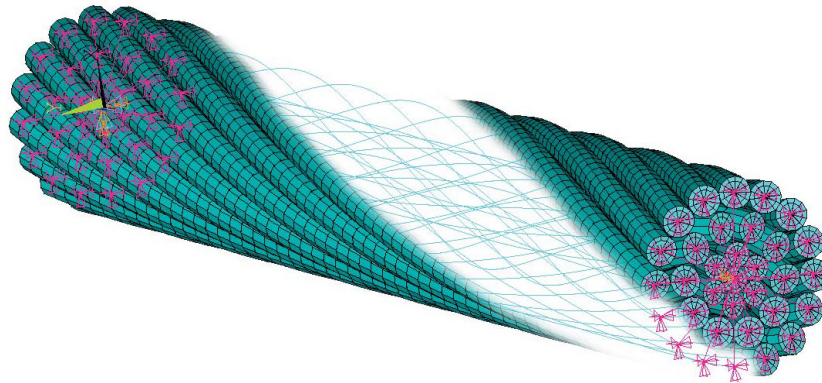


Abb. 3: Balkenmodell des 3-lagigen Leiters ACSR-Drake

Die Kontaktverhältnisse innerhalb eines Leiterseils stellen sich beispielhaft wie in Abb. 4 dar. Durch die Vorspannung des Leiters und der Verwindung der Einzeldrähte wird ein Schnürdruck erzeugt, der als Radialkraft auf die jeweils darunter liegenden Drahtlagen wirkt. Abhängig von den tatsächlichen geometrischen Verhältnissen kann es auch zu Kontakt zwischen den Drähten innerhalb einer Lage kommen (Tangentialkontakt).

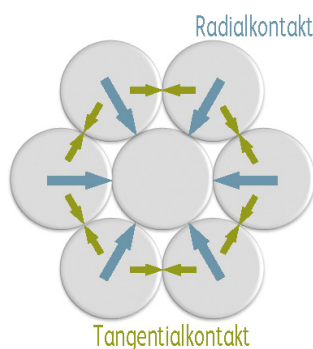


Abb. 4: Kontaktsituation im Leiter

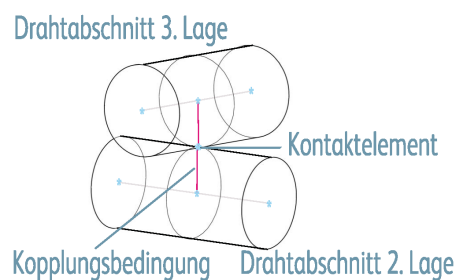


Abb. 5: Kontaktmodellierung

Die Kontaktmodellierung erfolgt unter der Voraussetzung kleiner relativer Verschiebungen mit Hilfe von Punkt-zu-Punkt-Kontakten. Hierzu ist es notwendig, an der geometrischen Berührungsstelle zwei zusätzliche Knoten zu platzieren. Diese sind mit dem jeweiligen Zentrums-knoten der Balkenelemente gekoppelt und repräsentieren die Endknoten des dazwischen liegenden Kontaktelements. Als Kontaktalgorithmus kommt das Penalty-Verfahren zum Einsatz. Dieses erlaubt durch die Vorgabe von Normal- und Tangentialsteifigkeiten, die entsprechende Nachgiebigkeit des Kontakts und der Drähte in Querrichtung sowie Tangentialkräfte durch Coulombscher Reibung zu berücksichtigen.

Der Netz- und Modellaufbau erfolgt voll parametrisiert mit Hilfe der APDL-Programmiersprache von ANSYS. Dabei werden die Knotenkoordinaten und Elementkonnektivität mit einem separaten Programm voraus berechnet und als Textdateien zur Verfügung gestellt. Die Netztopologie orientiert sich im Wesentlichen an den exakt berechenbaren, geometrischen Kontaktstellen. Für den Tangentialkontakt, der in Wirklichkeit einen Linienkontakt darstellt, kann eine äquidistante Unterteilung gewählt werden. An den Radialkontaktstellen, die mit Ausnahme zwischen Kerndraht und erster Lage immer Kreuzungskontakte darstellen und unregelmässig auftreten, werden zusätzliche Elementunterteilungen eingeführt.

Die Drahtenden sind starr mit den Endknoten des Kerndrahts gekoppelt, so dass eine Lasteinleitung durch Einzelkräfte und -momente sowie unterschiedliche Lagerungsarten sehr einfach möglich sind. Das Material wird rein linear, elastisch angenommen.

3 Resultate

3.1 Biegesteifigkeit

Die im Leiterseil auftretenden mechanischen Spannungen stehen in direktem Zusammenhang mit der Zugkraft und der lokalen Biegung. 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.

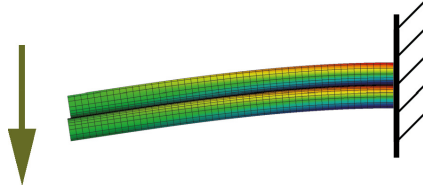


Abb. 6: Biegespannung ohne Reibung

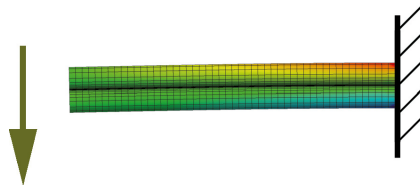


Abb. 7: Biegespannung bei Verbundkontakt

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. 6 dargestellt. Wird dagegen angenommen, dass beide Balken über die gesamte Länge fest miteinander verbunden sind (Haftzustand), resultiert aus der Biegung eine um Faktoren geringere Verformung (Abb. 7). Im ersten Fall ist das Flächenträgheitsmoment beider Balken für sich entscheidend. Für den zweiten Fall kommt versteifend der Steiner-Anteil hinzu. Wird Gleitreibung berücksichtigt, stellt sich eine Biegesteifigkeit zwischen diesen beiden Extremwerten ein.

Papailiou [1] hat ein mathematisches Modell entwickelt, welches den Zusammenhang zwischen der Biegesteifigkeit und der Krümmung eines Leiterseils in Abhängigkeit der inneren Reibung beschreibt. Dabei wird nur der radiale Kontakt (rc) berücksichtigt. Dieses soll zum Vergleich mit dem vorgestellten FE-Modell herangezogen werden. In Abb. 8 und 9 sind die Ergebnisse für einen Leiter des Typs ACSR Drake bei unterschiedlichen Vorspannkraften mit und ohne Tangentialkontakt (tc) dargestellt. Für die Ermittlung der Biegesteifigkeit wurde ein 356 mm langes Modell unter reiner Momentenbelastung analysiert und die Krümmung am Kerndraht ausgewertet.

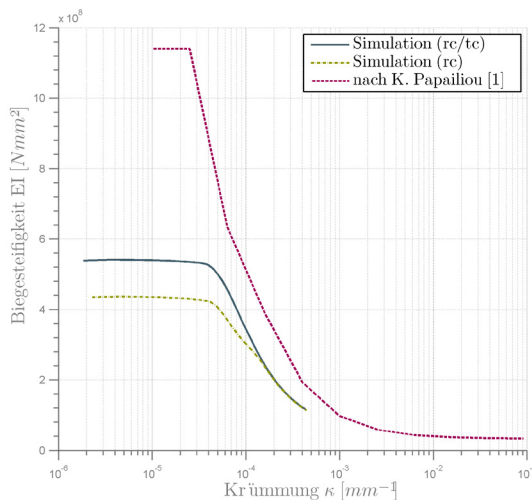


Abb. 8: Vergleich variabler Biegesteifigkeit mit analytischer Berechnung

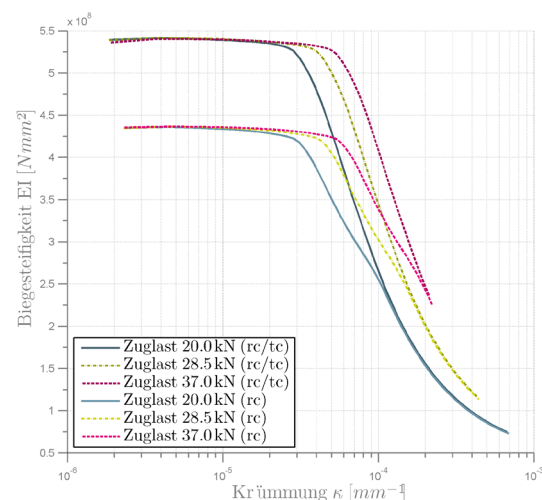


Abb. 9: Variable Biegesteifigkeit bei unterschiedlichen Zuglasten

Bei geringer Biegebelastung, also kleinen Krümmungen des Drahtverbunds, existiert eine theoretisch maximale Biegesteifigkeit. Die Drähte haften aufgrund des wirkenden Schnürdrucks. Mit zunehmendem Krümmungsradius beginnen die Drähte im Leiter zu rutschen. Dieser Effekt mindert den Maximalwert kontinuierlich ab. Bei genügend grosser Krümmung stellt sich ein Zustand minimaler Biegesteifigkeit ein. Das hier vorgestellte Modell zeigt das prognostizierte Verhalten, jedoch wird die theoretisch max. Biegesteifigkeit nicht erreicht. Als Begründung kann genannt werden, dass der Radialkontakt wie oben erwähnt nur punktuell vorliegt und sich die einzelnen Drähte nicht über die gesamte Länge gegenseitig abstützen. Der abschliessende Nachweis, dass die max. Biegesteifigkeit tatsächlich mehr als die Hälfte geringer ist als der theoretisch prognostizierte Wert, steht noch aus und lässt sich nur sehr schwer experimentell führen.

Wie aus den Abb. 8 und 9 ebenfalls ersichtlich ist, hat die Berücksichtigung des Tangentialkontakts eine eindeutig versteifende Wirkung, zumindest für kleine Krümmungen. Der Tangentialkontakt tritt bei dem hier untersuchten Leitertyp aufgrund der geometrischen Verhältnisse nur in der ersten Lage auf. Im Zustand des Haftens kommt es zu einer Sperrung in Umfangsrichtung, welche zu dieser Steifigkeitserhöhung führt. Beginnen die einzelnen Drahtlagen zu rutschen, nimmt dieser Einfluss jedoch kontinuierlich ab.

3.2 Verformung und statische Hysterese

Zur Validierung des Modells wurden statische Biegeversuche an einem realen Leiter durchgeführt. Hierzu wurde ein zwei Meter langer Leiter des Typs ACSR Drake unter verschiedenen Zugkräften vorgespannt und mittig durch eine Querkraft bis zu einer Amplitude von 20 mm wechselseitig belastet, was die Aufnahme von Hysteresekurven gestattete. Neben der Querkraft wurde die Auslenkung des Leiters an sechs unterschiedlichen Positionen gemessen. Zur Bestimmung der Modellparameter wurde ein Stück des Leiters geometrisch vermessen. Mit Hilfe von Materialproben sind die elastischen Eigenschaften der Drahtmaterialien bestimmt worden.

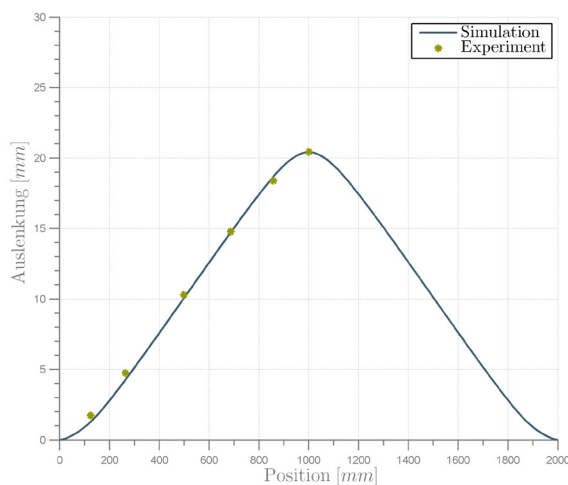


Abb. 10: Vergleich gemessener und simulierter Auslenkung

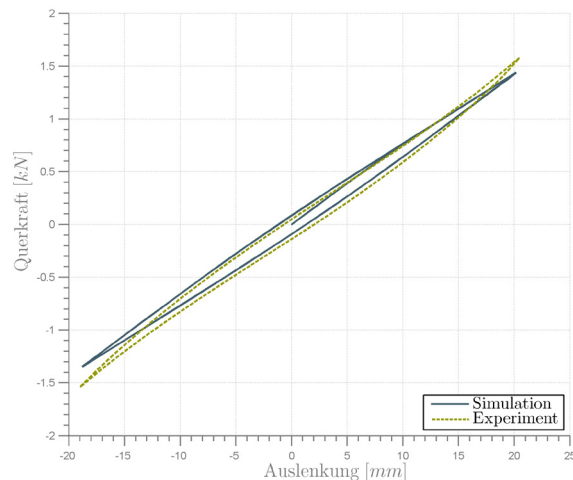


Abb. 11: Vergleich gemessener und simulierter Hysteresekurven in Leitemitte

Abb. 10 zeigt den Vergleich der max. Auslenkung zwischen Versuch und Simulation an den sechs Messstellen. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden. Die etwas grössere Abweichung an der ersten Messposition (links) kann durch den Umstand erklärt werden, dass im Modell die Einspannung ideal starr angesetzt wurde. In Wirklichkeit jedoch besitzt die Einspannung eine gewisse Nachgiebigkeit. In Abb. 11 ist die berechnete und gemessene Hysterese in Leitemitte während eines vollständigen Zyklus dargestellt. Die eingeschlossene Fläche entspricht der durch Reibung dissipierten Arbeit. Der Unterschied zwischen Versuch und Modell beträgt ca. 15%.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das hier vorgestellte Modell bietet einen effizienten Ansatz für die Berechnung von klassischen Freileitungsseilen. Es bildet die veränderliche Biegesteifigkeit des Leiters sehr gut ab. Im Gegensatz zu gängigen, analytischen Modellen können die im Spiralseil auftretenden Kräfte berechnet werden. Aussagen zur Verteilung und Grösse der bei Zug und Biegung auftretenden mechanischen Spannungen sind so über den gesamten Leiterquerschnitt und mit frei wählbaren Modellierungsparametern wie Anzahl, Durchmesser und Lagenwinkel der Einzeldrähte möglich. Zusätzlich kann die durch Reibung dissipierte Energie über einen vollen Hystereseyklus rechnerisch quantifiziert werden.

Im nächsten Schritt wird das vorgestellte Modell so erweitert, dass Spiralseile mit mehr als drei Lagen automatisch generiert und simuliert werden können. Des Weiteren wird der Einfluss von nichtlinearem Materialverhalten untersucht.

5 References

- [1] Papailiou, K. O.: "Die Seilbiegung mit einer durch die innere Reibung, die Zugkraft und die Seilkrümmung veränderlichen Biegesteifigkeit", ETH Dissertation, 1995