

Zusammenfassung der Promotionsschrift

Nonlinear analysis models for the static and dynamic behaviour of structural cables

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

M.Sc. Abdulmagid Sedig Khalafallah Bendalla

Geboren am 22. Dezember 1993 in Tripoli, Libyen

Mentor: Prof. Dr. Guido Morgenthal

Weimar, May 2024

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Seile sind effiziente Tragelemente, die aus mehreren dünnen Drähten bestehen. Mit der wachsenden Zunahme flexibler und leichter Strukturen bieten sich Seile mit ihrer hohen Festigkeit und großen Länge an, um als Haupttragelemente in weit gespannten Strukturen, z.B. in seilverspannten Brücken, eingesetzt zu werden.
2. Trotz der strukturellen Relevanz der Seile für die Brücke kommt es immer wieder zum Einsturz von Bauwerken, der auf das Versagen von Seilsystemen zurückzuführen ist. Dementsprechend erfordert ihr Einbau in Bauwerke eine regelmäßige Überwachung.
3. Bei Seilen handelt es sich um komplexe Bauteile, die aufgrund ihres Durchhangs, der Unsicherheiten bei ihren Randbedingungen und des Haftgleit-effekts zwischen den Drähten eine nichtlineare Geometrie aufweisen. Verschiedene mechanische Eigenschaften und Parameter geben Aufschluss über die Seiltragfähigkeit.
4. Zur Ermittlung mechanischer Parameter (z.B. der Zugtragfähigkeit) werden verschiedene Methoden angewandt, bei denen Messungen am Seil vorgenommen werden. Bei der Interpretation dieser Messdaten sind die inhärenten Nichtlinearitäten im Verhalten des Seils zu berücksichtigen. Die Verwendung validierter, nichtlinearer Seilmodelle ermöglicht eine gründliche Interpretation. Bei der Entwicklung von neuen Seilmodellen sollte jedoch nicht nur auf eine genaue Modellierung geachtet werden, sondern auch auf eine einfache Anwendung in der Praxis.
5. Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) ist ein Analyseverfahren, mit dem detaillierte Analysen von Seilen durchgeführt werden können, und das gleichzeitig effizient für praktische Anwendungen geeignet ist.
6. Motiviert durch die Notwendigkeit Bewertungsmodelle zu verbessern, zielt diese Arbeit darauf ab, die Systematisierung der Seilanalyse zu verbessern, indem sie sich auf die Modellierung und Systemidentifikation von Seilen mit physikalisch-mechanischen Interaktionen mit Umlenksätteln, und der Reibung innerhalb des Seils konzentriert.

Stand der Technik

7. Mehrere mathematische und numerische Seilformulierungen gehen auf die Differentialgleichung zurück, die das dynamische Gleichgewicht eines infinitesimalen Seilelements erklärt. Diese Formulierung erklärt die Hauptkomponenten eines Seilmodells, die seine Schwingungseigenschaften beeinflussen, basierend auf Parametern wie: Zugkraft, Biegesteifigkeit, Seilmasse, Steifigkeit, Dämpfung und dynamische Variabilität der Zugkraft.
8. Angesichts der Vielzahl von Modellen ist eine systematische Klassifizierung unerlässlich, um sie auf der Grundlage von Modellannahmen, Parameterdarstellung, Lösungsmethode, numerischer Effizienz und Anwendung zu unterscheiden.
9. Die Seilmodelle, die in der Praxis zur Ermittlung der Zugkraft verwendet werden, stellen üblicherweise Korrelationen zwischen den Schwingungseigenschaften des Seils, wie z.B. den Eigenfrequenzen, und der Zugkraft her. Trotz ihrer Effizienz führen ihre linearisierenden Annahmen jedoch zu Unsicherheiten und schränken ihre Anwendung ein, insbesondere bei Seilen mit großen Auslenkungen, kurzer Länge oder Wechselwirkungen mit Umlenkstellen.
10. Bestehende Modelle lassen in der Regel die Berücksichtigung Umlenksätteln außer Acht. Diejenigen, die sie berücksichtigen, stützen sich auf numerische Formulierungen, die sie

für reale Szenarien unpraktisch machen. Daher erfreuen sich vereinfachte Modelle trotz ihrer größeren Unsicherheit weiterhin großer Beliebtheit.

11. Die Verwendung nichtlinearer FE-Formulierungen ermöglicht eine mathematische Definition des Seilelements durch Integration einer iterativen Matrixdefinition der geometrischen Steifigkeit. Die Implementierung erfolgt in der Regel durch FEA, was sie zu einer praktischen Wahl für reale Anwendungen macht.
12. In dieser Arbeit wird der Diskurs über die reine Literaturrecherche und Zusammenstellung von Seilmodellen zu einer systematischen Klassifizierungstabelle verdichtet, die verschiedene Seilmodelle umfasst. Die Klassifizierung berücksichtigt Modellierungsannahmen, die die Entwicklung von Modellen für Seile mit Umlenksätteln und die entsprechende Untersuchung des Drahtkontakts zwischen den Seildrähten vorangetrieben haben.

Methodik

13. Parametrisierte FE-Formulierungen dienen der Beschreibung des statischen und dynamischen Verhaltens des Seils unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Innerhalb dieses Rahmens wird eine geometrisch nichtlineare FEA verwendet, um die nichtlineare Geometrie und die entsprechenden Änderungen der inneren Kräfte im Seil bei Verschiebung zu berücksichtigen.
14. Bei Seilen mit Umlenksätteln wird der Kontakt mit dem Umlenksattel durch die Anbringung nichtlinearer Federn am Seil dargestellt, die entsprechend der Verschiebung des Seils in der Nähe des Sattels aktiviert werden. Das Seil selbst wird als ein gespanntes Balkenelement modelliert. Bei der Lösung des Modells erfährt das Seil eine große Auslenkung. Im Gleichgewicht passen sich die Federn des Sattels den Änderungen der Geometrie an, die auf der Geometrie des Trägers, der Spannkraft und Steifigkeit des Seils sowie den Schwingungen des modellierten Seils beruhen. Dieses Modell wird als "Saddled-Cable-Model" bezeichnet.
15. Zur weiteren Untersuchung der komplexen Auswirkungen des Kontakts zwischen den Drähten auf die Biegung des Seils werden nichtlineare Kopplungselemente verwendet, um den Kontakt zwischen jeweils zwei benachbarten Drähten in einem Semi-parallel Wire (SPW) Seil mit großem Durchmesser zu beschreiben. Dabei werden zwei Formen des Kontakts berücksichtigt: der Kontakt zwischen den Drähten zwischen aufeinanderfolgenden Lagen sowie der Kontakt zwischen und innerhalb der Drähte, wobei die Wechselwirkungen zwischen den Drähten innerhalb derselben Lage und in benachbarten Lagen berücksichtigt werden.
16. Die Validierung der vorgestellten Modellierungsvorgaben und Fallstudien erfolgt durch den Vergleich der Modellergebnisse mit experimentellen Ergebnissen. Für die Modellkalibrierung und die Parameteroptimierung werden Ersatzmodelle verwendet, die probabilistische Parameteridentifizierungsmethoden wie die Gaußsche Prozessregression einsetzen.

Ergebnisse

17. In zwei Fallstudien mit auf Brücken installierten Seilen wurden bekannte linearisierende Seilmodelle mit dem geometrisch nichtlinearen Seilmodell (engl. Sagged-Cable-Model) verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell in beiden Fällen die geringste Unsicherheit bei der Ermittlung der Eigenfrequenzen aufwies, mit einem mittleren absoluten Fehler (engl. MAE) von 1,3 %, verglichen mit 3,5 % und 3,3 % für andere mathematische Modelle. Das Sagged-Cable-Modell zeigte eine

höhere Genauigkeit bei der Ermittlung der Zugkraft, mit einem MAE-Fehler von 0,17 %, verglichen mit 1,5 % und 1,6 % für andere bekannte Modelle, im Vergleich zu direkt gemessenen Zugkräften.

18. Das neu entwickelte Saddled-Cable-Modell führte zu einer genauen Vorhersage des Kontaktpunkts für ein vollkommen flexibles Seil. Eine vergleichende Analyse mit analytischen Lösungen ergab nahezu identische Ergebnisse. Die Einbeziehung der Biegesteifigkeit unterstreicht den erheblichen Einfluss der Biegesteifigkeit auf den Kontaktpunkt.
19. Das neu entwickelte Saddled-Cable-Modell wird zur Ermittlung von Seilkräften aus Schwingungsmessungen eines externen Spannglieds in einer Hohlkastenbrücke angewendet. Die Ergebnisse der Modellkalibrierung mit Parameter-Optimierung zeigen, dass das Modell sowohl die Zugkraft im Spannglied als auch die Kontaktlänge mit dem Umlenksattel vorhersagt. Die Fehlerwerte für die Ermittlung der Zugkraft des Saddled-Cable-Modells sind deutlich geringer, z.B. 1,3% im Vergleich zu 3,9%, 2,1% und 2,5% bei anderen bekannten Modellen. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass die Biegesteifigkeit mit einer hohen Unsicherheit verbunden ist, der von der Zugkraft abhängt.
20. Bei der Untersuchung der Biegesteifigkeit von SPW-Seilen zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Restverflechtung auf das Biegeverhalten, wobei ein kohäsives Verflechtungsmodell eine hohe Genauigkeit aufwies. Vergleiche mit einem kalibrierten Biegesteifigkeits-Balkenmodell zeigen, dass sich das Abrutschen der Drähte von den Bereichen mit der größten Krümmung zu denen mit geringerer Krümmung ausbreitet. Außerdem zeigt sich bei zyklischer Belastung, dass kleine Hystereseschleifen auf Effekte zweiter Ordnung durch die Zugkraft zurückzuführen sind. Drahtschlupf und Biegesteifigkeit werden durch die Reibung zwischen den Drähten beeinflusst.
21. Die Kombination der beiden neu entwickelten Modelle zielt darauf ab, das Kontaktproblem sowie die Auswirkungen des Haftgleiteffekts zwischen den Drähten im Bereich des Umlenksattels besser beschreiben zu können. Darüber hinaus erlaubt die gewählte Modellierung von Drähten mit großen Durchmessern die Untersuchung anderer Problemstellungen, wie z.B. das Durchtrennen von Drähten und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Lastumverteilung zwischen den Drähten, sowie den Einfluss der Reibung auf die Länge innerhalb der die Drähte wieder mittragen.



Unterschrift des Betreuers