

Zusammenfassung der Promotionsschrift

# **Partitioned Algorithms using Vortex Particle Methods for Fluid–Structure Interaction of Thin-walled Flexible Structures**

DISSERTATION

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

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**M.Sc. Samir Chawdhury**

Geboren am 3. Juni 1984 in Netrokona, Bangladesch

Mentor: Prof. Dr. Guido Morgenthal

(interner Doktorand)

Weimar, 25 Juni 2020

## Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Die Fluid–Struktur–Kopplung, FSK (oder FSI im internationalen Kontext) ist ein multiphysikalischer Effekt der gegenseitigen Wechselwirkung zwischen verformbarer Struktur und umgebender oder interner Fluidströmung. FSK tritt unabhängig von der Größenordnung auf und reicht von schwingenden Blättern bis zum Flattern von Flugzeugflügeln. Der zunehmende Trend zu extrem flexiblen und leichten Strukturen, wie z.B. weitgespannten Schrägseilbrücken, superhohen Türmen und Schornsteinen oder großen Membrandächern, erfordert eine genaue Vorhersage der Wind–Struktur–Kopplung (WSK) im Entwurfsprozess, um potenzielle Schäden zu vermeiden.
2. FSK-Probleme sind oft zu komplex, um sie analytisch zu lösen. Folglich werden numerische Methoden immer häufiger eingesetzt, da diese in der Lage sind, aeroelastische Wechselwirkungen in großem Umfang vorherzusagen, komplexe Formen zu modellieren und die Strömung um bewegte Körper detailliert zu visualisieren. Mit den Fortschritten der numerischen Strömungsmechanik (CFD im internationalen Kontext) und der numerischen Strukturmechanik wurden signifikante Forschungsarbeiten zur FSK realisiert. Es ist jedoch nach wie vor schwierig, viele der grundlegenden Fragen der FSK bezüglich geeigneter Kopplungsschemata, der Präzision, Robustheit, Effizienz und Anwendbarkeit der Simulationstechniken zu beantworten, was auf die Notwendigkeit weiterer Forschungsarbeiten hinweist.
3. Die Vortex-Partikel-Methode (VPM) hat sich als genaue und effiziente CFD-Simulationstechnik zur Modellierung der Strömung um komplexe Geometrien etabliert. Bestehende FSK-Modelle der VPM, die im Zusammenhang mit zweidimensionalen (2D) und pseudo-dreidimensionalen (Pseudo-3D) Mehrschichtformulierungen stehen, wurden erfolgreich für aerodynamische Phänomene in weitgespannten Brücken eingesetzt. Die modale Überlagerungstechnik wird für die Strukturmechanik von starren Querschnitten verwendet. Eine flexible Struktur, die großen Schwingungen ausgesetzt ist, erfordert jedoch eine fortgeschrittenere Strukturanalyse. Kurz gesagt, bestehende VPM-Modelle sind nicht in der Lage, die FSK eines Körpers zu analysieren, der seine Form verändert, wie z.B. das strömungsinduzierte Biegen von Platten oder das Ausbeulen von Schalenstrukturen.
4. Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Erweiterung der VPM für gekoppelte FSK-Simulationen dünnwandiger flexibler Strukturen unter stationären und veränderlichen Anströmungen. Die erste Aufgabe besteht darin, die 2D-VPM so zu erweitern, dass die strömungsinduzierten großen Bewegung von flexiblen dünnen Körpern analysiert werden können. Dies erfordert die Kopplung der 2D VPM mit einem fortgeschrittenen Strukturmodell, das geometrisch nichtlineare Effekte einbeziehen kann. Eine weitere Aufgabe besteht darin, die Pseudo-3D-VPM für die Mehrscheiben-FSK-Analyse von schalenartigen Systemen zu erweitern. Neben der Validierung der erweiterten FSK-Modelle ist es wichtig, ihre Eignung für verschiedene FSK-Probleme und Anwendungsbereiche dünnwandiger Strukturen nachzuweisen. Die abschließende notwendige Aufgabe ist die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur, die durch Einströmschwankungen beeinflusst wird.

## Stand der Wissenschaft

5. Für die Analyse von FSK-Problemen existieren zahlreiche numerische Methoden, die als monolithisch klassifiziert und aufgrund des Kopplungsmechanismus partitioniert werden können. Monolithische Algorithmen sind robust und stabil, da die Gleichungen von Strömung und Struktur gleichzeitig in einem einzigen Löser gelöst werden. Die partitionierten Algorithmen ermöglichen die Synthese fortschrittlicher und effizienter Berechnungsschemata für die Strömungs- und Strukturmechanik. Partitionierte Algorithmen sind rechnerisch effizient, die Stabilität der Kopplungsmethode erfordert jedoch besondere Aufmerksamkeit.
6. Die Arbitrary-Lagrangian Eulerian (ALE)-Methode und die Immersed Boundary (IB)-Methode sind zwei allgemeine numerische Verfahren für FSK-Simulationen mit großer

Verdrängung. Die ALE-Methode verwendet körperangepasste Gitter und erfasst daher die Position der sich bewegenden Fluid-Struktur-Grenzfläche genau. Die Effizienz nimmt jedoch bei großen Verformungsproblemen aufgrund der Notwendigkeit einer Netzumstrukturierung ab. IB-Methoden bieten einen alternativen Ansatz für die Simulation von FSK-Problemen mit komplexen Geometrien und großen Verformungen ohne erneute Vernetzung.

- Die VPM basiert auf einer vereinfachten Vorticity-Beschreibung der Navier-Stokes-Gleichungen. Sie ist eine brauchbare Alternative zu gitterbasierten Schemata, da sie die Stärke hat, Rotationsströmungsmerkmale zu erhalten, die das Separations-, Wiederanlege- und Wirbelbildungsverhalten antreiben. Die VPM, die die IB-Methode verwendet, hat sich für die Analyse der Strömung um komplexe Geometrien als erfolgreich erwiesen. Das vorhandene 2D VPM kann eine FSK-Simulation eines starren Querschnitts durchführen, der nur auf 3 Freiheitsgrade beschränkt ist. Das Pseudo-3D-VPM verwendet, wie der Name schon andeutet, mehrere Schichten von 2D-VPM-Simulationen entlang der Längsrichtung der Struktur, um die maßstäbliche 3D-FSK-Analyse zu replizieren. Zu den jüngsten Entwicklungen der VPM gehören die Konzepte der Adaptivität zur Steuerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie die Erzeugung von Zuflussschwankungen. Es gibt jedoch keine nennenswerten Beiträge von VPM zur FSK-Analyse verformbarer Geometrien, die für praktische Anwendungen allgemein genutzt werden können.

## Eingesetzte Methoden

- Der Fluid- und der Strukturlöser sind unter Verwendung des partitionierten Algorithmus in beiden FSK-Erweiterungen von 2D und Pseudo-3D VPM gekoppelt. Bei jedem Zeitschritt der gekoppelten Analyse ist es notwendig, die Lösung von einem Solver zum anderen mit der Beachtung der notwendigen Randbedingungen auszutauschen.
- Der auf VPM basierende Strömungslöser verwendet die IB-Methode zur Diskretisierung der Geometrie. Die Oberflächenwirbelstärke wird als Sheets mit linear variierender Wirbelstärke entlang der Oberflächenpanele diskretisiert. Mit der Anwendung der Geschwindigkeitsrandbedingung auf den Festkörper wird das Randwertproblem unter Verwendung einer Einflussmatrix und eines Vektors unbekannter Oberflächenverwirbelung approximiert. Die Einflussmatrix muss in jedem Zeitschritt auf der Grundlage der aktualisierten Geometrie und der Randbedingungen neu berechnet werden, so dass die Auswirkungen des sich verformenden Körpers auf die Strömungsfelder einbezogen werden.
- Die Strukturgleichungen werden auf der Mittelfläche der dünnen Geometrie formuliert und gelöst. Die Erweiterung von 2D VPM wird für FSK-Probleme mit großen Verschiebungen bei dünnen Plattensystemen entwickelt. Die Finite-Elemente (FE)-Formulierung des 2D-Korotations-Balkenelements wird für geometrisch nichtlineare Analysen verwendet. Bei jedem Simulationsschritt werden die Strömungskräfte von den Oberflächenpanelen auf die FE-Knoten in der Mitte der Oberfläche projiziert. Die Knotenlösungen der Struktur werden als Rückkopplung auf die Oberflächenpanele projiziert, um die Kontinuitätsrandbedingungen zu realisieren. Das Verfahren wird ähnlich wie das Pseudo-3D VPM angewendet, jedoch scheibenweise. Wichtig ist, dass die Erweiterung von Pseudo-3D VPM für FSK von linearen Schalenstrukturen vorgeschlagen wird. Die modale Überlagerungstechnik wird wegen ihrer rechnerischen Effizienz eingesetzt. Das Novum ist die Einbeziehung von 3D-Eigenschwingungsmoden in die Strukturanalyse.
- Für die Modellierung von Einströmschwankungen werden zwei neue Erweiterungen für 2D VPM entwickelt, die als Einströmbedingung in der FSK-Analyse verwendet werden können. In der ersten Erweiterung wird die niederfrequent pulsierende Strömung modelliert, indem vorberechnete Wirbelteilchen von zwei Seeding-Punkten nahe der Grenze stromaufwärts freigesetzt werden. Die zweite Erweiterung

verwendet die Partikel zur effizienten Reproduktion turbulenter Wirbelschleppen von Strömungen, die an Körpern vorbeifließen.

## Wesentliche Ergebnisse

12. Die Strömung um eine starre dünne Platte wird auf aufgezwungene Translations- und Rotationsbewegungen untersucht. Ziel ist es, die Genauigkeit des Mittelflächenansatzes in den gekoppelten Erweiterungen der VPM hinsichtlich der Projektion von Lösungen und der Umsetzung von Randbedingungen zu bewerten. Der Vergleich der Strömungsfelder mit einem starren Modell ist sehr zufriedenstellend.
13. Die Erweiterung von 2D- und Pseudo-3D-VPM wird an FSK-Benchmark-Problemen dünner Platten validiert. Die strömungsinduzierte Bewegung einer flexiblen Krag-Platte, die an einem quadratischen Körper befestigt ist, wird zunächst mit der 2D-gekoppelten VPM analysiert. Die maximalen vertikalen Spitzenverschiebungen und die gekoppelten Antwortfrequenzen liegen gut im Bereich der Ergebnisse von Referenzstudien. Dasselbe FSK-Problem wird für die Validierung der Pseudo-3D-VPM mit einer 7-Schnitt-Simulation analysiert, und der Vergleich der Ergebnisse wird als zufriedenstellend befunden.
14. Das 2D-gekoppelte VPM wird zur Analyse der Grenzyklenoszillation mit großer Amplitude von invertierten Krag-Platten verwendet. Die modellierte kritische Strömungsgeschwindigkeit und die Spitzenreaktionen werden im Vergleich zu einer analytischen Lösung mit einer Genauigkeit von 99,5 % berechnet. Die Identifizierung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit mit dem Pseudo-3D VPM ist ähnlich genau. Die Ansprechamplitude ist jedoch abweichend, da das Modell für lineare Strukturen gilt. Das Pseudo-3D-Modell wird für FSK-Probleme mit kleiner Verdrängung und zur Identifizierung des kritischen Strömungsszenarios empfohlen.
15. Die validierte Erweiterung der 2D VPM wird erfolgreich für verschiedene komplexe aeroelastische Phänomene eingesetzt, wie z.B. - a) invertierte und T-förmige Ausleger mit/ohne Spitzenmasse, b) flexible Membransysteme und c) Schirmstrukturen. Die andere Erweiterung der Pseudo-3D VPM wird für die Analyse von großen Membrandächern mit Identifizierung der Strömungsgeschwindigkeit für ein potentiell Versagen eingesetzt. Die Methode wird weiter auf einem 1500 m hohen Turm eines Aufwindkraftwerkes mit Ringsteifen zur Analyse der wirbelinduzierten Schwingungen eingesetzt. Die Spitzen-Querwindantwort des Kamins bei einer Resonanzwindgeschwindigkeit von 70 m/s wird bei 50,2 m (3,35% von 1500 m) erhalten. Der Schornstein ohne Versteifung zeigt jedoch bei einer wesentlich geringeren Windgeschwindigkeit von 20 m/s eine signifikante Schalenausbeulung.
16. Die erweiterte 2D VPM wird anschließend in einem bestimmten Forschungsbereich des WSI eingesetzt: der kleinräumigen aeroelastischen Energiegewinnung. Die Anwendbarkeit dieser Methode zur Analyse des aero-elektro-mechanischen gekoppelten Verhaltens wird mit einem Referenz-T-förmigen elektromagnetischen Energy Harvester validiert. Die Vorhersage der Flatterwindgeschwindigkeit und die Leistungsabgabe des Referenz-Harvesters sind zufriedenstellend. Die Untersuchung verschiedener Dünnschichtsysteme zeigt, dass ein T-förmiger Kragträger mit Spitzenmasse ein hohes Potenzial für die Energiegewinnung für einen breiten Bereich von Windgeschwindigkeiten hat. Schließlich wird der Einfluss der Einströmturbulenz für den T-förmigen Harvester untersucht. Der T-förmige Harvester zeigt ein großes Potential der Energieproduktion im atmosphärischen Windfeld.
17. Sehr gute Ergebnisse und die Begrenzung der 2D- und Pseudo-3D-Erweiterungen von VPM zeigen die Motivation für eine weitere Erweiterung des Strömungslösers auf 3D. Dies würde die Anwendbarkeit der FSK-Erweiterungen unter Einbeziehung der Querströmungseffekte verbessern.

---

Unterschrift des Betreuer