

Zusammenfassung der Promotionsschrift

**Numerische Simulation der Bluff-Body-Aerodynamik
unter Anwendung von Partikelmethoden in einem
pseudo-dreidimensionalen Verfahren**

DISSERTATION

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

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
M.Sc. Khaled Tolba
geboren am 27. Mai 1987
in Kairo, Ägypten

Mentor: Prof. Dr. Guido Morgenthal

Weimar, April 2019

Einleitung und Motivation

1. Bei flexiblen Leichtbaustrukturen kann die Wind-Struktur-Interaktion (WSI) zu signifikanten Tragwerksantworten führen. Eine vollständige dreidimensionale numerische Simulation der WSI ist aufgrund der physikalischen Komplexität des Problems und der hohen rechnerischen Anforderungen nur begrenzt möglich.
2. Die aerodynamischen Effekte bei der Umströmung der Struktur sind instationär und führen zu transienten Druckverteilungen auf der Strukturoberfläche, die bei schwingungsanfälligen Bauwerken zu erheblichen dynamischen Anregungen führen können. Dadurch ergibt sich ein Fluid-Struktur-Wechselwirkungsproblem, das verschiedenste aeroelastische Anregungsphänomene auslösen kann. Die an Bauwerken wesentlichen Effekte sind von der Schwingungsamplitude und von der mittleren Windgeschwindigkeit abhängig. Die Komplexität der Einwirkungen des Windes auf schwingungsanfällige Bauwerke muss sorgfältig untersucht und analysiert werden.
3. Aeroelastizität ist der Oberbegriff der physikalischen Vorgänge, die Interaktion zwischen Windeinwirkung und Tragwerksschwingungen beschreiben. Es lassen sich verschiedene Anregungsmechanismen unterscheiden, die alle bautechnische Relevanz haben:
 - (3.1) Böenerregung, d.h. Anregung durch instationäre Verhältnisse in der Anströmung (Buffeting).
 - (3.2) Instabilitätsinduzierte Anregung, d.h. Anregung durch instabiles Verhalten der Umströmung, insbesondere durch Ablöseerscheinungen, z.B. wirbelinduzierte Schwingungen (Vortex Induced Vibrations (VIV)).
 - (3.3) Bewegungsinduzierte Schwingungen, d.h. Schwingungen, die durch Kräfte hervorgerufen werden, die durch die Bewegung des Festkörpers in der Strömung entstehen, d.h. insbesondere Galloping und Flattern.
4. Um eine detaillierte Modellierung der Aeroelastizität und entsprechender Effekte mit ausreichender Genauigkeit zu erreichen, ist eine Untersuchung der Windströmung erforderlich. Im Windingenieurwesen wird die Untersuchung von Strömungsphänomenen üblicherweise mit physikalischen Maßstabsmodellen in Windkanalversuchen und seltener mittels Messungen am tatsächlichen Bauwerk vorgenommen. Als weitere Alternative kommen numerische Methoden zum Einsatz.
5. Für die genannten Aeroelastizitätsphänomene gibt es semi-analytische Modelle, die das Problem einer Berechnung zuführen. Analytische Modelle haben jedoch einerseits nur einen begrenzten Validitätshorizont, andererseits lassen sich mit ihnen jeweils nur bestimmte der oben genannten Interaktionsphänomene modellieren.

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

6. Bei linienförmigen Bauwerken wie Türmen und Masten, Hochhäusern oder Brücken treten die durch die Anströmung hervorgerufenen Verformungen im Wesentlichen quer zur Längsachse auf. Dies ist einerseits durch die entsprechend geringe Steifigkeit in Querrichtung und andererseits durch die großen auf den Querschnitt wirkenden aerodynamischen Kräfte bedingt. Zur Untersuchung des Verhaltens solcher Bauwerke werden entweder experimentelle Verfahren oder analytische bzw. numerische Methoden genutzt. Experimente im Windkanal können an Querschnittsmodellen oder an einem Gesamtmodell des Bauwerkes durchgeführt werden.
7. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung einer numerischen Methodik zur Simulation des Antwortverhaltens komplexer linienartiger Strukturen unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Strukturgeometrie. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Modellierung und Simulation der ankommenden Böen in einem pseudo-3D-gekoppelten Multi-Slice-Ansatz.

Stand der Wissenschaft

8. Als Ergänzung oder Alternative zu Windkanalversuchen haben sich numerische Simulationsmethoden der Fluidmechanik Computational Fluid Dynamics (CFD) etabliert. Eine vollständige dreidimensionale numerische Modellierung des Bauwerkes und seiner Umströmung ist auf Grund der physikalischen Komplexität und des damit verbundenen hohen Rechenaufwandes nicht zielführend.
9. Für Anwendungen im Windingenieurwesen werden die robusten numerischen Vortex-Partikel-Methoden genutzt, um die Windströmung auf komplexe Strukturen wie z.B. scharfkantige Strukturgeometrien zu simulieren. Insbesondere zweidimensionale netzfreie Vortex-Partikel-Methoden (VPM) haben sich für die Simulation der stark instationären und wirbelbehafteten Strömungen als Alternative etabliert, während bei klassischen netzbasierten numerischen Berechnungsmethoden eine realitätsnahe Abbildung von Ablösungsbereichen der Strömung selbst bei Anwendung aktueller Turbulenzmodelle nur schwer gelingt. Die zweidimensionalen Vortex-Partikel-Methoden können insofern als validiert angesehen werden, als für die ingenieurmäßigen Fragestellungen eine Abbildung der wesentlichen strömungsmechanischen Charakteristika gelingt.
10. Die in der vorliegenden Arbeit eingesetzte VPM-Software wurde zunächst im Jahre 2002 zur Simulation der elastischen Reaktion von bluff-linienartigen Strukturen in 2D entwickelt und 2014 ohne Einbezug der Modellierung ankommender Böen zum Multi-Slice-Ansatz erweitert. Darauf aufbauend wurde in der vorliegenden Arbeit eine pseudo-3D Turbulenzmodellierung entwickelt. Zudem wurde im Jahre 2007 eine Methode zur Modellierung von Böen in VPM im zweidimensionalen Bereich publiziert. Diese Methode bezieht noch nicht die räumliche Windkohärenz entlang der Strukturachse ein. Auf dieser Grundlage wurde in dieser Studie ein effizienteres Verfahren entwickelt und implementiert, das die 3D-Eigenschaften des Windes berücksichtigt. Die Methode wurde mit der pseudo-3D VPM-Software gekoppelt.
11. In der ingenieurtechnischen Umsetzung werden allerdings bis heute keine gekoppelten Berechnungen und darauf basierenden Tragwerksoptimierungen vorgenommen, sondern Variantenstudien durchgeführt. Die Varianten werden typischerweise für die statische Bemessung benutzt und dann modifiziert, wenn bei einer nachgelagerten Untersuchung der Winderregung die Nachweiskriterien nicht eingehalten werden können. Dies erschwert den Planungsprozess. Eine vollständige gekoppelte Simulation der aeroelastischen Phänomene und der Tragwerksantworten ermöglicht eine weitgehende Optimierung der Bauwerke.

Forschungsmethodik

12. In der vorliegenden Arbeit wurde eine numerische Methode entwickelt und implementiert, um die aerodynamische Anregung von linienartigen Strukturen zu berechnen. Diese berücksichtigt die Turbulenzeigenschaften des Windes in der atmosphärischen Grenzschicht. Das dreidimensionale Lösungsgebiet wird dabei durch eine Pseudo-3D-Formulierung modelliert. Der vorgeschlagene Ansatz stellt eine rechentechnisch effiziente und dennoch genaue Methode dar, mit der sich zahlreiche Probleme des Windingenieurwesens im Zusammenhang mit dem Verhalten von linienartigen Strukturen komplexer Geometrien, die natürlichen Windbedingungen ausgesetzt sind, untersuchen lassen.
13. In der Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem am stromaufwärtigen Ende in das Lösungsgebiet zusätzliche Partikel eingefügt werden, die an einem Streifen weiter stromabwärts den einzuprägenden Zeitverlauf des Geschwindigkeitsfeldes beeinflussen. Die Methode betrachtet durch zusätzliche diskrete Wirbel induzierte Geschwindigkeitsfeldschwingungen und errechnet damit für jeden Zeitschritt die neu einzufügenden Partikel. Die Eigenschaften von turbulentem Wind werden unter

Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften und der räumlichen Kohärenz durch die pseudo-zufälligen Geschwindigkeitszeitverläufe modelliert, die die Zuflussbedingungen zu den CFD-Schichten bilden. Die Methode wurde im Vergleich zu analytischen Modellen für Windströmungen mit freien Grenzflächen sowie mit Randbedingungen validiert.

Wesentliche Ergebnisse und Schlussfolgerungen

14. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode wurde mittels analytischer Modelle validiert. Zudem wurden Sensitivitätsanalysen zu verschiedenen Parametern durchgeführt. Diese Methode wurde zur Untersuchung verschiedener Probleme des praktischen Windingenieurwesens angewandt, z.B. auf die Anregung der Stonecutters Bridge und der Mersey Gateway Bridge durch Böen. Die Ergebnisse sind als Vergleich der Berechnungen und der Windkanalmessungen dargestellt. Darüber hinaus wurden die Windströmungen auf Gebäude mit komplexem Querschnitt wie dem Burj Khalifa und den Petronas Twin Towers simuliert.
15. Eine Software-Plattform wurde entwickelt und implementiert, um das komplexe dreidimensionale strukturelle CAD-Modell effizient mit der atmosphärischen Turbulenzmodellierung und der mehrlagigen CFD-Simulation der Aerodynamik der Struktur zu verknüpfen. Verschiedene Komponenten der Softwareplattform wurden anhand von Testfällen validiert und bewertet. Die vorgeschlagene Pseudo-3D-Simulationsmethode berücksichtigt die spezifischen Komponenten wie Windeigenschaften, Querschnitts-Aerodynamik und strukturdynamisches Verhalten in vollständig gekoppelten Zeitverlaufssimulationen.
16. Die entwickelte Simulationsplattform ermöglicht eine robuste Vorverarbeitung von Geometrien vom einfachen 3D-CAD-Format bis zur erforderlichen Diskretisierung für die Multi-Slice-Simulation nach der VPM-Methode. Die modellierte Einströmungsturbulenz im VPM ermöglicht die Simulation der atmosphärischen Turbulenzwechselwirkung mit Störkörpern. Der CFD-Solver hat aufgrund der GPU-Beschleunigung eine hohe parallele Performance und ermöglicht somit die Verwendung vieler Simulationsschichten, sodass eine realitätsnahe Modellierung auch komplexer Strukturen möglich ist. Die Implementierung des Workflows ist benutzerfreundlich, flexibel und praktisch für reale technische Probleme.
17. Das entwickelte Verfahren ermöglicht eine realitätsnahe aerodynamische Analyse von dreidimensionalen linienartigen Strukturen, die dem natürlichen Wind ausgesetzt sind, d.h. alle Hauptkomponenten der Windkette werden abgedeckt. Herkömmliche numerische Modelle, die vordefinierte Schnittkraftkoeffizienten enthalten, können die Windadmittanz nicht abbilden. Darüber hinaus wurden vollständig gekoppelte CFD-Simulationen aufgrund der hohen Rechenanforderungen bisher nicht an einem dreidimensionalen Brückenmodell durchgeführt.

Ausblick für zukünftige Forschungsarbeit

18. Das entwickelte Verfahren für Turbulenzmodellierung in VPM, sowie der Multi-Slice-Vorverarbeitungsalgorithmus können über linienartige Strukturen hinaus erweitert werden, z. B. zur Analyse von flexiblen Membrandächern. Diese Erweiterung ermöglicht die Nutzung der Vorteile der netzlosen VPM-Methode für einen breiten Anwendungsbereich, der durch herkömmliche CFD-Verfahren auf Netzbasis nicht erschlossen werden kann.
19. Das Verfahren kann mit einer Formoptimierung der Struktur gekoppelt werden. Dies ermöglicht eine Formoptimierung unter natürlichen Windbedingungen, z.B. unter Berücksichtigung von Turbulenzwind, da der Slicing-Vorverarbeitungsalgorithmus vollständig automatisiert und mit dem Turbulenzmodell gekoppelt ist.