

Zusammenfassung der Promotionschrift

# **Synergistic Framework for Analysis and Model Assessment in Bridge Aerodynamics and Aeroelasticity**

verfasst von

**Igor Kavrakov**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

Status des Doktoranden: Intern

Mentor: Prof. Dr. Guido Morgenthal

Weimar, Juni 2019

## Einleitung und Problemstellung

1. Weitgespannte Brücken stellen bemerkenswerteste Bauwerke dar. Aufgrund ihrer Größe, Schlankheit, besonderen Architektur und ihrer gesellschaftlichen Bedeutung ist die Auslegung solcher Bauwerke eine herausfordernde Ingenieuraufgabe. Abgesehen vom technischen Aspekt stellen Brücken Lebensadern für die Gesellschaft dar. Daher ist die Sicherheit solcher Bauwerke von größter Bedeutung
2. Windbedingte Schwingungen sind häufig ein maßgebliches Kriterium bei der Auslegung von weitgespannten Brücken. Daher ist die genaue Ermittlung der aerodynamischen Kräfte grundlegend für eine sichere und zugleich wirtschaftliche Auslegung. Die Modellierung der aerodynamischen Kräfte kann entweder durch Semi-Analytische-Modelle (S-A) oder Computational Fluid Dynamics Modelle (CFD) vorgenommen werden. Bei den S-A-Modellen werden die aerodynamischen Kräfte direkt unter Verwendung mathematischer Zusammenhänge (z.B. Gleichungen) und experimenteller oder CFD-basierter aerodynamischer Koeffizienten, die die Fluid-Struktur-Wechselwirkungen berücksichtigen, modelliert. Im Gegensatz dazu erfolgt bei CFD-Modellen eine Diskretisierung des strömungsmechanischen Feldproblems. Beide sich ergebenden mathematische Modelle weisen Vor- und Nachteile auf.
3. Traditionell werden die S-A-Modelle verwendet, um das Tragverhalten der Brücken und folglich die Schnittkräfte für die Bemessung zu berechnen. Im Laufe der Jahre wurde eine Vielzahl von S-A-Modellen entwickelt. Die größten Unterschiede bei diesen Modellen ergeben sich aus den zugrunde liegenden Annahmen. Die große Anzahl der S-A-Modelle wirft die Frage nach ihrer Qualität und dem Einfluss der zu Grunde liegenden Annahmen auf die errechneten Tragwerksbeanspruchungen auf.
4. Ergänzend zu den S-A-Modellen hat die Anwendung der CFD-Technik in der Brückenaerodynamik in den letzten beiden Jahrzehnten zugenommen. Sie erlaubt umfassende Einblicke in die Physik der Fluid-Struktur-Wechselwirkung. Üblicherweise werden die CFD-Modelle für die Bestimmung der aerodynamischen Koeffizienten, die als Eingabeparameter für die S-A-Modelle dienen, verwendet. Es gibt jedoch noch ungeklärte Fragen bezüglich der aerodynamischen Koeffizienten, die mit den ankommenden (frei strömenden) Windschwankungen zusammenhängen, da es an Methoden für die Simulation deterministischer Turbulenzen in der freien Strömung mangelt.
5. Der hohe Rechenaufwand führt jedoch dazu, dass die CFD-Modelle für die dreidimensionale, vollständig gekoppelte aeroelastische Analyse nicht ohne weiteres verfügbar sind. In diesem Zusammenhang ist die pseudo-dreidimensionale (Pseudo-3D) Vortex-Partikel-Methode (VPM) aufgrund ihrer angemessenen Genauigkeit bei moderatem Rechenaufwand Erfolg versprechend. Bei dieser Methode wird das dreidimensionale Strukturverhalten berücksichtigt, indem zweidimensionale (2D) CFD-Streifen entlang einer 3D-Linienstruktur positioniert werden. In Bezug auf die Turbulenzen in der freien Strömung besteht jedoch weiterer Verbesserungsbedarf.

## Zielsetzung der Arbeit

6. Hauptziel dieser Arbeit ist es, eine vergleichende Methodik für die Bewertung von aerodynamischen Modellen im Zeitbereich zu erarbeiten. Diese Methode soll den Vergleich zwischen S-A- und CFD-Modellen auf qualitativer und quantitativer Ebene beinhalten. Der qualitative Teil soll einen direkten Vergleich der aerodynamischen Modelle nur auf der Grundlage ihrer mathematischen Zusammenhänge und physikalischen Annahmen ermöglichen. Im quantitativen Teil sind spezifische Vergleichsmetriken festzulegen, um den Einfluss aerodynamischer Modellannahmen auf bestimmte Systemantwortgrößen (SAG), wie z. B. aerodynamische Reaktionen oder Kräfte, zu quantifizieren. Auf diese Weise kann ein angemessener Vergleich zwischen der CFD und den S-A-Modellen erfolgen.
7. In weiteres Ziel besteht darin, die Pseudo-3D VPM so zu erweitern, dass sie sowohl isotrope als auch anisotrope Turbulenzen im freien Strom berücksichtigt, wobei die Korrelation der Geschwindigkeit zwischen den CFD-Streifen in Brückenlängsrichtung erhalten bleibt. Diese spezielle Turbulente-Pseudo-3D VPM soll in der Lage sein, die Spektren von horizontalen und vertikalen fluktuierenden Windkomponenten zu bestimmen.
8. Das dritte Ziel ist die Entwicklung einer CFD-Methode auf Grundlage der 2D-VPM für die Bestimmung der aerodynamischen Admittanz. Die Admittanz gehört zu den aerodynamischen Koeffizienten und stellt eine komplexe Übertragungsfunktion zwischen den Turbulenzen im freien Strom und den aerodynamischen Kräften dar, wobei es notwendig ist, sowohl den Imaginärteil als auch den Realteil zu bestimmen. Um eine komplexe Übertragungsfunktion abbilden zu können, sollte die CFD-Methode deterministische sinusförmige Böen in der freien Strömung nachbilden können.
9. Schließlich soll in der Arbeit allgemein gezeigt werden, dass die neuartigen Methoden und die vergleichende Vorgehensweise einen kohärenten und synergistischen Rahmen für aeroelastische Analysen von Brücken bilden.

## Stand der Wissenschaft

10. Verschiedene Vorgehensweisen für den Vergleich von Modellen wurden in der Literatur vorgestellt, die in Abhängigkeit vom Referenzmodell (analytisch, experimentell) als Verifikation oder Validierung bezeichnet werden. Die meisten dieser Methoden konzentrieren sich auf die stochastischen Eigenschaften der Eingangs- bzw. Ausgangsparameter im Zuge von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen. Um das Problem der Modellbewertung auf der Grundlage ihrer physikalischen Annahmen anzugehen, wurde ein Modellansatz, der auf der Kategorietheorie basiert, vorgeschlagen. Damit kann die Komplexität von Modellen auf einer abstrakteren und allgemeineren Ebene bewertet werden.
11. Die Literatur zu Metriken für den Vergleich von Zeitverläufen ist umfangreich. Die Gemeinsamkeit dieser Metriken besteht in der Quantifizierung eines bestimmten lokalen oder globalen Signalmerkmals. Daher beziehen sich die meisten Vergleichsmetriken auf den Anwendungsbereich.
12. Es gibt viele Studien, die aerodynamische S-A-Modelle vergleichen und darauf hinweisen, dass der Einfluss von Modellannahmen sehr deutlich sein kann. In mehreren dieser Studien werden jedoch Modelle verglichen, die aufgrund ihrer Annahmen möglicherweise nicht vergleichbar sind. Darüber hinaus nehmen die meisten von ihnen das quadratische Mittel als Vergleichsgrundlage, was bei nichtlinearen Modellen eventuell nicht ausreicht.
13. Die Anwendungen der Lagrange-VPM in der Brückenaerodynamik konzentrierten sich bislang hauptsächlich auf die laminare freie Strömung in 2D oder Pseudo-3D. Aktuell wurde eine Methode für die Erzeugung von Turbulenzen in der freien Strömung vorgeschlagen, die auf einem Geschwindigkeitsfeld basiert. Bei diesem Verfahren wird ein Geschwindigkeitsfeld auf einem stromaufwärts angeordneten Raster erzeugt und anschließend in frei strömende Partikel umgewandelt, die eine konzentrierte Zirkulation tragen. Diese Partikel werden dann in das CFD-Gebiet eingeströmt, wobei sie die zufälligen Turbulenzen in der freien Strömung simulieren. Diese Methode wurde für aeroelastische 2D-Analysen und die Bestimmung der aerodynamischen Admittanz unter zufälligen Böen verwendet.
14. Darüber hinaus wurde eine turbulente Pseudo-3D VPM vorgestellt, die eine partikelbasierte Turbulenzerzeugung verwendet. Der Grund für die Anwendung der partikelbasierten anstelle der geschwindigkeitsbasierten Turbulenzerzeugung bestand darin, den einströmenden Partikeln eine direkte Korrelation in Brückenlängsrichtung aufzuerlegen. Anders als bei der geschwindigkeitsbasierten Methode werden dabei Partikel direkt erzeugt, indem nur das Spektrum der vertikal schwankenden Komponente verwendet wird. Zudem gilt es nur für isotrope frei strömende Turbulenzen.

## Methodik

15. Die vorgestellte Vergleichsmethode wird in zwei Schritten erstellt. Der erste, qualitative Schritt beinhaltet die Erweiterung des kategorialen Modellierungsansatzes und seiner Anwendung auf den Bereich der Brückenaerodynamik. Zunächst wird der Ansatz dahingehend erweitert, dass Vergleichbarkeit und Vollständigkeit der Modelle berücksichtigt werden. Anschließend wird die Komplexität des CFD-Modells und von zwölf S-A-Modellen anhand ihrer mathematischen Zusammenhänge bewertet, um eine schematische Darstellung der Modellqualität zu erhalten.
16. Im zweiten, quantitativen Schritt der Vergleichsmethodik wird die Diskrepanz der SAG für zeitabhängige aerodynamische Modelle mithilfe von Vergleichsmetriken für Zeitverläufe quantifiziert. Es werden neun Metriken verwendet, die alle einheitlich aufgebaut sind. Sieben dieser Metriken wurden aus früheren Studien angepasst: Peak-, Root-Mean-Square-, Phasen-, Magnitude-, Wahrscheinlichkeitsdichte-, Wavelet- und normalisierte Wavelet-Metriken. Zusätzlich werden zwei neue Metriken eingeführt, um die Diskrepanz in den möglichen nicht-stationären und nicht-linearen Teilen der Signale durch Testen der Stationarität unter Verwendung von Ersatz- bzw. Wavelet-basierten B-Spektren zu quantifizieren.
17. Durch die Kombination der geschwindigkeitsbasierten Turbulenzerzeugung und des laminaren Pseudo-3D VPM wird eine neuartige turbulente Pseudo-3D Vortex-Methode etabliert. Anhand einer analytischen Ableitung wird gezeigt, dass die Korrelation der Geschwindigkeit in Brückenlängsrichtung innerhalb des CFD-Bereichs zwischen den Streifen erhalten bleibt.
18. Deterministische frei strömende, sinusförmige Böen werden simuliert, indem die Nachläufe rotierender Strömungsprofile im CFD-Bereich mit einströmenden Wirbelpartikeln modelliert werden. Die Positionierung eines Abschnitts stromabwärts ergibt sinusförmige Kräfte. Damit können erstmals mit der VPM alle sechs Komponenten der aerodynamischen Admittanz in ihrer komplexen Form bestimmt werden. Basierend auf einem vorhandenen analytischen Modell wird eine geschlossene analytische Beziehung abgeleitet. In diesem Zusammenhang kann die Stärke der einströmenden Partikel, die vor der CFD-Analyse bekannt sein muss, mit den Zielamplituden der Böen in Beziehung gesetzt werden.
19. Die entwickelten Methoden werden sowohl auf grundlegende Beispiele, für die eine analytische oder einfache Lösung

existiert, als auch auf Beispiele aus der Brückenaerodynamik angewendet, um die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen synergistischen Vorgehensweise zu verdeutlichen. Nach Möglichkeit werden die Ergebnisse auch mit Experimenten verglichen. Damit ist die Verifizierung und Validierung gewährleistet.

## Wesentliche Ergebnisse und Schlussfolgerungen

20. Die Vergleichsmetriken werden auf einfache generische Signale angewendet. Für diese Signale werden bestimmte Merkmale modifiziert, wie Amplitude, Phase, Frequenzmodulation oder das Hinzufügen einer nichtlinearen Komponente. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Vergleich der SAG für nichtlineare aerodynamische Modelle, die nur auf dem quadratischen Mittelwert basieren, nicht ausreichend ist. Daher ist ein multikriterieller Vergleich, wie er beispielsweise von den vorgestellten Vergleichsmetriken angeboten wird, erforderlich.
21. Durch die Verifizierung des Strömungsfeldes einer Mehrstreifen-CFD-Analyse ohne einen Körper in der Domäne wird gezeigt, dass die Korrelation der Geschwindigkeit in Brückenlängsrichtung für die vorgestellte Pseudo-3D VPM sowohl für isotrope als auch für anisotrope freie Strömungsturbulenzen erhalten bleibt. Die Ergebnisse stimmen gut mit den abgeleiteten analytischen Beziehungen für die entsprechende Korrelation überein. Obwohl die partielle Anisotropie der Strömung verloren geht, bleibt ein signifikanter Anteil erhalten. Dies und die Tatsache, dass das vorliegende Verfahren ein generiertes Geschwindigkeitsfeld verwendet, welches auf beiden fluktuierenden Komponenten basiert, macht das vorliegende Verfahren flexibler und intuitiver als die zuvor entwickelte Partikel-basierte Turbulente-Pseudo-3D-VPM.
22. Die sinusförmigen Böen in der freien Strömung werden für eine CFD-Simulation ohne einen Körper in der Domäne verifiziert. Basierend auf einem definierten Qualitätskriterium für den Frequenzgehalt zeigt das Resultat, dass es möglich ist, Sinusböen mit einer hohen Qualität zu simulieren. Diese Überprüfung ist zur Bestimmung der komplexen aerodynamischen Admittanz notwendig. Darüber hinaus wird die abgeleitete geschlossene analytische Beziehung, die die Stärke der einströmenden Partikel und die Böenamplitude in Beziehung setzt, verifiziert.
23. Es wurde eine vollständige aeroelastische und aerodynamische Analyse einer flachen Platte durchgeführt, für die eine analytische Lösung auf der Grundlage der Potentialtheorie existiert. Diese Fallstudie diente der (i) Verifizierung der vorgestellten CFD-Methode zur Bestimmung der komplexen aerodynamischen Admittanz unter Verwendung einer analytischen Lösung; (ii) Verifizierung der CFD aeroelastischen (Flutter-) Reaktion durch turbulenten Wind mit einer analytischen Lösung; (iii) Anwendung der vorgestellten Vergleichsmetriken auf die Brückenaerodynamik. Eine vergleichbar vollständige Analyse ist bislang in der Literatur nicht verfügbar. Für dieses Benchmark-Problem wurden positive Ergebnisse erzielt, die eine Verifizierung darstellen.
24. Die Vergleichsmethode wird für S-A-Modelle auf Schrägseilbrücken in der Bauphase angewendet. Damit wird der praktische Aspekt des kategorialen Modellierungsansatzes aufgezeigt und die Auswirkung der aerodynamischen Annahmen auf die Antwort bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass für solche steifen Brücken mit breiten Trägern die Auswirkungen der aerodynamischen Kopplung und der Nichtlinearität auf das Flatterverhalten und die aeroelastische Instabilität vernachlässigbar sind, während der Einfluss auf den Fluid-Memory-Effekt deutlich wird.
25. Alle vorgestellten Methoden werden auf synergistische Weise auf das Referenzbauwerk Große Belt Brücke für aerodynamische Probleme angewendet. Wo es möglich ist, werden aerodynamische Koeffizienten mit Hilfe von Experimenten validiert, wobei sich eine gute bis sehr gute Übereinstimmung ergibt. Die Auswirkungen der aerodynamischen Modellannahmen auf das Verhalten der Brücke werden erstmals anhand eines CFD-Modells als Referenz untersucht. Die Vergleichsmetriken zeigen, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten nichtlineare und instationäre Merkmale in der CFD-Antwort erkannt werden, die von den untersuchten S-A-Modellen nicht erfasst werden. Darüber hinaus wird die Buffeting-Antwort für die vorgestellte Turbulente-Pseudo-3D-VPM mit dem linearen S-A-Modell bei moderater Windgeschwindigkeit verglichen, wobei sich eine gute Übereinstimmung ergibt. Ähnliche Ergebnisse werden bei diesen Windgeschwindigkeiten für beide Modelle erwartet, was die praktische Relevanz der Pseudo-3D-VPM deutlich macht.
26. Die Methode zur Simulation der komplexen aerodynamischen Admittanz wird für das Brückendeck der Dritten Bosphorus-Brücke mit experimentellen Ergebnisse aus dem Grenzschichtwindkanal validiert. Sowohl Real- als auch Imaginärteile der CFD-Admittanz stimmen gut mit den experimentellen Daten überein. Dies zeigt die Anwendbarkeit für Probleme aus der täglichen Praxis.
27. Die erarbeitete synergistische Vorgehensweise ermöglicht die Bewertung der Auswirkungen von Modellannahmen. Somit kann eine technische Beurteilung der Sicherheitsspanne vorgenommen werden, indem ein komplexeres oder ein einfacheres Modell gewählt wird. Zukünftige Studien könnten probabilistische Fortschritte des vorgestellten Frameworks und die Validierung anhand von Messungen an realen Brücken beinhalten.