

Regen-Wind induzierte Schwingungen im natürlichen Wind

von

Oliver Steinh

geboren am 11. Januar 1980

in Gifhorn

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 22. Oktober 2014

Disputation am: 22. Mai 2015

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Udo Peil
Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Niemann

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau

Heft 3

Oliver Stein

**Regen-Wind induzierte Schwingungen
im natürlichen Wind**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4048-7

ISSN 2198-8722

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

meinen Eltern

Wir können den Wind nicht ändern,
aber die Segel anders setzen.

Aristoteles

Abstract

Rain-wind induced vibration in natural wind

The presented work investigates the influence of the natural turbulence on rain-wind induced vibration (RWIV) on slender structural members with circular cross sections. Therefore, full scale measurements on a section model are carried out. Based on the results and determined parameters a numerical model is calibrated. By this model, the influence of turbulent flow on RWIV is numerically investigated on an inclined cable.

The full-scale measurements are divided into quasi-steady and aeroelastic experiments on a section model with circular cross section. For both, a mobile test rig is designed, which allows for operating the test series under various conditions. Depending on its relative position to the wind angle, a running water rivulet changes the aerodynamic force on a circular cylinder which can cause RWIV. This force is measured during the quasi-steady tests on the rigid section model with an artificial rivulet. In order to identify aerodynamic force coefficients out of the measured data, an analyzing procedure is presented, which is adapted to the structure of the turbulent flow conditions. The turbulence smoothes the curve of the aerodynamic force coefficients subjected to the relative wind angle. Therefore, the gradient of the curve is smaller, what entails reduced excitation forces. The identified aerodynamic force coefficients enable the calculation of quasi-steady forces for the numerical time step simulation under turbulent flow condition.

Furthermore, the turbulence influences the formation and motion of the water rivulet on the surface of the circular cylinder. This effect is investigated with a dynamic section model. In these tests, the circular cylinder is supported by springs. To be independent from natural rain, a sprinkling system is established. Due to the changing wind conditions in the natural flow, critical wind situations in which the appearance of a rivulet on the upper side of the cylinder leads only to sporadic short-term vibrations. Stationary vibrations did not occur. One heavy vibration event in which the motion of the rivulet is observed by a camera is used to identify rivulet parameters for the subsequent numerical simulation.

The numerical simulation also demands for the knowledge of aerodynamic forces acting on the rivulet in order to calculate its position on the cylinders surface for each time step. These forces are determined as well in wind tunnel tests also on a rigid section model with an artificial rivulet. In contrast to former wind tunnel experiments, the forces on the rivulet are measured directly with high accuracy by decoupling the rivulet from the cylinder.

The numerical time step simulation to predict RWIV under turbulent flow conditions are based on a mechanical model which was predesigned in further research projects. The influence of the turbulence is considered by turbulent aerodynamic coefficients from the quasi

steady measurements in full scale, the generation of correlated wind fields and a reduction factor taking into account that the rivulet is less correlated over the length of the cylinder. In order to calibrate the rivulets motion, the recorded vibration event from the dynamic experiments is used. Finally, a three-dimensional model of a cable of the Dongting Lake Bridge is taken to investigate numerically the influence of turbulence on RWIV.

Kurzfassung

Regen-Wind induzierte Schwingungen im natürlichen Wind

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss der natürlichen Turbulenz auf das Phänomen der Regen-Wind induzierten Schwingungen (RWIS) an geneigten Zuggliedern. Zunächst werden dazu Naturmessungen an einem Sektionsmodell durchgeführt. Aus den Messdaten werden anschließend aerodynamische Kraftbeiwerte und Modellparameter für ein Berechnungsmodell identifiziert, mit dem die Anregung eines Seils durch RWIS unter turbulenter Anströmung simuliert werden kann. Die Auswirkung der natürlichen Turbulenz an einem Seil wird schließlich mittels numerischer Simulationen analysiert.

Die Naturmessungen gliedern sich im Wesentlichen in quasi-statische und dynamische Versuche an einem kreiszylindrischen Sektionsmodell, das den Abschnitt eines Seils darstellt. Eine für die Naturmessungen entworfene mobile Konstruktion erlaubt die Durchführung der Versuchsreihen unter unterschiedlichen Randbedingungen. Für die Seilanregung durch RWIS ist die Formation und Bewegung von Wasserrinnsalen auf der Seiloberfläche unter bestimmten Anströmbedingungen verantwortlich. Die Rinnsale verändern die aerodynamische Kraft auf das Seil in Abhängigkeit ihrer relativen Position zum Windangriffswinkel. Im Rahmen der quasi-statischen Versuche wird die aerodynamische Kraft auf einen starr gelagerten Kreiszyylinder mit Rinnsal in natürlicher Turbulenz gemessen. Eine längs auf dem Probekörper aufgeklebte Störlippe modelliert dabei das Wasserrinnsal. Die Identifikation der aerodynamischen Kraftbeiwerte aus den Messdaten erfolgt mit einem auf die natürliche Turbulenzstruktur angepassten Analyseverfahren. Im Vergleich mit den Beiwerten, die in glatter Windkanalströmung ermittelt wurden, ergibt sich eine turbulenzbedingte Glättung des Beiwerteverlaufs in Abhängigkeit der Rinnsalposition. Die dadurch entstehenden flacheren Gradienten führen zu kleineren Erregerkräften und dementsprechend zu geringeren Schwingungsamplituden. Bedingt durch die deutlich unterschiedliche Turbulenzstruktur ist die Glättung im natürlichen Wind jedoch nicht so stark ausgeprägt wie es vergangene Windkanalversuche in künstlich erzeugter Turbulenz zeigten.

Die dynamischen Versuche haben das Ziel, den Einfluss der natürlichen Turbulenz auf die Bewegung der Wasserrinnsale und die damit verbundene Schwingungsanregung zu analysieren. Die federnde Lagerung des Kreiszyinders ermöglicht Schwingungen quer zu seiner Längsachse. Um vom Auftreten natürlicher Regenereignisse unabhängig zu sein, wird das Sektionsmodell mit Brausen künstlich beregnet. Die Schwingungen des Sektionsmodells erfassen Beschleunigungssensoren, während drei Kameras die Bewegung der Wasserrinnsale auf der Oberfläche verfolgen. Aus den Versuchen geht hervor, dass starke Schwingungen meistens unter bestimmten Anströmbedingungen und in Verbindung mit einem Wasserrinnsal auf der Oberseite des Kreiszyinders auftreten. Diese kritischen Anströmbedingungen sind jedoch aufgrund der wechselnden Windbedingungen im natürlichen Wind nur von kurzer

Dauer. Die aufwendige messtechnische Aufnahme eines Schwingungsereignisses, bei dem auch die Bewegung eines Wasserrinnsals anhand von Kamerabildern genau nachvollzogen werden konnte, ermöglicht die Identifikation von Eingangsparametern für die Modellrechnungen.

Darüber hinaus werden Windkanalversuche durchgeführt, bei denen die Messung der aerodynamischen Kraft auf ein künstliches Wasserrinnsal im Vordergrund steht. Im Gegensatz zu früheren Versuchen erfolgt die Kraftmessung durch die Entkopplung des Rinnsals vom übrigen Seilkörper direkt. Die daraus abgeleiteten Kraftbeiwerte gestatten einerseits die Berechnung kritischer Anströmsituationen, die zu einer Anregung durch RWIS führen können. Andererseits gehen diese Beiwerte in die numerischen Zeitschrittsimulationen ein.

Mechanische Modelle, die in vorangegangenen Forschungsprojekten entwickelt wurden, bilden den Ausgangspunkt für die hier durchgeführten numerischen Berechnungen von RWIS unter turbulenter Anströmung. Die Turbulenz wird dabei durch die in den Naturversuchen ermittelten Kraftbeiwerte, durch künstlich generierte Windzeitschriebe und einem Abminderungsfaktor für verminderte Rinnsalkorrelation über die Seillängsachse berücksichtigt. Ein während der dynamischen Nassversuche aufgenommenes Schwingungsereignis dient der Kalibrierung von Eingangsparametern zur richtigen Erfassung der Rinnsalschwingungen. Anhand eines Seiles der Dongtingsee-Brücke wird schließlich die Auswirkung der Turbulenz von RWIS an einem dreidimensionalen Seil studiert.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig. Das Forschungsprojekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, der mir die Gelegenheit zur Promotion gab und durch seine lehrreichen und motivierenden Anregungen half, dieser Arbeit die richtige Richtung zu geben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Niemann danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats. Darüber hinaus möchte ich dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Krafczyk und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Thiele als Prüfer für das Interesse an meiner Arbeit außerordentlichen Dank sagen.

Meinen Kollegen möchte ich für das angenehme Arbeitsklima danken. Die stetigen Diskussionen innerhalb der Windgruppe ermöglichten mir meine Arbeitsergebnisse zu reflektieren und zu verbessern. Besonders dankbar bin ich Herrn Dr.-Ing. Mathias Clobes für seine Ideen und Anregungen, die in diese Arbeit eingeflossen sind. Herr Dr.-Ing. Tobias Wagner und Herr Thomas Höbbel M.sc. leisteten durch ihre Kritik einen großen Beitrag an der schriftlichen Ausgestaltung.

Herrn Dr.-Ing. Hodei Aizpurua Aldasoro danke ich für seine Freundschaft und Hilfsbereitschaft, die er mir während der Zeit am Institut und weit darüber hinaus entgegengebracht hat.

Meiner Frau Heidi Steiln bin ich für ihre Geduld dankbar. Sie gab mir den Rückhalt, den ich benötigte, um diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Meinen Eltern gilt meine unendliche Dankbarkeit für ihre liebevolle Unterstützung über all die Jahre. Sie sind immer für mich dagewesen. Ihnen widme ich diese Dissertation.

Wolfsburg im Dezember 2015

Oliver Steiln

Inhaltsverzeichnis

Abstract	VII
Kurzfassung	IX
Vorwort	XI
Inhaltsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XXI
Abkürzungen und Formelzeichen	XXII
Symbole lateinisch	XXIII
Symbole griechisch	XXV
1. Einleitung	27
1.1. Einführung in das Thema	27
1.2. Motivation und Vorgehensweise	29
2. Der natürliche Wind	33
2.1. Einleitung	33
2.2. Der turbulente Wind als stochastischer Prozess	34
2.3. Windprofile	35
2.4. Korrelationen	36
2.5. Integralmaße	37
2.6. Darstellungen im Frequenzbereich	38
2.7. Kohärenz	41
3. Umströmung kreiszylindrischer Bauteile	43
3.1. Die Umströmung des Kreiszyllinders	43
3.1.1. Der Kreiszyllinder in laminarer Anströmung	43
3.1.2. Der Kreiszyllinder in turbulenter Anströmung	46
3.1.3. Der Kreiszyllinder mit axialer Störleiste	47
3.2. Schwingungsphänomene an Seilen und kreisrunden Hängern	49
3.2.1. Böeninduzierte Schwingungen	49
3.2.2. Wirbelerregung	52
3.2.3. Galloping	54
4. Bisherige Kenntnisse über RWIS	57
4.1. Allgemeines	57
4.2. Beobachtungen und Messungen an Originalbauwerken	57
4.3. Anregungsmechanismus und Modellierung	60
4.4. Aerodynamische Kraftbeiwerte auf Kreiszyllinder mit Rinnsal	72

4.5. Erkenntnisse aus dynamischen Windkanalversuchen	75
4.5.1. Rinnsalgeometrie und -verhalten	75
4.5.2. Anströmrichtung und Neigungswinkel des Seiles	79
4.5.3. Kreiszyylinderdurchmesser	80
4.5.4. Schwingungsfrequenz	80
4.6. Maßnahmen zur Verhinderung von RWIS	81
4.6.1. Oberflächengestaltung	81
4.6.2. Störseile und Schwingungsdämpfer	82
4.7. Auswirkung der Turbulenz	83
5. Numerisches Modell	87
5.1. Mechanisches Modell	87
5.1.1. Ebenes Ersatzsystem	87
5.1.2. Aerodynamische Kräfte auf Seil und Rinnsale	89
5.1.3. Numerisches Lösungsverfahren	92
5.1.4. Berechnung kritischer Anströmsituationen	92
5.1.5. Steuerung des oberen Rinnsals	94
5.2. Voruntersuchungen zum Dämpfungskoeffizient	95
5.3. Validierung und Parameterstudie in laminarer Anströmung	97
5.3.1. Einfluss der Windgeschwindigkeit	98
5.3.2. Einfluss von Rinnsalmasse und Dämpfungskoeffizient	100
5.4. Erweiterung auf das dreidimensionale Seil	102
5.5. Berücksichtigung der Turbulenz	105
6. Aerodynamische Kraft auf ein künstliches Rinnsal	109
6.1. Einleitung	109
6.2. Versuchsaufbau	110
6.3. Windkanal	111
6.4. Messtechnik	112
6.5. Auswertung der Messdaten	113
6.6. Darstellung der Ergebnisse	114
6.7. Untersuchung statischer Rinnsallagen	116
7. Naturmessungen	117
7.1. Einleitung	117
7.2. Versuchskonstruktion und Standortbedingungen	118
7.2.1. Entwicklung der Versuchskonstruktion	118
7.2.2. Windbedingungen am Standort	121
7.3. Quasi-statische Versuche	122
7.3.1. Versuchsaufbau	122
7.3.2. Messdatenerfassung	124

7.3.3. Analyse der Winddaten	125
7.3.4. Berechnung der aerodynamischen Kräfte.....	127
7.3.5. Messungen am glatten Zylinder	128
7.3.6. Analyseverfahren zur Ermittlung der aerodynamischen Kräfte	130
7.3.7. Zusammenfassung des dargestellten Analyseverfahrens	134
7.3.8. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	135
7.4. Dynamische Nassversuche	138
7.4.1. Versuchsaufbau	138
7.4.2. Bestimmung der Rinnsalposition.....	141
7.4.3. Schwingungsverhalten des Probekörpers	142
7.4.4. Vergleich von Messungen im nassen und trockenen Zustand...	148
7.4.5. Auswertung eines Schwingungsereignisses	153
8. Kalibrierung des Modells und numerische Simulationen	155
8.1. Vorgehen	155
8.2. Kalibrierung des Modells anhand der dynamischen Naturversuche	156
8.2.1. Rinnsalmasse und viskoser Dämpfungskoeffizient	156
8.2.2. Abminderungsfaktor für verminderte Rinnsalkorrelation	157
8.3. Simulationen am Probekörper	159
8.4. Simulationen an einem dreidimensionalen Seil	160
8.4.1. Messungen und Strukturdaten des Seils	160
8.4.2. Simulationen unter laminarer Anströmung	161
8.4.3. Simulationen unter turbulenter Anströmung	163
9. Zusammenfassung	165
10. Ausblick	169
Literaturverzeichnis	171
Anhang: Bestimmungsformeln Zentrales Differenzenverfahren	183