

Beurteilung der Wirkungsweise von adaptiven Seildämpfern im Brückenbau durch Koppelung von numerischer Simulation und Experiment

In vielen weit gespannten Schrägseilbrücken werden Seildämpfer zur Verringerung von Seilschwingungen eingebaut. Bedämpft werden dabei in erster Linie unerwünschte Querschwingungen (Schwingungen außerhalb der Kabelebene) der Tragseile. Neben der vorgesehenen Reduzierung der Bewegungen in der Kabelebene der Wirkungsrichtung der Dämpfer zeigen Untersuchungen, dass auch die Bewegungen quer zu dieser Richtung von den Dämpfern beeinflusst werden. Mithilfe der hybriden Versuchstechnik sollen diese Phänomene im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München genauer untersucht werden.

1 Einführung

Mit dem Wunsch, im Brückenbau immer größere Spannweiten bei gleichzeitig schlanken, filigranen Tragwerken zu realisieren, steigt die Anforderung an die planenden Ingenieure, die auftretenden Belastungen bzw. Verformungen, die sich aus Schwingungen der Konstruktion ergeben, in der Planungsphase realistisch abzuschätzen und auf ein verträgliches Maß zu begrenzen. Der Bauform der Schrägseilbrücke kommt in diesem Zusammenhang eine große Bedeutung zu. Schrägseilbrücken sind aus technischer und wirtschaftlicher Sicht hervorragend geeignet, große Stützweiten zu überspannen. Diese Brücken bilden aber in der Regel nicht nur eine Verbindung zwischen zwei Orten, sondern häufig besteht darüber hinaus der Wunsch, durch ein möglichst schlankes, elegantes Design ein neues architektonisches Wahrzeichen zu schaffen ([1, 2]). Im Hinblick auf das dynamische Verhalten ist dabei insbesondere ein Augenmerk auf mögliche Antworten der Seile zu legen. So werden in vielen Fällen entsprechende Maßnahmen zur Reduktion von Seilschwingungen erforderlich. Derzeit kommen im Wesentlichen zwei verschiedene Dämpfungssysteme zur Schwingungsreduktion zum Einsatz:

- Elastomerlager (in der Regel im Verankerungsbereich),
- Hydraulische Dämpfer bzw. Reibungsdämpfer.

Die Elastomerlager im Bereich einer Seilverankerung (Bild 1) dienen in erster Linie der Reduzierung der Biegebeanspruchung im Verankerungsbereich, die sich aus dem Seildurchhang ergibt. Die Dämpfungswirkung dieser Lager ist aufgrund der Position in unmittelbarer Nähe der Seilverankerung und der Materialeigenschaften der Elastomere meist nur gering [3], sodass häufig zusätzliche Maßnahmen zur Erreichung der gewünschten Seildämpfung erforderlich sind.

Evaluation of the effects of adaptive cable dampers by use of hybrid testing methods

Various wide spanned cable-stayed bridges are protected against cable vibrations with vibration absorbers. The focus of the damping measures is to reduce lateral oscillations of the cables. Although reducing vibrations in the effective direction of the installed vibration absorber, it is approved by research that vibrations are influenced transverse to the vibration absorber's effective direction as well. Using hybrid testing methods these phenomena shall be discovered in detail within an actual research project at the Department of Concrete Structures of the Technische Universität München.

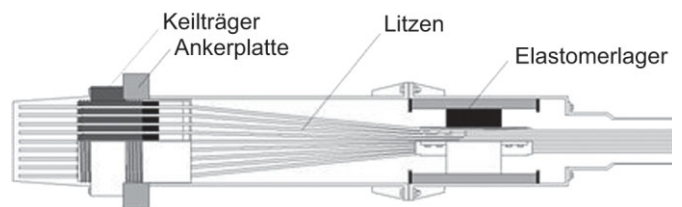


Bild 1 Schnitt durch die Verankerung eines Schrägseils [4]
Section through the anchorage of a stay cable [4]

Demgegenüber steht die Gruppe der hydraulischen Dämpfer bzw. der Reibungsdämpfer. Diese werden in der Regel senkrecht an das zu dämpfende Seil montiert (Bild 2) und sind aufgrund ihrer dissipativen Wirkung sehr gut geeignet, die Seilschwingungen zu reduzieren. (z. B. Fred Hartmann Bridge in Houston, Texas [5], Dongting Lake Bridge in China [6], Russki-Brücke in Wladiwostok (Bild 3 und [7])). Eine Weiterentwicklung der hydraulischen Dämpfer stellen die sog. aktiven (bzw. semi-aktiven) Dämpfer dar, die durch eine entsprechende elektronische Regelung aktiv ihre Kennlinie verändern und dadurch auch bei wechselnden Bedingungen stets die optimale Dämpfungswirkung sicherstellen.

Im Rahmen eines durch die Stiftung Maurer Söhne geförderten Forschungsvorhabens wird derzeit am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München (TUM) das Schwingungsverhalten der Tragseile und die Wirksamkeit von Dämpfungssystemen bei Schrägseilbrücken untersucht. Im Fokus der Forschung stehen die durch Windeinwirkung erzwungene Schwingung der Tragseile und die Auswirkungen von passiven bzw. aktiven Dämpferelementen in Bezug auf die Anströmrichtung des einwirkenden Windes. Diese aus Vertikal- (in Kabelebene) und Querschwingung (senkrecht zur Kabel-

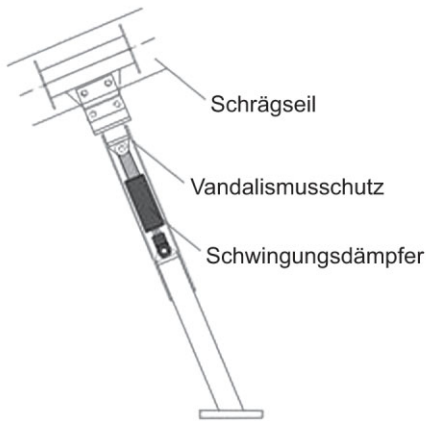


Bild 2 Exemplarische Einbausituation eines hydraulischen Dämpfers (schematisch) [8]
Exemplary mounting scheme of a hydraulic vibration absorber [8]



Bild 3 Russki-Brücke in Wladiwostok [14]
Russki-Bridge in Wladiwostok [14]

ebene) resultierende elliptische Schwingung des Schrägseils um die Seilachse wird nach [9, 10] als „Ballooning Effekt“ bezeichnet. Von besonderem Interesse ist der in Versuchen und Bauwerken beobachtete Effekt, dass ein Seildämpfer sowohl die auftretenden Vertikalschwingungen in Kabelebene (d. h. quer zur Anströmung; in Wirkungsrichtung des Dämpfers) als auch vorhandene böeninduzierte Schwingungen senkrecht zur Kabelebene (senkrecht zur Wirkungsrichtung des Dämpfers) reduziert [11, 12]. Infolge dieses Verhaltens kann unter Umständen auf einen zweiten Dämpfer quer zur Kabelebene verzichtet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen einer experimentellen Untersuchung im Windkanal der RWTH Aachen in Kooperation mit der Maurer Söhne GmbH [13] werden in dieser Forschungsarbeit die zuvor genannten Effekte mittels der „hybriden Versuchstechnik“ weitergehend untersucht.

2 Hybride Versuchstechnik

Der Begriff „Hybrid-Versuch“ bezeichnet eine spezielle Versuchstechnik, die realen Versuch und numerische Be-

rechnung simultan zur Untersuchung eines globalen Strukturverhaltens kombiniert. Der Versuch besteht demzufolge aus zwei Anteilen: einem experimentellen Versuch („Realteil“) und einem numerischen Modell („virtueller Teil“).

Der experimentelle Teil dieser Versuche beschränkt sich in aller Regel auf spezielle Bauteile, die sich im numerischen Modell nicht mit der erforderlichen Güte modellieren lassen (z. B. infolge hochgradiger materieller Nichtlinearität). Das numerische Modell beschreibt als Ergänzung zum Versuch eine evtl. vorhandene restliche (Trag)Struktur, die mit dem experimentell zu untersuchenden Bauteil interagiert. Darüber hinaus lassen sich im mathematischen Modell komplexe Belastungen oder Lastgeschichten simulieren, die in einem klassischen Versuch meist nur stark vereinfacht dargestellt werden können.

Die Verbindung der beiden Methoden – numerische Simulation und reales Experiment – innerhalb eines gemeinsamen Versuchs führt zu wesentlichen Vorteilen gegenüber der klassischen zweistufigen Vorgehensweise, bei der zunächst experimentelle Versuchsreihen durchgeführt werden, deren Ergebnisse anschließend in einem numerischen Modell Eingang finden (z. B. im Rahmen von weitergehenden Parameterstudien):

- Im Rahmen von Versuchen kann stets nur eine begrenzte Anzahl von Parameterkombinationen geprüft werden. Insbesondere bei vielen, meist voneinander unabhängigen Parametern ist es in der Regel nicht möglich, den gesamten Parameterraum experimentell zu erfassen. Häufig müssen stark vereinfachte Annahmen getroffen werden, um die Abhängigkeiten von Einflussparametern im Versuch abzubilden. Im „Hybrid-Versuch“ werden diese Abhängigkeiten im numerischen Modell automatisch miteingefasst.
- Die Geometrie, Belastungsart bzw. Lastgeschichte und Komplexität (Anzahl der zu untersuchenden Freiheitsgrade) des numerischen Simulationsmodells ist (nahezu) frei wählbar (im Allgemeinen nur durch die zur Verfügung stehende Rechenleistung begrenzt) – damit können auch sehr große Strukturen und deren Interaktion mit dem im realen Experiment vorhandenen Bauteil untersucht werden.
- Insbesondere bei dynamischen Versuchen können Teilstrukturen im Gesamtzusammenhang experimentell untersucht werden, ohne die Gesamtstruktur im Prüfaufbau vorhalten zu müssen. Die Durchführung solcher Versuche ist damit weit weniger stark an das Vorhandensein von spezieller Prüftechnik gebunden, die meist nur in sehr wenigen Laboren zur Verfügung stehen (z. B. großformatiger Rütteltisch).
- Abhängig von der Zielsetzung des Versuchs und den Komponenten kann die Größe des experimentellen Versuchsaufbaus ggf. deutlich verringert bzw. auf wenige Teilstrukturen reduziert werden (unter der Voraussetzung, dass die restliche Struktur sich mit der benötigten Genauigkeit numerisch abbilden lässt). Die

Reduktion der Versuchsgröße, als Folge der numerischen Abbildung der Gesamtstruktur, ermöglicht eine realitätsnahe Untersuchung von Teilstrukturen im Kontext der Gesamtstruktur auch bei sehr großen Strukturen. Einschränkungen bei Untersuchungen zum Strukturtragverhalten infolge der geometrischen Randbedingungen (Größe und/oder Belastung), die durch das zur Verfügung stehende Labor definiert werden, sind bei hybriden Versuchen nicht maßgebend.

- Im Vergleich zu reinen numerischen Untersuchungen ist für das Bauteil im Experiment sichergestellt, dass die Reaktionskräfte ohne Diskretisierungs- bzw. Modellfehler, die sich aus einem Materialmodell, der Ansatzfunktion, der Netzdiskretisierung oder sonstigen mathematischen Vereinfachungen ergeben, erfasst werden. Materielle Besonderheiten, wie Schädigungs- oder stark nichtlineares Verhalten (z. B. bei Bruchmechanismen), werden wirklichkeitsgetreu abgebildet und sind eindeutig nachvollziehbar.

Diese Versuchstechnik wurde in den vergangenen Jahren vorwiegend zur Charakterisierung des Trag- bzw. Verformungsverhaltens von Strukturen unter Erdbebenbeanspruchung eingesetzt [15]. Die „Erdbeben-Simulation“ erfolgte dabei meist stark verlangsamt im Gegensatz zu vollständig dynamischen Versuchen. Daher hat sich in diesem Zusammenhang der Begriff der „Pseudodynamik“ etabliert. Die Verlangsamung der Prüfgeschwindigkeit auf eine nahezu statische Lastaufbringung war in der Vergangenheit vor allem der nur im begrenzten Umfang vorhandenen Rechenleistung geschuldet. Aufgrund der gesteigerten Leistungsfähigkeit moderner Rechenzentren verschieben sich die Grenzen zunehmend in Richtung „Realtime“-Untersuchungen. Alternativ kann die zusätzliche Kapazität auch dazu genutzt werden, die Komplexität der numerischen Modelle zu steigern – je nach Anwendung muss im Einzelfall abgewogen werden, welche Zielsetzung maßgebend ist. „Echtzeit-Versuche“ (Prüfgeschwindigkeit = reale Belastungsgeschwindigkeit) sind aber erst durch die Verbesserungen in der Prüftechnik und die Weiterentwicklung der numerischen Integrationsverfahren möglich. Diese Entwicklungen ermöglichen nun auch hybride Untersuchungen an Strukturen, deren Verhalten maßgeblich von der Belastungsgeschwindigkeit geprägt wird.

Am Lehrstuhl für Massivbau und dem angegliederten Laboratorium für den Konstruktiven Ingenieurbau der TUM wurden hybride Versuche bzw. pseudodynamische Versuche bisher im Rahmen von mehreren Forschungsprojekten zur Untersuchung von Mauerwerk unter Erdbeneinwirkung eingesetzt (z. B. [16-19]). Die numerischen Berechnungen erfolgten mittels des kommerziellen Hochleistungs-Finite-Element-Programms MARC/MENTAT [20]. Dieser universelle nichtlineare „Multiphysics-FE-Solver“ erlaubt die Berechnung nahezu beliebig komplexer Problemstellungen. In Kombination mit der hybriden Versuchsmethodik ergibt sich hieraus ein weites Einsatzgebiet.

3 Untersuchungen zum Verhalten von Schrägseilbrücken bei Windanregung

Im Rahmen des Planungsprozesses von großen Brückenbauwerken wird im Vorfeld meist eine Reihe von experimentellen und numerischen Untersuchungen durchgeführt. Insbesondere bei weit gespannten Schrägseilbrücken wird in der Regel ein Windkanalmodell erstellt, um die Strömungseigenschaften des Bauwerks zu erfassen. Aufgrund der Einschränkungen bei den geometrischen Abmessungen als auch der beschränkten Leistungsfähigkeit von bestehenden Windkanälen erfolgen diese Untersuchungen in der Regel am maßstäblich verkleinerten Modell. Der Maßstabsfaktor muss dabei so gewählt werden, dass zum einen das gesamte Bauwerk untersucht werden kann und zum anderen sollen sich die Strömungsverhältnisse entlang des Prüfkörpers möglichst frei von unerwünschten Störeinflüssen einstellen. Die tatsächlichen Strömungsfelder sind allerdings trotz aller Maßnahmen bereichsweise durch unerwünschte Wirbelbildung gestört. Die Auswirkungen dieser Störzonen auf das Gesamtverhalten sind meist nur schwer quantifizierbar. Ein weiterer Problempunkt sind die vorhandenen Strömungsverhältnisse im Windkanal im Vergleich zu den theoretischen Annahmen. Bedingt durch die Bauart des Windkanals und die Winderzeugung sind Störungen in der Strömung möglich, welche die Versuchsergebnisse erheblich beeinflussen können. Die Summe dieser Faktoren erschwert eine nachfolgende numerische Betrachtung von Windkanalversuchen beträchtlich.

Die Fokussierung auf eine realitätsnahe Abbildung der Strömung des Maßstabsmodells führt zu einem weiteren Kritikpunkt an Windkanalversuchen: Durch die maßstäbliche Verkleinerung gelingt eine wirklichkeitsnahe Abbildung sämtlicher mechanischer Eigenschaften der Tragstruktur im Versuch nur unzureichend. So lassen sich vor allem kapazitive bzw. dissipative Eigenschaften von Strukturelementen meist nicht maßstäblich verkleinern. Die dynamische Antwort des Systems als Folge der Windanregung wird damit nur ungenau im Versuch abgebildet. Für eine Dimensionierung von zusätzlichen Dämpferelementen bei einer Schrägseilbrücke ist aber die Kenntnis der gesamten Strukturantwort eine entscheidende Voraussetzung. Allerdings stellen derzeit Windkanalversuche bei der aerodynamischen Beurteilung von Brücken noch immer den Stand der Technik dar.

Es wäre daher naheliegend, die Windkanalversuche durch eine rein numerische Simulation zu ersetzen. In der Simulation können beliebige dreidimensionale Windströmungen betrachtet werden – Randeinflüsse auf das Strömungsmodell infolge unerwünschter Wirbel oder Einflüsse aus dem Prüfaufbau sind nicht vorhanden – und die Strömungsparameter können je nach gewünschter Strömung frei variieren. Damit können Simulationen mit beliebig unterschiedlichen Strömungsformen und -variationen virtuell durchgeführt werden. Zusätzlich bietet die numerische Simulation der Windströmung anstelle eines Windkanalversuchs natürlich auch organisatorische und

finanzielle Vorteile, da die numerische Simulation gerade bei vielen Versuchen bzw. vielen verschiedenen zu untersuchenden Aspekten nicht an die Randbedingungen des Windkanals gebunden ist.

Allerdings ist eine rein virtuelle Simulation von Strömungsvorgängen an weit gespannten Konstruktionen mit den derzeit zur Verfügung stehenden Verfahren bzw. der Rechenkapazität mit der benötigten Detaillierung und Genauigkeit für eine praktische Anwendung nicht durchführbar bzw. zu zeitintensiv. Darüber hinaus ergeben sich in den Ergebnissen von Fluidodynamischen Berechnungen zum Teil sehr starke Abweichungen zu durchgeführten „Real-Versuchen“ im Windkanal, deren exakte Ursachen trotz umfangreicher Forschung bisher nicht vollständig geklärt sind. Die numerische Simulation kann daher nur unterstützend zur Betrachtung von Detailproblemstellungen eingesetzt werden.

Die Anwendung der hybriden Versuchstechnik zur weiterführenden Untersuchung der Wirkungsweise von Dämpferelementen stellt durch die Verbindung von numerischen und experimentellen Methoden eine optimale Ergänzung zu den bisherigen klassischen Untersuchungsmethoden dar. Durch die Koppelung der Ergebnisse aus Windkanalversuch und numerischer Studie als Eingangsgrößen eines hybriden Versuchs kann das Verhalten von kapazitiven bzw. dissipativen Strukturelementen (z. B. Seildämpfer) im Versuch erfasst und optimiert werden.

4 Abbildung von winderregten Seilschwingungen in einem hybriden Versuch

Zur Optimierung des Verhaltens von Dämpfern zur Beeinflussung von räumlichen Seilschwingungen liegt eine Vielzahl von theoretischen und experimentellen Untersuchungen vor (u. a. [3–6, 21–24] etc.). Die experimentelle Untersuchung von Dämpfern ist jedoch infolge der Verwendung von Standardversuchstechnik in der Regel auf das Prüfen vordefinierter Last- bzw. Verformungsabläufe eingeschränkt. Eine Untersuchung im Zusammenhang mit der verformungserzeugenden Tragstruktur im Windkanal ist aufgrund der geometrischen Abmessungen nicht möglich. Die Versuchsergebnisse beschränken sich demzufolge ausschließlich auf die Erfassung des Verhaltens des Dämpfers im Rahmen dieser definierten Zeitreihen. Die Beurteilung der Wirksamkeit des Dämpfers im Hinblick auf die Brückenstruktur muss dann in einem nachgeordneten Schritt erfolgen. Bei stark nichtlinearem Verhalten oder bei adaptiver Anpassung der Kennlinie des Dämpfers ist diese Vorgehensweise geprägt von einer iterativen Näherungslösung. Der Einsatz der hybriden Technik ermöglicht hier realitätsnähere Ergebnisse als ein konventioneller Versuch.

Am Lehrstuhl für Massivbau der TUM wird derzeit die Wirksamkeit semi-aktiver Dämpfer mittels hybrider Techniken theoretisch und experimentell analysiert. Innerhalb dieser Versuche soll eine möglichst reale Abbildung des

Schwingungsverhaltens eines durch semi-aktive Dämpfer gedämpften Schrägseils erfolgen. Die Untersuchungen werden in zwei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase wird eine an der RWTH Aachen durchgeführte Windkanaluntersuchung an einem stark vereinfachten Seilmodell mittels eines hybriden Versuchs nachgebildet, um die Ergebnisse der hybriden Versuchstechnik anhand eines real durchgeführten Windkanalversuchs zu evaluieren und gegebenenfalls zu kalibrieren. Im Fortgang der Versuche wird in Phase zwei das Verhalten von semi-aktiven Dämpfern gekoppelt mit einem numerischen Modell für die Brückenstruktur untersucht, mit dem Ziel, das Verhalten bzw. die Kennlinie des semi-aktiven Dämpfers zu optimieren.

In der aktuell laufenden ersten Phase (Vorversuche) wird der an der RWTH Aachen durchgeführte Windkanalversuch [13] mittels hybrider Versuchstechnik simuliert. Diese Versuchsserie diente dazu, das räumliche Schwingungsverhalten eines Seil-Dämpfer-Systems im Windkanal zu untersuchen. Hierzu wurde ein Abschnitt einer Kunststoffröhre (Länge im Versuch ca. 2,6 m, \varnothing 0,20 m, Wandstärke 5 mm) mit beidseitig in horizontaler und vertikaler Richtung federgelagerter (verschieblicher) Endaufhängung als Versuchsmodell für ein reales Schrägseil einer horizontalen Windströmung ausgesetzt.

Aufgrund der Randbedingungen durch den Versuchsaufbau wurde für diese Versuchsreihe ein rein viskoser Dämpfer verwendet (Bilder 4 bzw. 5). Im Versuchsprogramm integriert waren verschiedene Parameterstudien am Schrägseilmodell (ohne Dämpfer), um dessen Sensitivität auf verschiedene Eingangsgrößen zu erörtern. Unter anderem wurden die Auswirkungen der Strömungsgeschwindigkeit untersucht. Im Versuchsverlauf konnte im Bereich der kritischen Geschwindigkeit eine signifikante Erhöhung des Widerstandbeiwertes gemessen werden. Die Veränderung des Widerstandbeiwertes korreliert dabei mit einer Erhöhung der Schwingungsamplitude. Dieses Phänomen wurde ebenfalls durch numerische Simulationen von BLACKBURN [25] bestätigt. In diesen numerischen Untersuchungen zeigte sich, wie auch in den Versuchen [13] (Bild 6), eine starke Zunahme der

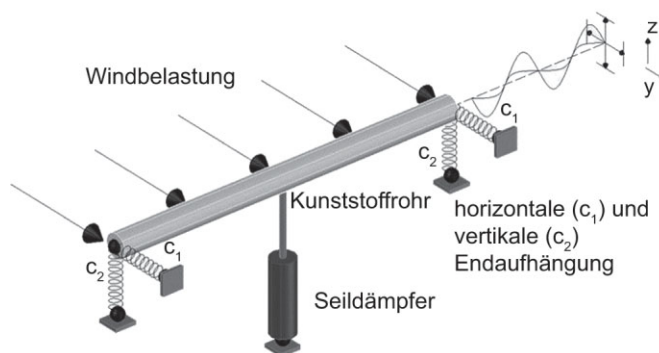


Bild 4 Windkanalversuche am Ersatzmodell eines Schrägseils an der RWTH Aachen, schematischer Versuchsaufbau [13]
Wind tunnel test at a substitute model of a stay cable at the RWTH Aachen, schematic test setup [13]

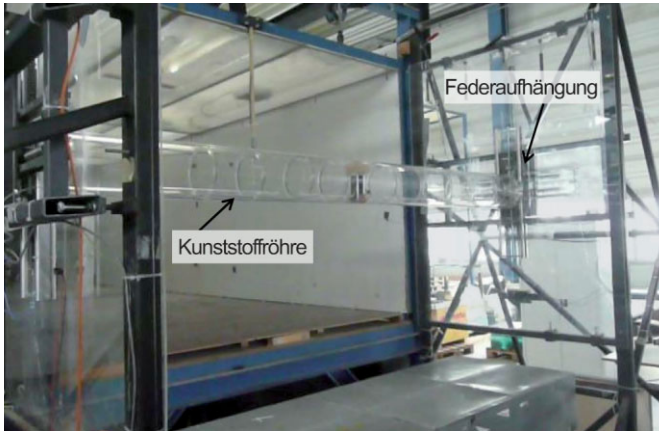


Bild 5 Windkanalversuche zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens eines Seil-Dämpfer-Systems [aus 13]
Wind tunnel test for research at vibrations on a stay cable-vibration absorber-system [from 13]

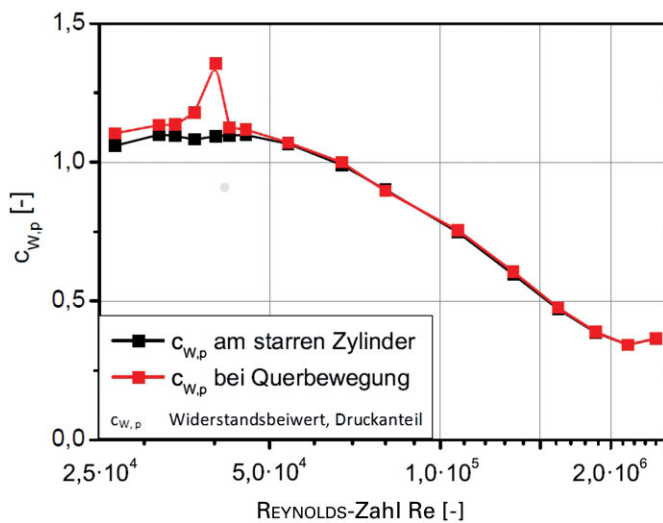


Bild 6 Ergebnisse der Windkanalversuche der RWTH Aachen [13], Auswirkung von Querbewegungen auf den Kraftbeiwert des Kreiszyllinders
Results of wind tunnel testing at the RWTH Aachen [13], effect of oscillation on the circular cylinder's drag coefficient

Schwingungsamplitude eines Kreiszyllinders im Bereich der Übereinstimmung von Eigenfrequenz des Kreiszyllinders und der Wirbelablösefrequenz („lock-in“ Phänomen). Die Ergebnisse aus dem Windkanalversuch zeigen damit eindeutig den eingangs beschriebenen Effekt, dass bereits durch die Anordnung eines Dämpfers auch die Bewegung quer zur Wirkungsrichtung des Dämpfers verringert werden kann [13].

Die hybriden Versuche werden am Laboratorium für den Konstruktiven Ingenieurbau der TUM in einer vertikalen servo-hydraulischen Zug-Druck-Prüfmaschine des Modells Instron 8500 für statische und dynamische Anwendungen durchgeführt (Bild 7). Als Dämpfer dient in der ersten Projektphase ein Strömungskörper, der in Fluiden mit unterschiedlicher Viskosität bewegt wird (Bild 8). Strömungskörper und Fluideigenschaften entsprechen dabei den verwendeten Materialien der Windkanalversuche an der RWTH Aachen.



Bild 7 Hybrider Versuchsaufbau: Servo-hydraulische Zug-Druck-Prüfmaschine mit viskosem Dämpfer und Recheneinheit für die numerische Simulation
Hybrid test setup: Servo-hydraulic tensile-compression-test rig with viscose vibration absorber and processing unit for numerical simulation

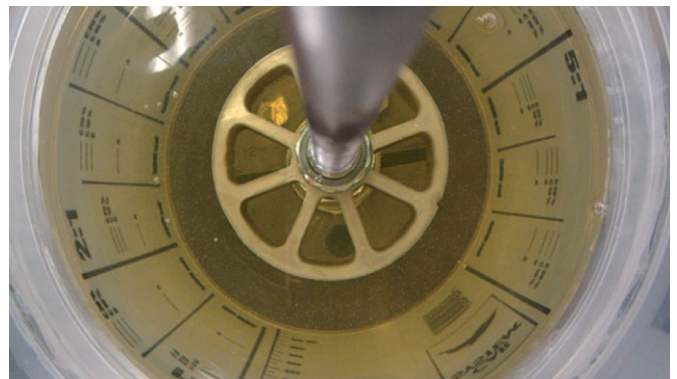


Bild 8 Viskoser Dämpfer: Strömungskörper im Fluid
Viscose vibration absorber: Flow-type body in fluid

Als System für die FE-Simulation wird ein dreidimensionales Stabwerksmodell gemäß Bild 4 verwendet, dessen Strukturparameter dem Versuchsaufbau im Windkanal entsprechen. Die räumliche Bewegung des numerischen Strukturmodells wird für die experimentelle Umsetzung in eine einachsige Bewegung parallel zur Wirkungsrichtung des Dämpfers transformiert (z-Richtung in Bild 4). Diese Transformation ist notwendig, da infolge des experimentellen Prüfaufbaus ausschließlich eindimensionale Bewegungen in Richtung der Dämpfer-Haupttrichtung möglich sind. Die berechneten Bewegungen (Verschiebungen und Geschwindigkeiten) der simulierten räumlichen Seilschwingung werden als Sollwert an die Prüfmaschine übergeben. Die gemessene Reaktionskraft im Dämpfer wird ausgelesen und dient der Berechnung der Bewegungen im nächsten Zeitschritt. Dieser Zyklus wiederholt sich kontinuierlich für die Dauer des Versuchs.

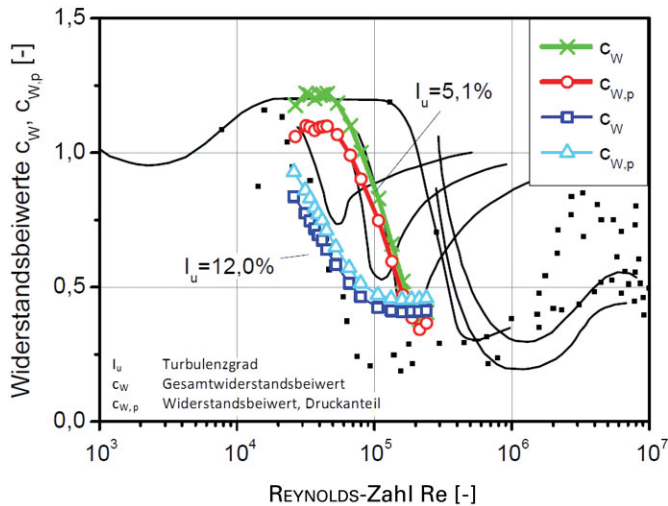
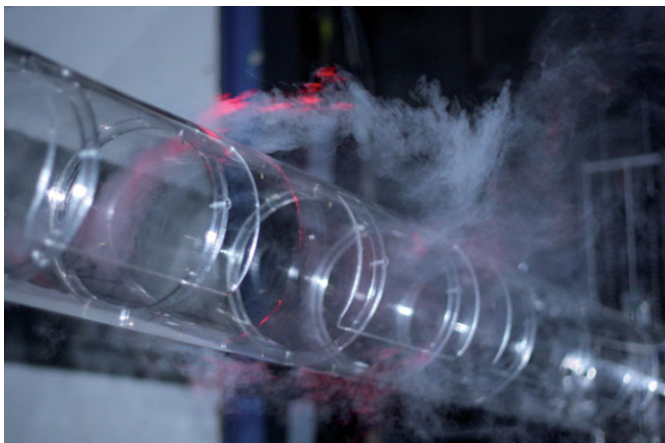


Bild 9 Widerstandsbeiwerte am Kreiszyylinder, Versuchsergebnisse (c_W , $c_{W,p}$) [13] und Literaturwerte (schwarze Linien) [28]
Wind coefficient at circular cylinder, test results (c_W , $c_{W,p}$) [13] and values of literature (black lines) [28]

Als Belastung innerhalb des FE-Modells werden numerisch generierte Windfelder auf Basis der Wellenüberlagerungsmethode nach SHINOZUKA [26, 27] verwendet, deren Spektrum, Turbulenz, Intensität und Kohärenzeigenschaften den im Windkanal gemessenen Werten entsprechen. Diese stochastischen Windfelder (= zeitabhängiges Vektorfeld der Windgeschwindigkeiten) werden anschließend unter Berücksichtigung der in Windkanalversuchen gemessenen aerodynamischen Druckbeiwerte für den umströmten Kreiszyylinder zu Knotenlastvektoren umgerechnet. In Bild 9 sind in der Literatur dokumentierte Widerstandsbeiwerte den in Windkanalversuchen gemessenen Werten (c_W , $c_{W,p}$) für unterschiedliche Turbulenzgrade gegenübergestellt. Darüber hinaus ist für eine realitätsnahe Abbildung der Schwingung im Modell auch die Bildung und das Ablöseverhalten von Wirbeln zu berücksichtigen. Durch das Auftreten von (wechselseitigen) Wirbelablösungen (Bild 10) wirken zusätzliche Kräfte auf das System, die zu wirbelerregten Querschwingungen führen.



Diese wirbelerregten Querschwingungen hängen von einer großen Anzahl von Parametern ab und sind häufig maßgebend für die Dimensionierung von Dämpfern für Brückenseile [24].

Neben den Ergebnissen aus den Windkanalversuchen wurde hier im Vorfeld zusätzlich eine numerische Strömungssimulation durchgeführt, um die vielfältigen Einflüsse im numerischen Modell genauer erfassen zu können. Aufgrund der Anforderung der „Echtzeitsimulation“, d.h. die Verformungsgeschwindigkeit des Dämpfers im Versuch muss den tatsächlich am realen Bauwerk auftretenden Deformationsgeschwindigkeiten entsprechen, kann die rechenintensive Strömungssimulation nicht innerhalb der Versuchsdurchführung berechnet werden und muss damit als Parameterstudie vorab erfolgen.

Für die Berechnung des Modells kommen aus der Pseudodynamik bekannte Verfahren zur schrittweisen Lösung der Schwingungsdifferentialgleichung Gl. (1) zur Anwendung:

$$M \cdot a + C \cdot v + K \cdot d = F \quad (1)$$

mit:

- M Massenmatrix
- C Dämpfungsmatrix
- K Steifigkeitsmatrix
- a Beschleunigung
- v Geschwindigkeit
- d Verschiebung
- F Einwirkung

Diese wird für eine schrittweise Lösung auf die Zeitschrittweite Δt diskretisiert. Für den Zeitpunkt $t = \Delta t(n+1)$ ergibt sich folgende Formel Gl. (2):

$$M \cdot a_{n+1} + C \cdot v_{n+1} + K \cdot d_{n+1} = F_{n+1} \quad (2)$$

Zur Berechnung dieses Gleichungssystems kann im Rahmen einer Echtzeitsimulation im Allgemeinen nur das ex-

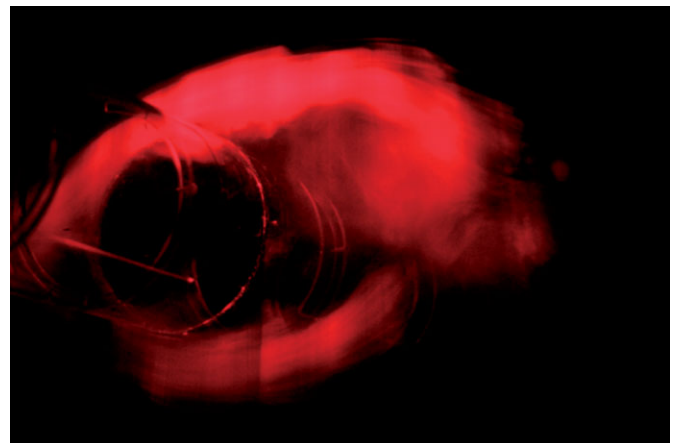


Bild 10 Untersuchungen zur Wirbelablösung, links Windkanalversuch [13], rechts numerische Strömungssimulation (CFD) [29]
Research on eddy shedding, left wind tunnel test [13], right numerical flow simulation (CDF) [29]

plizite NEWMARK-Integrationsverfahren ([30], Gl. (3)) angewendet werden, da implizite Verfahren durch zusätzliche Iterationen den zeitlichen Ablauf beeinträchtigen.

Unter Anwendung des expliziten Verfahrens ergeben sich dadurch die nachfolgenden Gleichungen für die Verschiebung d_{n+1} bzw. Geschwindigkeit v_{n+1} zum Zeitpunkt t_{n+1} :

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t \cdot v_n + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot a_n \quad (3)$$

$$v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot a_n \quad (4)$$

Dieses Vorgehen besitzt den Nachteil, dass sich Fehler im Zuge der Berechnung akkumulieren. Aus diesem Grund wird für die Versuche ein modifiziertes Prädiktor-Korrektor-Verfahren [14] angewendet, das den akkumulierten Fehler verringert. Trotz Einsatz dieser numerischen Strategien ist für Echtzeitversuche eine sehr kleine Zeitschrittweite Δt zu verwenden [31], damit die Fehlersummen nicht überproportional anwachsen. Die zur Verfügung stehende Rechenzeit für die schrittweise Lösung der Schwingungsdifferentialgleichung des Finite-Elemente-Modells ist daher für die einzelnen Rechenschritte äußerst gering. Eine Beschränkung des numerischen Modells auf wesentliche Elemente in Verbindung mit sinnvollen Vereinfachungen ist somit unbedingt erforderlich, um eine ausreichend schnelle Berechnung zu ermöglichen. Zur Evaluation der Rechengeschwindigkeit wurden vorab Testläufe durchgeführt, um neben der Abstraktion des Tragsystems auch rechnerinterne Schwachstellen der Hardware zu ermitteln und bestmöglich zu optimieren. Vor allem bei hohen Versuchsgeschwindigkeiten, wie sie z. B. bei Erdbeben oder Wind auftreten, spielen neben der reinen Rechenleistung die Reaktionsgeschwindigkeit des

Versuchskörpers bzw. der Versuchseinrichtung sowie die Genauigkeit der Messtechnik eine entscheidende Rolle hinsichtlich Stabilität der Numerik und der Güte der gemessenen Ergebnisse. Die Durchführung dieser sehr komplexen Versuche findet derzeit am Laboratorium für den Konstruktiven Ingenieurbau der TUM statt. Eine anschließende Veröffentlichung der Forschungsergebnisse wird nach erfolgreichem Abschluss der Versuchsreihen in einem separaten Beitrag angestrebt.

5 Fazit

Die hybride Versuchstechnik bietet vor allem für spezielle Anwendungen oder Sonderlastfälle ein kosten- und zeit-effizientes Werkzeug, um komplexe physikalische Phänomene mithilfe von numerischen Verfahren besser beurteilen zu können. Vor allem im Vergleich zu konventionellen Herangehensweisen (Durchführung stark idealisierter Versuche und nachgehende numerische Modellierung) ist mithilfe der hybriden Versuchstechnik eine deutliche Steigerung der Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse hinsichtlich ihrer Realitätsnähe möglich. Die Anwendung und Erweiterung dieses Verfahrens, das sich bisher überwiegend auf Untersuchungen im Zusammenhang mit Erdbebenphänomenen konzentriert hat, auf allgemeine dynamische Problemstellungen stellt eine vielversprechende Technologie dar. Die ersten durchgeführten Testversuche zur Untersuchung des Einflusses von Dämpfern auf winderregte Seilschwingungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit Windkanaluntersuchungen. Im Anschluss an die derzeit laufende erste Phase des Forschungsvorhabens zur Validierung des Verfahrens sollen im nächsten Schritt sogenannte semi-aktive Dämpfer untersucht und einer Kennlinienoptimierung unterzogen werden.

Literatur

- [1] EWERT, S.: *Brücken, Die Entwicklung der Spannweiten und Systeme*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003.
- [2] *Millau plays host to two important meetings*. Bridge design and engineering 36 (2004), HELENA RUSSELL (ed.), p. 27.
- [3] WEBER, F.; FELTRIN, G.: *Influence of the offset friction of rheological fluid dampers on the vibration mitigation performance*. Proceedings of Fifth International Symposium on Cable Dynamics, Santa Margherita Ligure (Italy), September 15–18 2003, pp. 427–435.
- [4] WEBER F.; DISTL H.; NÜTZEL O.: *Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke*. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 7, S. 582–589.
- [5] MAIN, J. A., JONES, N. P.: *Evaluation of Viscous Dampers for Stay Cable Vibration Mitigation*. Journal of Bridge Engineering, 6 (6) (2001), pp. 385–397.
- [6] KO, J. M.; ZHENG, G.; CHEN, Z. Q.; NI, Y. Q.: *Field vibration tests of bridge stay cables incorporated with magnetorheological (MR) dampers*. Proceedings of the International Conference on Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems of Bridges, Structures, and Highways, S.-C. LIU and DARRYL J. PINES (eds.), Proceedings of SPIE (publ.), 4696 (2002), pp. 30–40.
- [7] Maurer Söhne GmbH & Co. KG.: *Umfassender Bauwerkschutz durch Maurer Söhne – Längste Schrägseilbrücke der Welt*. Pressemitteilung, Zeitschrift Brückenbau, Verlagsgruppe Wiederspahn, Ausgabe 3-2011, S. 31.
- [8] Maurer Söhne GmbH & Co. KG: *Maurer Cable damper systems, Structural Protecting Systems SPS*. Informationsbroschüre, München, 2006.
- [9] MAGONETTE, G.; MARAZZI, F.; BOSSENS, F.; DUMOULIN, C.: *Active Control Experiment of a Large Scale Cable-Stayed Bridge Mock-Up*. IABSE Conference on Cable Stayed Bridges – Past, Present and Future, Malmö, Schweden, 1999.
- [10] MAGONETTE, G.; MARAZZI, F.; BOSSENS, F.; DUMOULIN, C.: *Active Control Experiment of a Large Scale Cable-Stayed Bridge Mock-Up*, Proceedings of the third International Symposium on Cable Dynamics, Trondheim, Norway, 1999, pp. 151–156.
- [11] GEIER, R.: *Systemidentifikation seilgestützter Tragwerke – Die dynamische Strukturantwort von Schrägseilen*. Dissertation, TU Wien, Juni 2004.
- [12] RENDA, V.; MAGONETTE, G.; MOLINA, R.; TIRELLI, D.; VIACCOZ, B.: *Experimental Contribution of the JRC ELSA labo-*

- ratory for the Assessment and Control of Vibration of Structures and Cables. Proceedings of the 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, University of Southern California, 2006.
- [13] LINDEMAN, T.: *Wirksamkeit von Seildämpferelementen bezogen auf die Anströmrichtung des einwirkenden Windes*. Diplomarbeit, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Fakultät 6: Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Universität Stuttgart (in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen und der Maurer Söhne GmbH), August 2010.
- [14] Maurer Söhne GmbH & Co. KG: Titelbild Homepage: www.maurer-soehne.de/bauwerkschutzsysteme, 05.11.2012.
- [15] THIELE, K.: *Pseudodynamische Versuche an Tragwerken mit großen Steifigkeitsänderungen und mehreren Freiheitsgraden*. Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich. Bericht Nr. 253, Birkhäuser Verlag Basel, Zürich, 2000.
- [16] SCHERMER, D.: *Verhalten von unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung*. Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2004.
- [17] ZILCH, K.; FINCKH, W.; GRABOWSKI, S.; SCHERMER, D.; SCHEUFLER, W.: *Test results on the earthquake resistance on improved masonry materials by pseudo dynamic tests*. Technical report of the collective research project ESEC-MaSE, Deliverable D7.2b, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2008.
- [18] ZILCH, K.; GRABOWSKI, S.; SCHEUFLER, W.: *Experimentelle Untersuchung des nichtlinearen Tragverhaltens zusammengesetzter Schubwandquerschnitte aus unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbelastung*. Forschungsbericht (Z 6 – 10.07.03-04.10) Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2008.
- [19] ZILCH, K.; SCHERMER, D.; SCHEUFLER, W.: *Simulated Earthquake Behavior of unreinforced Masonry Walls*. In: GRUNDMANN, H. (Hrsg.): Proceedings of the fifth European Conference on structural Dynamics – EURO DYN 2002, 2.–5. September 2002, München 2002.
- [20] MARC/MENTAT 2011, MSC Software Corporation, 2 MacArthur Place Santa Ana, CA 92707, <http://www.msc-software.com/Products/CAE-Tools/Marc.aspx>, 2011.
- [21] FISCHER, O.; HEINEN, A.; THALHEIM, J.: *Nichtlineare räumliche Seilschwingungen*. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau Nr. 02/03, ISSN 1431-5122, Universität der Bundeswehr München, 2003.
- [22] FISCHER, O.; SEILER, C.; HUBER, P.: *Semi-Active MR Dampers in TMD's for Vibration Control of Footbridges; Numerical Analysis and Practical Application*. In: Proc. Footbridge '02 Conference, Paris, 2002.
- [23] SEILER, C.; FISCHER, O.; DISTL, H.; BRAUN, C.: *Semi-aktive Schwingungsdämpfer – Entwicklung und Anwendung einer neuen Technologie*. Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003), Heft 10, S. 605–614.
- [24] PETERSEN, CH.: *Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau*. Fa. Maurer Söhne GmbH & Co. KG. (Hrsg.), München 2001, ISBN: 3-00-008059-7.
- [25] BLACKBURN, H.; HENDERSON, R.: *Lock-In Behavior in Simulated Vortex-Induced Vibration*. Experimental Thermal and Fluid Science (1996), Nr. 12, pp. 184–189.
- [26] SHINOZUKA, M.; JAN, C.-M.: *Digital simulation of random processes and its applications*. Journal of sound and vibration, Vol. 25, No 1, pp. 111–128, 1972.
- [27] SHINOZUKA, M.: *Stochastic Fields and their digital Simulation*. In: Stochastic methods in structural dynamics 1987 (1987), pp. 93–133.
- [28] RUSCHEWEYH, H.: *Dynamische Windwirkung an Bauwerken 1: Grundlagen Anwendungen*. Wiesbaden; Berlin: Bauverlag GmbH, 1982.
- [29] POPA, M.: *Numerische Untersuchung der Strömungsverteilung am oszillierenden Kreiszyylinder mittels CFD*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2012.
- [30] NEWMARK N. M.: *A Method of Computation for Structural Dynamics*. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, pp. 67–94, 1959.
- [31] NAKASHIMA M.; MASAOKA N.: *Real-Time On-Line Test for MDOF Systems*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 393–420, 1999.

Autoren



Dipl.-Ing. Wolfgang Scheufler
Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Theresienstraße 90
80333 München
wolfgang.scheufler@tum.de



Dipl.-Ing. Stefan Burghard
Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Theresienstraße 90
80333 München
stefan.burghard@tum.de



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer
Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Theresienstraße 90
80333 München
oliver.fischer@tum.de



Dr.-Ing. Christian Braun
Maurer Söhne GmbH & Co. KG
Frankfurter Ring 193
80807 München
braun@maurer-soehne.de