

## Kurzfassung

Neue Materialien und Technologien erlauben nicht nur Entwurf und Konstruktion ultraleichter und schlanker, sondern auch nachhaltiger Brücken. Um ihre hohe Schwingungsanfälligkeit zu reduzieren, wurde eine aktive Schwingungskontrolle entwickelt und an einem Prototypen realisiert. Dafür wurde mit dem höchstfesten Material kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff eine Spannbandbrücke gebaut, die mit nur einem Millimeter statischer Bauhöhe 13 m weit spannt und Fußgängerlasten von bis zu  $5 \text{ kN/m}^2$  trägt. Bei diesem rein zugbeanspruchten Tragwerk kann die hohe Zugfestigkeit der Kohlenstofffasern in Form von CFK-Lamellen ideal genutzt werden. Die äußerst geringe Dehnsteifigkeit der optimal ausgenutzten CFK-Lamellen und die geringe Strukturdämpfung der sehr leichten und filigranen Spannbandbrücke führen jedoch schon unter normalem Fußgängerverkehr zu einer außergewöhnlich hohen Schwingungsanfälligkeit in mehreren Eigenfrequenzen.

Das Konzept zur aktiven Schwingungskontrolle beinhaltet den geregelten Eintrag von Kräften, die durch Einbindung von Aktuatoren in die ohnehin erforderliche Geländerkonstruktion aufgebracht werden. Zum Einsatz kommt ein „künstlicher Muskel“, ein neuartiger, biologisch inspirierter, extrem leichter und gleichzeitig kraftstarker pneumatischer Zugaktor. Dieser erzeugt Dämpfungskräfte bei der Aufwärtsbewegung der schwingenden Brücke. Neben Aktuatoren besteht das Gesamtsystem der aktiven Schwingungskontrolle aus Sensoren und einer Regelung. Das Konzept für die hier erforderliche Mehrgrößenregelung basiert auf einer Kaskadenregelung. Diese besteht aus inneren Schleifen zur Regelung der Kräfte der pneumatischen Muskeln und einer äußeren Schleife zur Regelung beziehungsweise zur Kontrolle der ersten drei vertikalen Eigenschwingungen. Der Entwurf beider Regelungen erfolgt modellbasiert.

Zunächst wird ein analytisches Modell der Spannbandbrücke mit einer Beschreibung für die angreifenden Aktuatorenkräfte entwickelt. Die experimentelle Verifizierung des Modells zeigt, dass ein linearisiertes diskretes 8-Platten-Modell das vertikale Eigenschwingungsverhalten der Spannbandbrücke sehr gut abbildet. Die Kraftregelung des pneumatischen Muskels basiert auf einem nichtlinearen analytischen Modell des Aktuator-Systems. Anhand des Entwurfsverfahrens der exakten Ein-/ Ausgangslinearisierung wird gezeigt, dass die Nichtlinearitäten des Aktuator-Systems durch eine nichtlineare Regelung linearisiert werden können. Es stellt sich jedoch heraus, dass die Zeitkonstante der linearen Aktuatordynamik nicht vernachlässigbar ist und deshalb beim Entwurf der Regelung und im Regelalgorithmus zur Kontrolle der Eigenschwingungen berücksichtigt werden muss. Dieser Entwurf erfolgt mit Hilfe von Wurzelortskurven auf Basis der analytischen Beschreibung der Eigenschwingungen und der linearen Aktuatordynamik. Er liefert die Regelparameter für die zeitverzögerten modalen Geschwindigkeitsrückführungen der Mehrgrößenregelung. Die modalen Regelgrößen werden über einen Kalman-Filter beobachtet.

Zur Bestätigung der modellbasierten Regelungen und der analytischen Modelle wird die aktive Schwingungskontrolle an der entwickelten Spannbandbrücke mit CFK-Lamellen realisiert. Der Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation und dem Experiment nach einer definierten Anregung veranschaulicht die Qualität der analytischen Modelle und Regelungen. Unter fußgängerinduzierten Schwingungen bestätigen sich sowohl die Funktionsfähigkeit in der Praxis als auch das Potential aktiver Systeme zur Schwingungskontrolle. Die Beschleunigungsamplituden werden effizient auf ein komfortables Maß reduziert. Letztendlich zeigen die Ergebnisse, dass aktiver Leichtbau der Vision „null“ Bauhöhe und „unendliche“ Steifigkeit einen Schritt näher kommt.

## Abstract

New materials and technologies allow not only the building of ultra-light and slender bridges, they also enable the construction of sustainable bridges. Aiming at a reduction of their more complex and high vibration sensitivity, a new active vibration control approach was developed and applied to a prototype; both will be presented in this thesis. By using high-strength carbon fibre reinforced plastic (CFRP), a very light and flexible stress ribbon foot-bridge having a span of 13 m and a structural height of only 1 mm was built in the lab of the Chair of Conceptual and Structural Design of the Berlin Institute of Technology. The high-strength CFRP ribbons are ideally suited for this purely tensioned bridge. However, the extremely low extensional stiffness of the optimally designed and exploited CFRP cross section as well as the bridge's extremely low structural damping, even under ordinary pedestrian traffic, lead to an unusually high vibration sensitivity in several modes.

In order to counteract the high level of pedestrian-induced vibrations, an active vibration control concept is developed. This concept includes the embedding of smart actuators into the handrail, which is required anyway. Here, biologically inspired, extremely light and powerful artificial muscles are used. These pulling only actuators generate damping forces during the upward movement of the vibrating bridge. An active vibration control system consists of actuators, sensors and a controller. The multi-variable control concept is based on a cascaded control consisting of subsidiary loops to control the force of the pneumatic muscles and the outer loop to finally control the first three vertical modes of the bridge. The design of both controls is model-based.

First, a reduced discretized analytical model for the stress ribbon bridge is developed. To verify the analytical prediction, experiments without control are conducted. They show that a linearized 8-plate-model describes the natural modes and frequencies sufficiently exact. Secondly, the force control of the actuator system is based on a nonlinear analytical model of the pneumatic muscle, the valve characteristic and the pressure build-up. To handle the nonlinearities of the actuator system, a nonlinear force controller is designed based on exact linearization methods. It is observed that the time constant of the linearized actuator system is not negligible and has to be considered in the control design and control algorithm of the outer loop as well. This control design is done with the root locus method based on the analytical model of the bridge's natural modes and the linear actuator dynamics. Finally, a delayed modal velocity feedback control for multimodal vibrations is achieved. Therefore, the controlled variables respectively modal velocities are estimated with a Kalman filter.

The analytical models and model-based controllers are verified by experiments. Thus, the active system is implemented in a real-time environment on the developed CFRP stress ribbon bridge. The comparison between simulation and experiment of the entire closed-loop control after actuator-induced vibrations show the quality of the models and the control rules. Stability and performance of the active vibration control system is demonstrated under pedestrian-induced vibrations. The results show that acceleration amplitudes are efficiently reduced to a comfortable level in the first three vertical modes without significant spillover effects in higher modes. Finally, the findings show that active controlled lightweight structures are one step closer to the vision of "zero" structural height and "infinite" stiffness.