

4. Juni 2003, 02:13, Neue Zürcher Zeitung

Von intelligenten Brücken, Fenstern und Propellern

Adaptive Werkstoffsysteme passen sich der Umgebung an

Unter Schlagworten wie «selbstanpassende Systeme» oder «smart materials» tauchen in jüngerer Zeit vermehrt Ideen über technische Systeme auf, die dank eingebauter Intelligenz auf die verschiedensten äusseren Einflüsse sinnvoll reagieren können. An der Empa hat man jetzt ebenfalls Fuss in dieser Zukunftstechnik gefasst.

hc. In der Bauhalle der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf steht eine seltsame Testanlage: Ein 15,5 Meter langes Litzenkabel aus Stahl ist an beiden Enden an schwere Sockel gespannt. Alle 60 Zentimeter ist ein zusätzliches Stahlgewicht an das Kabel geschraubt. Die Anlage soll eines der mächtigen Stahlseile von Schrägseilbrücken simulieren; die zusätzlichen Gewichte kompensieren das in dieser stark verkleinerten Version mangelnde Eigengewicht des realen Stahlkabels.

Schrägseilbrücken haben den Brückenbau über grosse Spannweiten in den letzten Jahrzehnten revolutioniert. Indem der Fahrbahnkörper an einem Fächer aus einzelnen Stahlseilen hängt, die über Pylone zu den Widerlagern an den beiden Brückenenden geführt werden, lassen sich heute schlanke Brücken ohne Zwischenpfeiler konstruieren, wie etwa die 280 Meter lange Erasmus-Brücke über den Rhein in Rotterdam. Die Sache hat aber ihren Haken: Frei hängende Seile haben von Natur aus eine nur schwache Eigendämpfung und geraten durch Wind, Regen und den Verkehr ins Schwingen. Wie die Saiten einer Geige haben die Seile charakteristische Eigenschwingungen. Diese Eigenfrequenzen liegen typischerweise im Bereich von einem halben bis zu einem Dutzend Hertz (Schwingungen pro Sekunde).

Lässt man Eigenschwingungen ihren Lauf, kann die Brücke bedrohlich in Fahrt kommen. Im Extremfall führt dies zum Kollaps der Brücke - wie jener legendäre Film aus dem Jahre 1940 drastisch zeigt, wo in den USA ein Sturm die allzu schlank dimensionierte Hängebrücke über den Puget Sound bei Tacoma derart wild um die Längsachse der Fahrbahn taumeln liess, dass die Konstruktion zerbrach und in den Fluss stürzte. Heutige Hängebrücken kommen höchstens noch leicht ins Schwingen. Für die Benutzer ist das trotzdem unangenehm; und es ist ein Problem für die Lebensdauer des Bauwerks, denn die Schwingungen verursachen an den Kabelverankerungen wie auch in der Fahrbahn vermehrten Materialstress und beschleunigte Abnutzung.

Wie man Brücken zähmt

Das Brückenkabel in der Empa-Bauhalle ist mit einem magneto-rheologischen Fluidtämpfer ausgerüstet, der knapp vor der Verankerung seitlich am Kabel angreift. Der Dämpfer besteht aus einem mit Öl gefüllten Zylinder und einem Kolben, der die Schwingungen vom Kabel übernimmt und durch sein Auf und Ab im Zylinder dämpft - so

weit also ein Funktionieren wie bei einem herkömmlichen Stossdämpfer. Nun schwimmen aber in der Flüssigkeit magnetisierbare Mikroteilchen. Und der Kolben ist mit einer Drahtspule umwickelt. Lässt man in der Spule einen Strom fließen, erzeugt dieser ein magnetisches Feld, was die magnetisierbaren Teilchen zu kettenartigen Strukturen ausrichtet. Das macht die Flüssigkeit zäher - der Widerstand für den Kolben wird grösser, die Dämpfung verstärkt.

Damit kann auf Seilschwingungen reagiert werden. Indem man längs des Kabels Bewegungssensoren placiert und deren Signale an einen elektronischen Rechner weiterleitet, kann der Rechner in der Spule genau jene Stromstärke fließen lassen, die den Kolben und somit das Kabel optimal bremst. So lassen sich im Versuchsaufbau, nachdem das Kabel zum Schwingen gebracht worden ist, die Amplituden der ersten beiden Eigenfrequenzen des Kabels auf zwei Drittel des Wertes reduzieren, den der Fluiddämpfer ohne aktive Dämpfungsregelung leistet. Indem solche automatisch gesteuerte Dämpfung laufend das tatsächliche Schwingungsverhalten berücksichtigt, also auch Verschiebungen der Eigenfrequenzen (etwa durch Änderungen der Umgebungstemperatur oder des Verkehrsaufkommens auf der Brücke) mit einbezieht, kann von einem adaptiven Werkstoffsystem gesprochen werden.

«Die Empa interessiert sich schon seit über dreissig Jahren für Schrägseilbrücken, wobei wir uns mit der Entwicklung von Kabeln aus kohlenfaserverstärktem Kunststoff international einen Namen machen konnten», sagt Urs Meier, Stellvertretender Direktor der Empa. «CFK-Kabel haben eine viel geringere Eigenlast als herkömmliche Stahlkabel und dürften sich deshalb auch für Spannweiten bis zu mehreren Kilometern eignen. Leichte und lange Kabel zeigen jedoch besonders starke Eigenschwingungen, weshalb sich solche gigantischen Brücken kaum ohne adaptive Werkstoffsysteme denken lassen», skizziert Meier die Zukunft. Um hier schon früh an der Forschungsfront dabei zu sein, ist an der Empa das Programm «Adaptive Werkstoffsysteme» etabliert worden, das ein Dutzend Leute beschäftigt.

In der Bauhalle zurzeit im Aufbau ist eine 20 Meter lange Fussgängerbrücke, an der verschiedene adaptive Dämpfungssysteme entwickelt und getestet werden sollen. Die Brücke wird erst mit Stahlseilen und später mit CFK-Seilen ausgerüstet. Intelligente Brücken sind nur die Spitze des Eisbergs der internationalen Forschung nach «smart materials». Seit vierzig Jahren wird (nach dem Vorbild der Natur) intensiv studiert, wie man Werkstoffe (Gewebe) mit Sensoren (Nerven) und Aktoren (Muskeln) ausrüsten könnte, die, gekoppelt über einen adaptiven Regler (Gehirn), automatisch und schnell auf die verschiedensten Umgebungseinflüsse reagieren. Nur: Bis vor kurzem sei praktisch die gesamte Forschungstätigkeit theoretischer Natur gewesen, sagt Meier. Indem man jetzt konkrete Entwicklungsarbeit leiste, wolle man die vielversprechenden Ideen in Reichweite praktischer Verwendbarkeit bringen.

Trickreicher Antischall

In einem andern Empa-Labor steht ein skurriles Fenster mit allerhand Drähten und kleinen Geräten zwischen der Doppelverglasung. Macht ein Schallgenerator hinter dem Fenster tüchtig Lärm, beginnen die Scheiben trotz Schallisolation bei tiefen Frequenzen (knapp 130 Hertz) zu schwingen und Schall abzustrahlen - dort, wo die Scheiben ihre Eigenresonanzen haben. Will man solche lästigen Effekte ausschalten, hilft nur aktiver «Gegenlärm», den man genau um eine halbe Wellenlänge phasenverschoben der Störfrequenz entgegenstrahlt, wobei die Störwelle durch Interferenz kompensiert und ausgelöscht wird.

In der Doppelverglasung des Empa-Versuchsfensters sitzen Mikrophone, die den von der äusseren Scheibe aufgenommenen Lärm registrieren und einem Rechner mitteilen, der dann einer Reihe von miniaturisierten Lautsprechern, die ebenfalls zwischen den Scheiben sitzen, den massgeschneiderten Antischall diktiert. Das Resultat solcher aktiver Lärmkontrolle, welche die Gruppe von Stanislaw Pietrzko zusammen mit dem Institut für Automatik der ETH Zürich entwickelte, ist erstaunlich: Wo bei ausgeschaltetem Kontrollsystem die Scheiben dröhnen, reduziert das «aktive Fenster» den Lärm um 14 Dezibel auf moderates Niveau.

Solche Antischalltechnik hat Anwendungspotenzial generell bei zweischaligen Leichtbaustrukturen - von der Flugzeugkabine bis zum Autodach, wo Fahrtwind und Motorenlärm für Resonanzeffekte sorgen. So gut nun Mikrophon und Lautsprecher im Labor funktionieren, für die breite Praxis sind sie zu aufwendig. Geeigneter erscheinen Sensoren und Aktoren aus Piezokeramiken. Der schon im Jahre 1880 von Pierre und Jacques Curie an Quarzkristallen entdeckte Piezoeffekt «übersetzt» eine mechanische Verformung in einen elektrischen Strom. Wird nämlich auf einen Quarzkristall Druck oder Zug ausgeübt, verschieben sich an der Kristalloberfläche positive und negative Ladungen, und es entsteht eine elektrische Spannung. Umgekehrt beginnt sich der Kristall zu verformen, wenn aussen ein elektrisches Feld angelegt wird.

Aktive Piezofolien

Da Vibrationen mechanische Verformungen sind, liegt der Einsatz von piezoaktiven Materialien als Sensoren und Aktoren nahe. Seit Ende 2002 entwickelt an der Empa die Gruppe von Xavier Kornmann und Christian Huber «Active Fiber Composites» (AFC), aktive Verbundwerkstoffe. Dazu werden Piezofasern parallel in einen Polymerfilm eingebettet; per Siebdruck wird die Filmoberfläche schliesslich mit Silberelektroden «verdrahtet». Klebt man Elemente aus einer solchen AFC-Folie auf eine Fensterscheibe, melden sie die momentane Verformung der Glasoberfläche, wobei dann per Rechner andere AFC-Elemente elektrisch so angeregt werden, dass sie sich kontrahieren oder ausdehnen, bis die Vibration kompensiert ist.

Eine Hürde sind die kommerziell bisher erhältlichen piezoaktiven Keramikfasern aus Blei-Zirkonat-Titanat mit Längen von höchstens 170 Millimetern und Dicken zwischen 200 und 300 Mikrometern; ganz zu schweigen von Preisen bis zu 10 000 Dollar pro Kilogramm. Um flexible piezoaktive Elemente für grössere Flächen entwickeln zu können, suchen die Empa-Leute jetzt nach einem Verfahren, das Piezofasern von beliebiger Länge und einem Durchmesser von weniger als 30 Mikrometern produziert.

Piezokeramische Aktoren können sich unter elektrischer Spannung bis zu 0,2 Prozent ausdehnen, was zur Kompensation von Vibrationen genügt. Für grössere Bewegungen sind andere Systeme in Entwicklung. Zum Programm in Dübendorf gehören elektroaktive Polymer-Aktoren (EAP-Aktoren). Ein Polymerfilm (etwa aus Silikon oder Acryl) wird zwischen zwei flexible Elektroden (z. B. aus Kohlenstoffpulver) gepackt. Legt man eine Spannung an, entstehen an den Elektroden elektrostatische Anziehungskräfte, die den inkompressiblen Polymerfilm zusammendrücken und dabei planar ausdehnen. Mit diesem Aktorprinzip können Flächendehnungen bis zu 300 Prozent erreicht werden. An der englischen Universität Sheffield arbeitet der Prototyp einer künstlichen Hand mit dieser Technik.

Wie sieht die Empa die künftige Entwicklung? «Adaptive Werkstoffsysteme sind äusserst komplex, und die Forschung ist sehr international und interdisziplinär», sagt Urs Meier. Deshalb arbeite die

Empa eng zusammen sowohl mit dem kanadischen Forschungsnetz Isis (Intelligent Sensing for Innovative Structures) als auch mit der Forschungsallianz Samson (Smart Adaptive Materials of High Novelty), die 27 Institute umfasst, unter anderen die ETH Zürich und Lausanne sowie Institute der Fraunhofer-Gesellschaft.

Blick in die Zukunft

Einen Blick in die Kristallkugel hat unlängst eine internationale Befragung von 2300 Experten gewagt. Intelligente Fenster und Fassaden, die ausser Lärm auch automatisch die Sonneneinstrahlung und den Wärmefluss regulieren (z. B. durch elektrochrome Materialien, die bei elektrischem Strom die Farbe wechseln) sollten bereits in fünf bis zehn Jahren auf dem Markt sein. Etwas länger, zehn bis zwanzig Jahre, rechnet man für die Entwicklung von Verbundwerkstoffen, die bei Belastung ihre Steifigkeit ändern. So sind Baukonstruktionen denkbar, die bei Vibrationen automatisch härter werden, was etwa bei Erdbeben nützlich sein könnte. Ähnlich weit in der Zukunft liegen Baumaterialien mit integrierten Funktionen zur Selbstdiagnose und automatischer Reparatur, etwa von Rissen im Innern von Bauteilen.

Nur wenige Jahre vor der Marktreife sollen intelligente Flügel und Propeller sein. Während der Vogel mit seinen Schwungfedern das Flügelprofil laufend aerodynamisch optimieren kann, ist der technische Flügel (mit Ausnahme von ein paar Klappen) starr, was unter anderem zu Luftwirbeln mit enormen Leistungsverlusten führt. Die amerikanische Flugzeugindustrie entwickelt nun mit Hilfe von AFC-Elementen adaptive Flügel und Rotorblätter. Dies soll nicht nur die Effizienz und Manövrierbarkeit der Fluggeräte markant verbessern, sondern im Falle des Helikopterrotors auch das Geknatter verringern.

Urs Meier sieht ein Potenzial für intelligente Rotorblätter auch bei Windturbinen, wo bei Rotordurchmessern von heute bereits 90 Meter das Windfeld schon deutlich inhomogen sein kann. Da piezoaktive Elemente jedoch nur kleine Kräfte ausüben können, dürften bei grossen Propellern wie auch zur Stabilisierung von Brückenseilen als Aktoren eher eine Serie von Mikroklappen in Frage kommen, die ihre Antriebsenergie direkt dem Windfeld entziehen und durch Ein- und Ausfahren die Luftströmung sehr effizient beeinflussen.

Weitere Informationen: www.empa.ch/smartstr.

.....
Diesen Artikel finden Sie auf NZZ Online unter:
<http://www.nzz.ch/2003/06/04/ft/page-article8V1Y7.html>

.....
Copyright © Neue Zürcher Zeitung AG
.....