

■ Brücke mit Tücke

Bringen marschierende Soldaten Brücken zum Einsturz? Bisher ist kein solcher Fall belegt, dafür aber Ereignisse, bei denen große Menschenmengen gefährliche Schwingungen auslösten.



Bei ihrer Eröffnung im Jahr 2000 geriet die Londoner Millennium Bridge durch die Menschenmassen gewaltig ins Wanken.

London, 10. Juni 2000: Tausende Menschen strömen über das neue Wahrzeichen ihrer Stadt – die Millennium Bridge. Nach mehr als hundert Jahren wird an diesem Tag erstmals wieder eine neue Brücke über die Themse eingeweiht. Der 325 Meter lange Steg verbindet die St. Paul's Cathedral mit der Tate Modern. Auf Youtube-Videos der Eröffnung sieht es aus, als hätten die Besucher Unmengen von Alkohol konsumiert. Wie betrunken wanken sie über das Bauwerk. Bei näherem Betrachten fällt auf: Nicht nur die Menschen schwanken, sondern auch die Brücke führt merkwürdige Bewegungen aus. Wie eine Schlange windet sie sich horizontal, gut sichtbar an den weißen Fahnen auf der Brücke.

Der Vorfall auf der Millennium Bridge ist einer der neuesten, aber längst nicht der einzige Fall einer schwankenden Brücke. In der Geschichte des Brückenbaus kam es schon mehrfach zu spektakulären Ereignissen – wie am 7. November 1940 an der Tacoma Narrows Bridge. Die riesige Hängebrücke im US-Bundesstaat Washington schaukelte sich so auf, dass sich die Fahrbahn viele Meter hoch wie ein Gummiband bog, schließlich brach und in den Fluss stürzte.

Wenn eine Brücke in Schwingung gerät, liegt das an der Resonanz: Fußgänger führen Energie in einem Rhythmus zu, welcher

der Eigenfrequenz des Bauwerks entspricht. Kinder lernen dieses Prinzip recht schnell zu nutzen, wenn sie auf der Schaukel sitzen. Die Schaukel schwingt nur dann immer höher, wenn das Kind die Beine im richtigen Moment nach vorne bewegt.

Taktvolle Uhren

Das kollektive Verhalten in mechanischen Systemen hat Christiaan Huygens bereits vor rund 350 Jahren entdeckt. Er konstruierte eine Apparatur mit zwei Pendeluhrn für die Seefahrt (Abb. 1). Bleibt eine Uhr stehen, läuft die andere weiter. Die beiden mit Federn angetriebenen Pendel waren auf einer hölzernen Plattform angebracht, die sich auf Rollen entlang einer Schiene frei bewegen konnte. Damit die Uhr bei starkem Seegang nicht umkippte, stabilisierte sie Huygens mit zwei insgesamt etwa vierzig Kilogramm schweren Bleigewichten. Dabei machte er eine verblüffende Entdeckung: Egal, in welcher Position die Pendel der beiden Uhren starteten, nach spätestens einer halben Stunde schwangen sie synchron – entweder in Phase oder in Gegenphase.

Luftstöße zwischen den Pendeln kommen als Erklärung für dieses Verhalten nicht infrage, das konnte schon Huygens zeigen. Heute weiß man, dass unhörbare Schallwellen, die sich durch die Konstruktion

übertragen, für die Synchronisation sorgen. Dieser Effekt tritt nur auf, wenn die Masse der Pendel in einem bestimmten Verhältnis zur Gesamtmasse der Apparatur steht. Ist der Aufbau zu leicht, ist die Kopplung zu stark, und mindestens ein Pendel hört auf zu schwingen. Ist der Aufbau zu schwer, ist die Kopplung zu schwach, und es kommt nicht zur Synchronisation.

Solche Überlegungen spielen auch bei Resonanzen an Brücken eine Rolle, insbesondere Masse und Dämpfung haben Einfluss. Allerdings sind die Zusammenhänge nicht so einfach: Je mehr Menschen auf der Brücke gehen, je synchroner ihre Schritte sind, umso stärker müsste die Brücke in Schwingung geraten. Doch Simulationen – und reale Ereignisse der letzten Jahre – deuten darauf hin, dass es diesen linearen Zusammenhang nicht gibt.

Ein tückisches Phänomen, das sich bei der Millennium Bridge in London gezeigt hat, ist der Umstand, dass nicht nur Fußgänger die Brücke in Resonanz bringen können, sondern umgekehrt auch die Brücke das Verhalten der Fußgänger beeinflusst. Auf festem Boden bewegen sich Fußgänger unkoordiniert und zufällig, ihre Schrittfrequenz unterscheidet sich abhängig von Körpergröße und Gehtempo über einen gewissen Bereich. Fängt der Boden aber an zu schwingen, passen Fußgänger ihre

Schrittfrequenz an. Wenn sie bei dieser Rückkopplung die Resonanzfrequenz der Brücke treffen – bei der Millennium Bridge betrug diese etwa ein Hertz –, schaukelt sich das Bauwerk gefährlich auf.

Die Wechselwirkung zwischen Brücke und Mensch war bei den statischen Berechnungen der Millennium Bridge nur für vertikale Schwingungen berücksichtigt worden, nicht aber für horizontale Bewegungen. Laut Modellrechnungen sind die entscheidenden Parameter die Schrittfrequenz und Reaktionszeit der Fußgänger, die Zahl der Fußgänger sowie die Eigenfrequenz und Dämpfung der Brücke.¹⁾ Die Berechnungen erklären auch, warum das Phänomen nur bei einer großen Zahl von Fußgängern auf der Brücke auftritt.

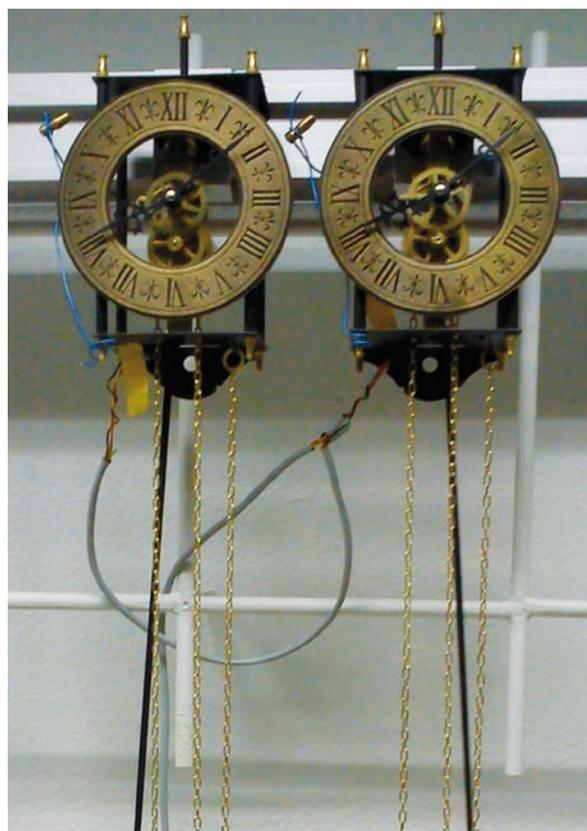
Schwingungen im Modell

Aktuelle Modellrechnungen haben einen weiteren Mosaikstein hinzugefügt.²⁾ Demnach hängt die Amplitude der Schwingung keineswegs linear mit der Zahl der Personen auf der Brücke zusammen. Nimmt die Anzahl zu, kommt es zunächst zu keiner merklichen Schwingung, solange ein bestimmter Schwellenwert nicht erreicht wird. Steigt die Zahl der Passanten jedoch über diesen kritischen Wert, verstärken sich die Ausschläge des schwingenden Bauwerks schlagartig. Also scheint

es eine „magische“ Zahl von Fußgängern zu geben, die gleichzeitig über eine Brücke laufen können.

Wie aber lässt sich das Schwingen von Brücken infolge von Menschengetrappel oder starken Windböen verhindern? Bei der Millennium Bridge kam es zu einem radikalen Entschluss. Nur zwei Tage nach der wackeligen Eröffnung schloss man sie wieder. Fast zwei Jahre dauerte die Sperrung, die Nachbesserungen verschlangen noch einmal rund fünf Millionen Pfund zusätzlich zu den ursprünglichen Baukosten von 18,2 Millionen Pfund. Abhilfe sollten diagonal verlegte Dämpfungselemente sowie 58 Schwingungstilger schaffen. Diese Elemente verschieben die Resonanzfrequenz der Brücke in einen Bereich, der außerhalb der Frequenzen liegt, die Fußgänger beim Gehen erzeugen.

Weil es verlässliche Modellrechnungen damals noch nicht gab und die Statiker kein Risiko eingehen wollten, unternahmen sie einen spektakulären Test: Sie ließen vor der Wiedereröffnung der Millennium Bridge 2000 Personen auf dem Steg hin und her laufen und überwachten mit Sensoren das Schwingungsverhalten. Resultat: Auch die horizontalen Schwingungen lagen nun weit unter den geforderten Werten. Am 22. Fe-



H. M. Oliveira und L. V. Melo, DOI: 10.1038/srep11548

Abb. 1 Für die Seefahrt konstruierte Christiaan Huygens eine Apparatur mit zwei Pendeluhren, die stets synchron schwingen – unabhängig vom Startpunkt der Pendel.

bruar 2002 wurde die Millennium Bridge wiedereröffnet und bereits 2008 endgültig zerstört – aber nur im Kino: Im Film „Harry Potter und der Halbblutprinz“ legen die berühmten Todesser das Bauwerk in Schutt und Asche.

Bernd Müller

1) Mehr Infos dazu unter bit.ly/2CQmVXD

2) I. Belykh et al., Sci. Adv. 3, e1701512 (2017)

WILEY

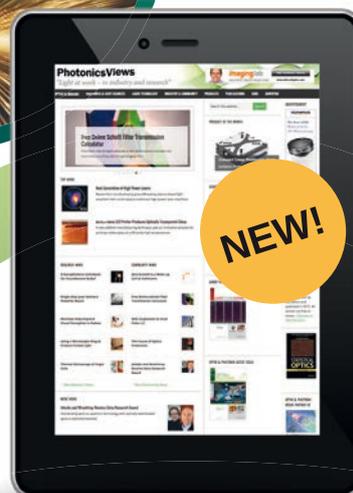
Light at Work

PhotonicsViews.com

The international news platform for industry and research in

- Optics
- Photonics
- Laser Technology

PhotonicsViews.com



© Kadmy - Fotolia.com