

Resonanz bei Brücken

Kontextorientierte Aufgabe

Th. Wilhelm

Als Beispiel für Resonanz wird gerne die erste Tacoma-Narrows-Brücke genannt, die 1940 einstürzte. Für Schüler ist dabei aber nicht einzusehen, wie ein konstanter Wind eine periodische Anregung der Brücke erzeugen soll. Tatsächlich bildete sich hinter dem Fahrbahnträger schon bei leichtem Wind eine Kármánsche Wirbelstraße, deren Wirbel sich mit annähernd der Eigenfrequenz der Brücke von 0,2 Hz ablösten [1-3]. Der so erzeugte Schwingungsmodus führte aber nicht zum Brückeneinsturz. Am 7. November 1940 wehte ein starker Wind, der nun aber Torsionsschwingungen mit 1 Hz erzeugte. Der sich verdrehende Fahrbahnträger konnte so dem Wind immer weiter Energie zur Verstärkung der Torsionsschwingung entnehmen, was zum starken Aufschaukeln und zum Einsturz führte. Dies wurde von Ingenieuren gefilmt und dieser Film wurde als kulturgeschichtlich bedeutsames Filmdokument in das National Film Registry der USA aufgenommen [1].

Für den Unterricht ist es geeigneter, wenn man eine periodische, externe Anregung der Brücke sehen kann, was beispielsweise durch Menschen möglich ist. Die harten Bedingungen für eine Resonanz sind aber, dass die Personen die Brücke genau mit der Eigenfrequenz der Brücke und außerdem stark genug anregen, was durch Laufen im Gleichschritt denkbar ist und deshalb nach §27(6) der Straßenverkehrsordnung verboten ist [4]. Denkbar sind sowohl vertikale Schwingungen als auch seitliche Schwingungen.

Ohne externe Anweisung laufen Menschen nicht im Gleichschritt. Wenn jedoch eine Brücke einmal in seitliche Schwingungen geraten ist, passen sich die Fußgänger der Schwingung an und versuchen, diese durch ihre eigene Bewegung auszugleichen. So verstärken sie unbewusst die Schwingung. Dies geschah nach der Eröffnung der Millennium Bridge in London, die deshalb zunächst wieder geschlossen werden musste [5-6].

Für Jugendliche ist es heute selbstverständlich, sich häufig Videoclips im Internet anzusehen. 94 % aller Jugendlichen sind YouTube-Nutzer, wobei sich 81 % mindestens mehrmals pro Woche Videos und Clips anschauen und 52 % der Zwölf- bis 19-Jährigen dies täglich tun [7]. Die Attraktivität solcher Videoclips kann auch für den Physikunterricht genutzt werden. Dazu ist nicht einmal eine Hardwareausstattung der Schule nötig. 92 % aller Jugendlichen haben ein Smartphone und drei Viertel haben eine Internetflatrate [7], so dass Videos in Hausaufgaben oder auch im Physikunterricht geschaut werden könnten, falls es gelingt, dass die Schüler sich dann nicht auch anderweitig mit dem Gerät beschäftigen.

Literatur

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Tacoma-Narrows-Br%C3%BCcke>
- [2] Billah, K.Y.; Scanlan, R. H.: Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks - In: American Journal of Physics. 59, Nr. 2, 1991, S. 118–124, doi:10.1119/1.16590, <http://www.ketchum.org/billah/Billah-Scanlan.pdf>
- [3] Feldman, B. J.: What to Say About the Tacoma Narrows Bridge to Your Introductory Class - In: The Physics Teacher. 31, Februar 2003, S. 92–96, doi:10.1119/1.1542045, <http://math.arizona.edu/~hhmi/Chris250AB/250B/250notes/042610Feldman2003.pdf>
- [4] <http://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung>
- [5] [https://de.wikipedia.org/wiki/Millennium_Bridge_\(London\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Millennium_Bridge_(London))
- [6] Strogatz, S. H.; Abrams, D. M.; McRobie, A.; Eckhardt, B.; Ott, E.: Theoretical mechanics: Crowd synchrony on the Millennium Bridge – In: Nature Vol. 438, 2005, S. 43-44
- [7] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (Hrsg.): JIM-Studie 2015. Jugend, Information, (Multi-) Media. Basisstudie zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, www.thomas-wilhelm.net

Von 1938 bis 1940 wurde im Staat Washington in den USA die Tacoma-Narrows-Brücke als Hängebrücke erbaut, die damals die drittgrößte Spannweite aller Hängebrücken weltweit hatte. Schon beim Bau hatten Arbeiter auf ein Auf- und Abschwingen der Brücke hingewiesen. Am 1. Juli 1940 wurde sie eröffnet, wegen ihres Schwingens „Galloping Gertie“ genannt und entwickelte sich schnell zum Touristenmagneten. Am 7. November 1940 führte ein starker Wind zu so starkem Aufschaukeln, dass die Brücke einstürzte. Du kannst dir das anschauen unter: <http://www.youtube.com/watch?gl=DE&hl=de&v=j-zczJXSxnw> (Einsturz bei 3:21 Minuten)

Die Ingenieure haben daraus viel gelernt. Umso verblüffender, dass es mit der Millennium Bridge in London im Jahre 2000 wieder Probleme gab. Die 325 Meter lange Hängebrücke für Fußgänger steht auf zwei Säulen und besitzt auf jeder Seite vier Tragseile. Als sie am 10. Juni 2000 mit zwei Monaten Verspätung eröffnet wurde, kam es unerwartet zu starken Schwingungen, so dass sie nach nur zwei Tage wieder geschlossen werden musste und zwei Jahre lang umgebaut wurde. Eingestürzt ist sie nur im Film „Harry Potter und der Halbblutprinz“.



Aufgaben:

1. Betrachte das Schwingen der Millennium Bridge über der Themse in London in https://www.youtube.com/watch?v=eAXVa_XWZ8.

Beschreibe, wie die Brücke geschwungen hat (auch im Gegensatz zur Tacoma-Narrows-Brücke). Beobachte (in der zweiten Hälfte des Videos) die Menschen und wie sie sich bewegen.

2. Betrachte die Erklärung des Schwingens der Millennium Bridge: <https://www.youtube.com/watch?v=gQK21572oSU>

Was war der Grund für das Schwingen der Millennium Bridge?

3. Betrachte das folgende Video zu einem Versuch auf der Olgabrücke (wieder eine Hängebrücke) ab der Hälfte des Videos (ab 12:50 Minuten bis 19:50 Minuten): <http://www tivi.de/mediathek/sendung-895212/wann-bricht-die-bruecke-2033514/>

Wie kommt die Fußgängerbrücke normalerweise in leichte Schwingungen? Wie heißt diese Frequenz und wie groß ist sie bei dieser Brücke? Wie wurde diese hier verstärkt? In welche Richtung schwingt die Brücke (auch im Gegensatz zur Millennium Bridge)? Wie kann man das beim Brückenbau verhindern?

4. Betrachte verschiedene Resonanzen einer Holzbrücke: <https://www.youtube.com/watch?v=uWoiMMLlvco>

In welche Richtung schwingt die Holzbrücke? Wie unterscheiden sich die verschiedenen erzeugten Schwingungen?

Lösungen

1. Die Millennium Bridge machte seitliche Schwingungen, während die Tacoma-Narrows-Brücke Torsionsschwingungen machte. Die Menschen wanken beim Gehen auch seitlich hin und her.
2. Die erste Eigenfrequenz für Querschwingungen der Brücke liegt bei etwa 1 Hz, also recht gering. Die Fußgänger passten sich dieser Schwingung an und liefen im Gleichschritt. Wichtig war, dass sich viele Menschen auf der Brücke befanden.
3. Ein leichter Wind oder ein Bus unter der Brücke erzeugen schon messbare Schwingungen. Ihre Frequenz heißt Eigenfrequenz der Brücke und sie ist bei der Olgabrücke 1,8 Hz. Hier wurde die Schwingung durch Laufen mit genau dieser Eigenfrequenz verstärkt. Dabei wird eine vertikale Schwingung angeregt. Beim Brückenbau muss man entweder höhere Eigenfrequenzen erreichen oder sicherstellen, dass die Brücke durch Dämpfung nicht viel schwingt.
4. In der ersten Hälfte des Videos führt die Holzbrücke nur vertikale Schwingungen aus. Die verschiedenen stehenden Wellen haben unterschiedlich viele Knoten und Bäuche. Außerdem ist die anregende Frequenz unterschiedlich. In der zweiten Videohälfte werden u.a. Torsionsschwingungen und seitliche Schwingungen erzeugt.