

## ■ Wolkenkratzern einen Dämpfer verpassen

Schwingungstilger verhindern, dass hohe Gebäude durch Wind zu sehr ins Schwingen geraten. Sie bilden mit dem Wolkenkratzer ein gekoppeltes Pendel.

Sie ist Blickfang und Sicherheitsversprechen in einem. Zwischen dem 87. und 92. Stockwerk im „Taipei 101“ – einem der höchsten Wolkenkratzer der Welt – hängt umgeben von einer Balustrade eine goldfarbene Kugel. Sie besteht aus 41 flachen Stahlscheiben an 42 Meter langen armdicken Stahlseilen (Abb. 1) und hat einen Durchmesser von fünfeinhalb Metern und wiegt 660 Tonnen. Dieses gigantische Pendel verhindert, dass der 508 Meter hohe Taipei 101 in zu starke Schwingungen gerät. Auslöser für solche Schwingungen können zum einen tropische Wirbelstürme sein, die mit bis zu 300 Kilometer pro Stunde über die Insel fegen. Zum anderen gibt es fast täglich Erdbeben in Taiwan, vor deren Folgen aber vor allem die Stahl- und Betonkonstruktion des Taipei 101 schützen soll.

Wie jedes mechanische Gebilde weist auch ein Gebäude Eigenfrequenzen auf, die sich durch äußere Kräfte anregen lassen. Im Taipei 101 könnten die damit einhergehenden horizontalen Auslenkungen im oberen Bereich des Wolkenkratzers Seekrankheit bei den Anwesenden



Abb. 1 Viele Schwingungstilger arbeiten passiv: Ihre Eigenfrequenz ist auf die Resonanzfrequenz des Gebäudes abge-

stimmt. Die unter der Kugel sichtbaren Kolben wandeln die auf den Tilger übertragene Energie in Wärme um.

hervorrufen. Daher begrenzen Schwingungstilger, die mit dem Bauwerk ein gekoppeltes Pendel bilden, die möglichen Amplituden. Bei einer monofrequenten, harmonischen Anregung und dem Idealfall einer beliebig wählbaren Masse und Amplitude des Tilgers stimmen die Eigenfrequenzen von Tilger und Bauwerk überein. Dann kommt es zur Resonanz und zur mehr oder minder vollständigen Übertragung der Bewegungsenergie: Das Bauwerk bleibt somit in Ruhe, während der Tilger maximale Amplituden erreicht. Bei ihm wird diese Schwingung mechanisch gedämpft, um sie letztlich als Wärme abzuführen.

Da ein Wolkenkratzer in den oberen Etagen am stärksten schwingt, müsste ein Tilger möglichst dort angebracht sein. Allerdings sind die oberen Stockwerke natürlich sehr gefragt, und ein maximaler Pendelausschlag des Tilgers ist dort aus Platzmangel häufig nicht möglich. Zudem wäre diese Konfiguration statisch ungünstig, weil das Bauwerk dadurch „kopflastiger“ wird. Aus diesem Grund ist ein Schwingungstilger immer ein Kompromiss zwischen technischer Funktionalität sowie räumlichen

und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Für die Anpassung an reale Anforderungen gibt es drei Stell-schrauben: das Verhältnis der dynamischen Massen von Tilger und Bauwerk  $\mu$ , das Verhältnis ihrer Eigenfrequenzen  $\kappa$  und die Dämpfung der Tilgermasse. Die dynamische Masse des Tilgers ist identisch mit seiner Nennmasse, beim Gebäude dagegen hängt die letztlich schwingende Masse von der Bauform ab; bei rotationssymmetrischen Strukturen macht sie ungefähr ein Viertel der Gesamtmasse des Bauwerks aus. Meist beträgt die Tilgermasse in Wolkenkratzern nur ein bis zwei Prozent der dynamischen Gebäudemasse. Da  $\kappa_{\text{opt}} = 1/(1 + \mu)$  gilt, liegen die Eigenfrequenzen von Tilger und Bauwerk also nah beisammen (Abb. 2). Die Dämpfung sorgt dafür, dass die resultierende Amplitude des Tilgers den vorgegebenen Raum nicht überschreitet. Einfach beliebig groß machen kann man die Dämpfung jedoch nicht, weil der Tilger sonst wirkungslos wäre. Beim Taipei 101 verringert der Schwingungstilger die horizontale Auslenkung am oberen Ende um bis zu 40 Prozent – bei einem extremen Taifun wären

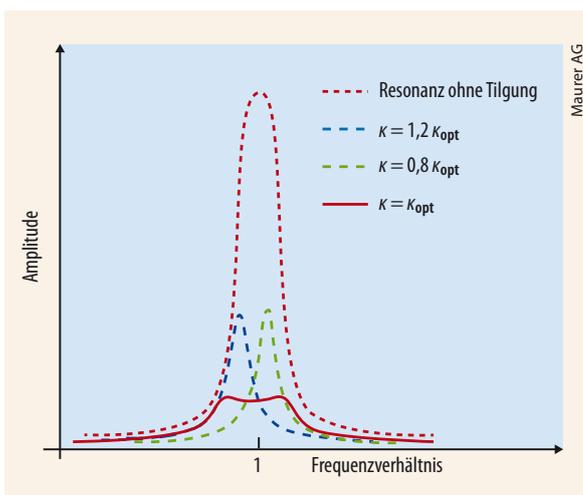


Abb. 2 Ohne Tilger kann ein Wolkenkratzer stark schwingen, wenn er mit seiner Eigenfrequenz angeregt wird (rot gepunktet). Ein Schwingungstilger mit dem optimalen Verhältnis  $\kappa_{\text{opt}}$  der Eigenfrequenzen von Tilger und Bauwerk dämpft diese Schwingungen weitgehend (rot). Wegen bautechnischen Randbedingungen weicht das Verhältnis  $\kappa$  oft etwas von  $\kappa_{\text{opt}}$  ab (blau, grün).

das 90 statt 150 Zentimeter. Wirklich angenehm wäre der Aufenthalt bei solchen Schwingungen wohl trotzdem nicht.

Bevor Ingenieure einen Schwingungstilger für ein konkretes Bauwerk richtig dimensionieren können, sind aufwändige Rechnungen und Messungen erforderlich. Selbst die Frage, ob überhaupt ein Schwingungstilger nötig ist, lässt sich nicht pauschal beantworten. Denn die Rahmenbedingungen, etwa Windverhältnisse und die Wahrscheinlichkeit von Erdbeben am Standort oder Höhe, Form und Steifigkeit des Gebäudes, sind zu unterschiedlich. So besitzt das höchste Gebäude der Erde, der 828 Meter hohe Burj Khalifa in Dubai, gar keinen Schwingungstilger. In der Spitze des Berliner Fernsehturms befindet sich dagegen ein Tilger mit einer Masse von 1,5 Tonnen. Und im 2014 eröffneten DC Tower in Wien hängt zwischen dem 56. und dem 59. Stockwerk ein Pendel mit einer Masse von 300 Tonnen.

In seltenen Fällen dienen auch schwingende Wassersäulen als Tilger. Die charakteristischen Dimensionen des Wassertanks ergeben sich aus den zu tilgenden Frequenzen. Ein solcher Flüssigkeitssäulendämpfer befindet sich beispielsweise im Comcast Center, einem 297 Meter hohen Wolken-

kratzer in Philadelphia. Der U-förmige Tank fast 1100 Kubikmeter Wasser. Tilger mit Flüssigkeiten lassen sich prinzipiell auch als Reservoir für die Sprinkleranlage nutzen oder als Kühlwasserspeicher für die Klimatisierung.

### Wider den Wind

Natürlich beschränkt sich der Nutzen von Schwingungstilgern nicht auf Wolkenkratzer. Brücken sind ein weiteres Beispiel, weil ohne Gegenmaßnahmen Wind die Eigenschwingungen recht leicht anregen kann – oder Menschenmassen, wie die Erfahrung mit der Millennium Bridge in London gezeigt hat: Zur Eröffnung im Jahr 2000 bewegten sich die zahlreichen Spaziergänger unbewusst nahezu im Gleichschritt und regten damit die Brücke zu vertikalen und horizontalen Schwingungen mit etwa einem Hertz an. Die Behörden sperrten daraufhin die Brücke, bis sie mit Schwingungstilgern nachgerüstet war.

Diese kommen heute auch im Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau zum Einsatz. Eine weitere, augenfällige Anwendung sind Schwingungstilger für Hochspannungsleitungen (**Abb. 3**). Dort schützen sie die Isolatoren, mit denen die Freileitungen an den Masten aufgehängt sind, vor zu hohen mechanischen Belastungen. Diese sogenannten Stockbridge-Dämpfer – benannt nach ihrem Erfinder, dem amerikanischen Ingenieur George Stockbridge – erinnern ein bisschen an eine schlanke Hantel. Sie tilgen kleine Amplituden mit Frequenzen zwischen einigen Hertz und rund 150 Hertz, die entstehen, wenn der Wind die Leitung umströmt. Optisch geben sie natürlich nicht so viel her wie das Pendel im Taipei 101 – aber ihr Sicherheitsversprechen lösen sie ein.

Michael Vogel

\*

Ich danke Peter Huber von der Maurer AG, München, und Lukas Lunczer von der Julius-Maximilians-Universität Würzburg für hilfreiche Erläuterungen.



**Abb. 3** „Stockbridge-Dämpfer“ schützen die Isolatoren an Hochspannungsleitungen. Sie bestehen aus einem kurzen Stück Stahlseil, an dessen Ende Massen befestigt sind.