

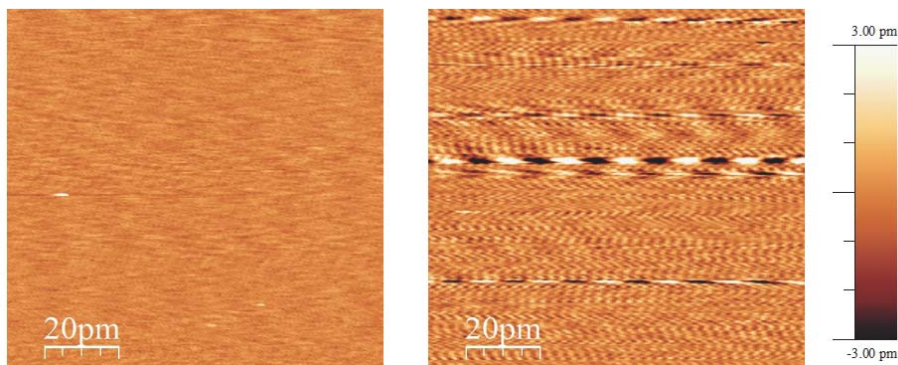
Schutz für Messinstrumente von Gebäudeschwingungen

Dr. J.R. Sandercock, The Table Stable Ltd., CH-8932 Mettmenstetten

Seit der Entwicklung des Tunnel-Raster-Mikroskops von IBM sind einige abgeleiteten Instrumente auf dem Markt gekommen. Allem voran das Atomare Kraft Mikroskop (AFM) mit atomarer Auflösung.

Man kann sich vorstellen, dass solche Messinstrumente sehr stark auf externe Schwingungen reagieren. Um das besser zu verstehen stellen sie sich vor, eine Nähmaschine, die in der vertikalen Richtung hin und her geschüttelt wird. Der Arm mit der Nadel wird durch die Beschleunigung gebogen. Der Abstand zwischen Nadel und Basis ändert sich. Das mag für eine Nähmaschine nicht sehr wichtig sein, aber für ein AFM, wo der Abstand zwischen Nadel und Probe in Angstrom Bereich liegt, ist es sehr wichtig. Im besten Fall wird das Bild verschwommen, im schlimmsten Fall die Spitze demoliert.

SC



Das rechte Bild zeigt eine Messung die durch Gebäudeschwingungen verzerrt wurde. Das linke Bild zeigt die gleiche Messung in einer Schwingungsfreien Umgebung. (Ich danke Jeffery Gehrig, EMPA für dieses Bild).

Ein AFM kann in einem Keller auf dem Lande gute Resultate bringen aber im 7ten Stock mitten in der Stadt, sieht es anders aus. Die Gebäudeschwingungen machen den Betrieb unmöglich.

Gebäudeschwingungen



Wie sehen die Gebäudeschwingungen aus?

Man muss zwei Bereiche betrachten – die Bewegungen des Fundaments und die Schwingungen im Gebäude selbst.

Ein Hochbau hat zwei dominante Schwingungsmoden – eine Biegung und eine Torsion um die vertikale Achse. Beide Schwingungen verursachen Bewegungen in der horizontalen Ebene und liegen in Tieffrequenzbereich (1-3 Hz). Die Schwingungen werden vom Wind und Verkehr angeregt.

In der vertikalen Richtung ist das Gebäude steif, dafür die internen Böden nicht. In einem typischen Gebäude weisen die Böden eine vertikale Resonanz auf im Bereich von 15-25 Hz, sind aber in der horizontalen Richtung steif.

Die Bewegungen im Fundament bilden einen Hintergrund zu den Eigenschwingungen des Gebäudes. Die Schwingungen im Fundament werden normalerweise schwächer sein, als die Eigenschwingungen des Gebäudes.

Wie kann man ein Instrument von den Gebäudeschwingungen abkoppeln? Es gibt viele Möglichkeiten mit Vor- und Nachteilen.

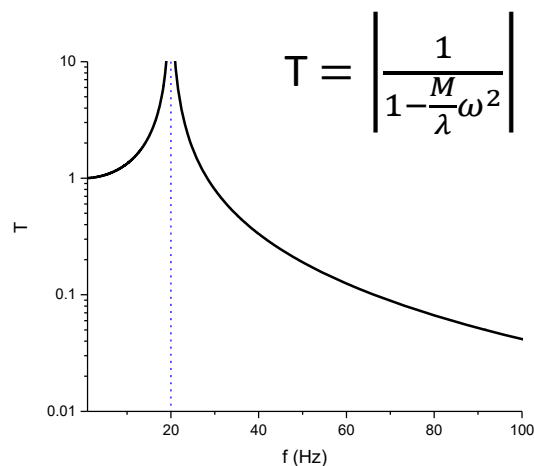
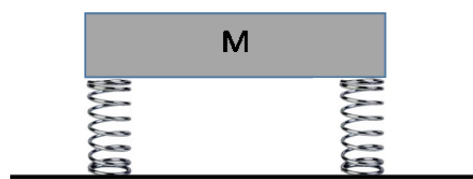
1 Entkoppelte Säule

Eine Säule direkt am Fundament sitzend, aber sonst völlig vom Gebäude entkoppelt, bietet einen relativ ruhigen Arbeitsplatz. Der Platz kann natürlich nicht ruhiger sein, als das Fundament selbst, wird aber von den Eigenschwingungen des Gebäudes entkoppelt. Im Allgemeinen ist diese Lösung teuer und nur begrenzt brauchbar.

2 Passive Isolation

Eine passive Isolation besteht aus einer Masse sitzend auf einem Federelement. Die Transmission als Funktion der Frequenz sieht so aus. Störend ist der starke resonante Aufbau.

Transmission

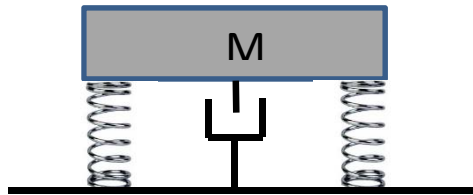


Für ein einfaches System bestehend aus einer Masse auf einem mit Luft gefüllten Balg (Tennisbälle, Basketbälle, usw.) liegt diese Frequenz typisch im Bereich von 15 Hz. So werden die vertikalen Bodenschwingungen stark aufgebaut. Die tiefen Torsionsschwingungen werden überhaupt nicht gedämpft.

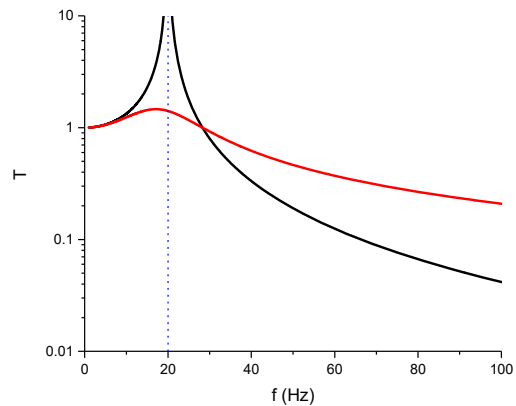
Mit grossen kommerziellen Luftsäulen kommt die Resonanzfrequenz bis 2 oder 3 Hz herunter. Das erlaubt eine gute Isolation für die vertikalen Bodenschwingungen, baut aber die tiefen horizontalen

Schwingungen auf. Noch tiefere Resonanzfrequenzen sind zwar möglich, führen aber zu langen Beruhigungszeiten und werden unpraktisch.

Eine gewisse Verbesserung kann über die Dämpfung erreicht werden. Eine höhere Dämpfung reduziert zwar den resonanten Aufbau, reduziert aber zugleich die Isolation bei höheren Frequenzen.

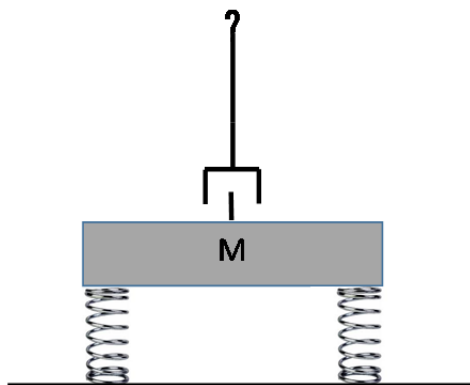


$$T = \left| \frac{1 + i\Gamma\omega}{1 + i\Gamma\omega - \frac{M}{\lambda}\omega^2} \right|$$



3 Aktive Isolation

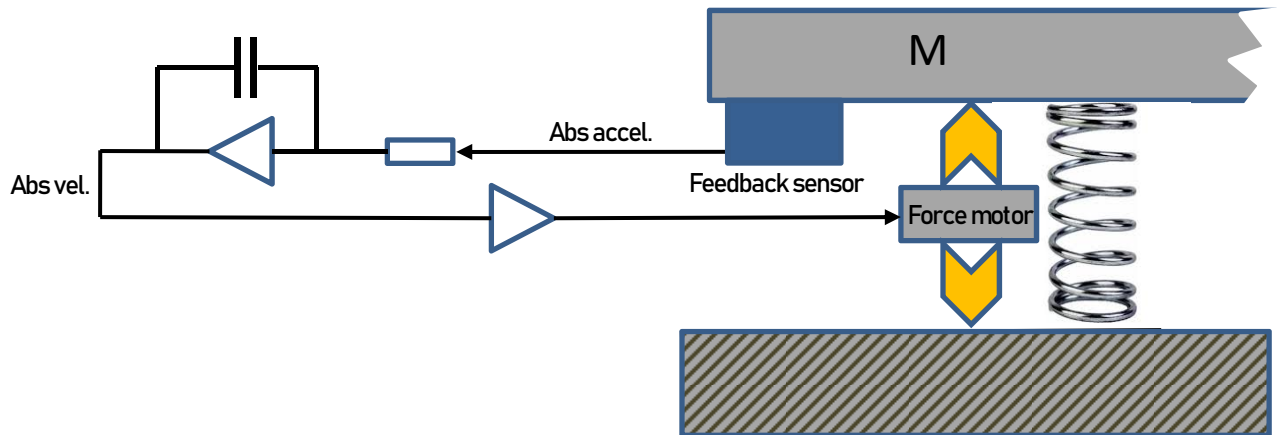
Das Grundproblem mit Passivisolation liegt bei der Art der Dämpfung. Die Dämpfung, ob viskös oder mit Wirbelstrom, ist proportional zur relativen Geschwindigkeit zwischen Boden und Last. Je mehr Dämpfung desto stärker ist die Last an den Boden gekoppelt, mit entsprechend weniger Isolation. Gerade hier ist der wichtige Unterschied zwischen Aktiv- und Passiv-Isolation. Bei Aktiv-Isolation wird die absolute Geschwindigkeit der Last gemessen und in einem Rückkopplungskreis als Dämpfung eingesetzt.



$$T = \left| \frac{1}{1 + i\Gamma\omega - \frac{M}{\lambda}\omega^2} \right|$$

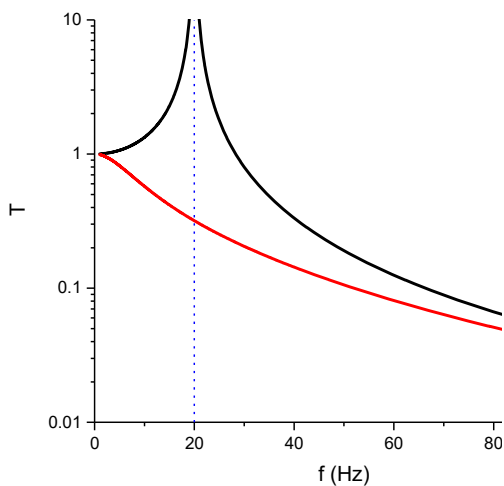
Die Transmission sieht jetzt anders aus. Da die Dämpfung nur in den Nenner erscheint, kann sie in Prinzip unbegrenzt sein. Die Dämpfung findet gegenüber ein „Inertial Plane“ statt. Diese Konfiguration ist auch als „Sky Hook“ bekannt.

Aktives System mit Feedback



Active Kurve

Wie aus den Kurven zu sehen ist, wird die Resonanz durch die Rückkopplung mehrfach



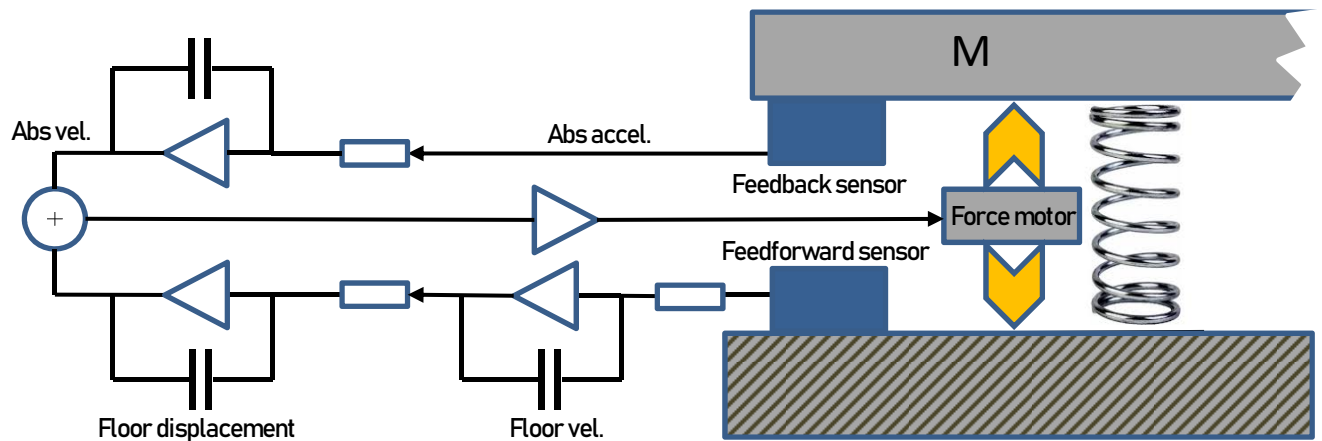
übergedämpft. Die aktiv gedämpfte Transmission bleibt bei allen Frequenzen unter der ungedämpften Kurve. Die Transmission hat keine Resonanz und zeigt schon bei tiefen Frequenzen Isolation.

Ein weiteres Merkmal von aktiver Isolation – das System isoliert nicht nur gegen Bodenschwingungen, sondern auch gegen Kräfte, die direkt in die Last einwirken.

Aktive Isolation mit Feed Forward

Mit einem Feed Forward System misst man die Bodenschwingungen direkt und schickt ein Signal an die Motoren, um diese Bewegungen vor zu kompensieren. Die Bodenschwingungen werden subtrahiert, im Gegensatz zu einem Feedback System, wo die Schwingungen gemessen an der Last um einen Faktor dividiert werden.

Mit Feed Forward wird die Güte der Resonanz nicht reduziert. Feed Forward kann also höchstens als Zusatz in einem Feedback System eingesetzt.



In der Skizze sieht man wie ein einfaches aktives System aufgebaut wird. Die Last wird auf Federn aus Stahl oder Gummi getragen. In der oberen Ebene, direkt unter der Last sind Beschleunigungssensoren eingebaut. Die messen direkt die absoluten Beschleunigungen in der Last. Die Beschleunigungssignale werden integriert und bilden dann die absoluten Geschwindigkeitssignale, die für die Dämpfung benötigt sind. Diese Signale werden an Kraftmotoren geführt. Die Kraftmotoren agieren parallel zu den Stützfedern. Wird der Boden bewegt, werden über die Kraftmotoren die Federn gedehnt oder komprimiert, sodass die Last an der gleichen Stelle bleibt.

In der Skizze ist ein Feed Forward Kreis auch gezeigt. Der Sensor am Boden misst die Bodenbeschleunigung. Dieses Signal wird zweimal integriert, um die Bodenbewegungen zu messen. Das Signal wird dann direkt an den Force Motor geführt. So werden die Bodenbewegungen direkt subtrahiert bevor diese die Last erreichen kann. Es soll betont werden, dass Feed Forward alleine nicht dämpfen kann. Aber in Kombination mit Feedback zusätzliche Isolation bringen kann.

Eine Last hat sechs verschiedene Freiheitsgrade – drei Translationen und drei Rotationen. Um all diese Freiheitsgrade zu kompensieren braucht man mindestens sechs Korrekturachsen.

Um eine Idee von der Grösse der Kräfte und Bewegungsamplituden zu bekommen, nehmen wir als Beispiel ein System für maximal 400 kg Last. Die Stützfedern sollen steif sein. Bei einer Federkonstante von 400 N/mm wäre die Resonanzfrequenz etwa 5 Hz unter Vollast. Mit einer maximalen Kraft von 8N in einer Richtung könnte eine Bewegung von 20 Mikrometer kompensiert werden. Die Gebäudeschwingungsamplituden sind typisch in Mikrometer Bereich.

Es mag überraschend klingen, dass eine 400 kg Masse mit nur ein paar Newton Kraft isoliert werden kann. Die Masse bleibt jedoch in Ruhe – nur die Federkräfte werden korrigiert. Da die

Federkonstante unabhängig von der Last ist, ist die Isolation unabhängig von der Last. Die Isolation beginnt bei etwa einem Herz und ab 10 Hz erreicht typisch ein Faktor 100.

Zusammenfassung

Gebäudeschwingungen begrenzen die Leistung von hochauflösenden Messinstrumenten. Verschiedene Lösungen, um die Instrumente von den Gebäudeschwingungen zu entkoppeln, wurden diskutiert.

Säulen direkt am Fundament gebaut, und vom Gebäude entkoppelt, können Hilfe bringen, sind aber teuer und können die Schwingungen im Fundament selbst nicht eliminieren.

Passive Isolationssysteme verstärken zum Teil die tiefen Frequenzen, können aber die hohen Frequenzen stark reduzieren.

Aktive Isolationssysteme mit Feed Forward und Feedback Kreisen geben bei weitem die beste Isolation. Wegen des starken Feedbacks sind die Systeme steif und erholen sich schnell nach Überlasten. Aktive Systeme dürfen gestapelt werden, um die Isolation zu erhöhen - doppelter Preis, hundertfache Isolation!