

# Nachträgliche Schwingungs- isolierung von Gebäuden

PD. Dr.-Ing. habil. Kay Hock-Berghaus, Wuppertal

Sich verändernde Randbedingungen aus Straßen- und Schienenverkehr, Nachbarbebauung oder Nutzungsänderungen können dazu führen, dass Gebäude Körperschall- oder Erschütterungsimmissionen ausgesetzt werden, welche ihre Gebrauchstauglichkeit stark einschränken.

Neben der Möglichkeit der direkten Reduktion an der Emissionsquelle und/oder dem Aufbau einer dämmenden Barriere wird folgend ein Verfahren zur nachträglichen Schwingungsisolierung von Gebäuden oder Gebäudeteilen vorgestellt, welches mit geringen Eingriffen in die vorhandene Bausubstanz eine sehr hohe Isolierung gegen Körper- und Erschütterungsschall erzeugt. Weiterhin kann das Verfahren derart modifiziert werden, dass es zur nachträglichen Erdbebensicherung bestehender Gebäude eingesetzt werden kann.

## Aufgabenstellung

Inbesondere in den Ballungszentren haben sich in den letzten Jahr-

zehnten erhebliche Strukturänderungen hinsichtlich der Raumplanung und -nutzung ergeben. So haben Straßenverkehrsbelastungen vielerorts stark zugenommen, es wurden schwerere Fahrzeuge eingesetzt und neue U-Bahn Strecken wurden aufgeföhren. Auf der anderen Seite sind die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit der Gebäude auf Grund verfeinerter Technik in vielen Bereichen gestiegen. Speziell für Gebäude mit hochwertiger Nutzung, wie z. B. Krankenhäuser, Konzertsäle, Tonstudios, Chipfabriken, Rechenzentren, Hotels o. a., können sich hieraus Probleme hinsichtlich eingeleiteter Schwingungsimmissionen ergeben.

Sowohl bei Erschütterungen als auch bei Körperschall handelt es sich um Schwingungen im niederfrequenten Bereich. Unterschieden wird zwischen den Begriffen hinsichtlich der Wahrnehmung durch den Menschen. Erschütterungen sind spürbare Schwingungen, Körperschall nennt man Schwingungen, welche durch sekundär abgestrahlten Luftschall hörbar sind.

Sind die Emissionsquellen lokalisierbar und fassbar, wie etwa bei Maschinenfundamenten, wird eine direkte Eindämmung der Schwingungen am Ort der Entstehung die kostengünstigste und effektivste Lösung

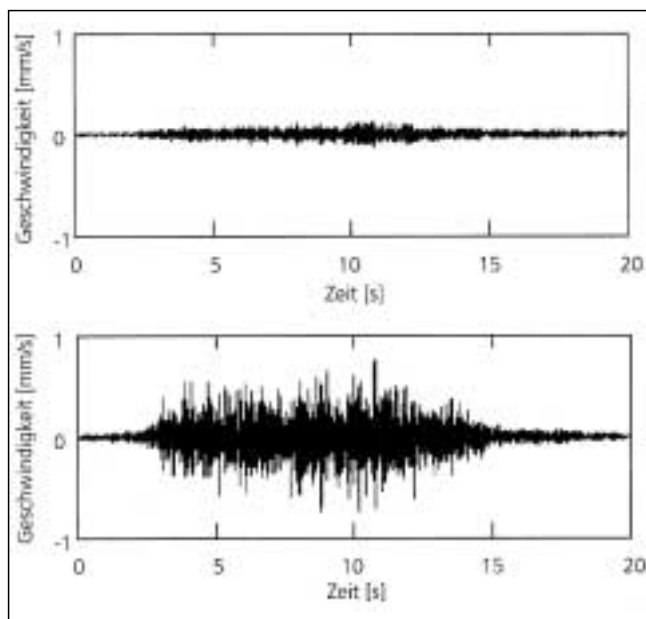
darstellen. Dieses gilt vor allem, wenn solche Anlagen neu errichtet werden. Vielfach ist der Emissionsort jedoch großflächig bzw. linienförmig und seit längerem existent, wie etwa bei Straßen- und Schienenwegen, so dass Maßnahmen an der Quelle mit erheblichem Aufwand verbunden wären. Steht zwischen großflächiger Emissionsquelle und beeinträchtigtem Gebäude ausreichend Raum zur Verfügung, kann eine Lösung mittels einer körperschall-dämpfenden Barriere, wie z. B. eine Einphasendichtwand mit dauerhaft „weicher“ Füllung o. ä., angestrebt werden. Hierbei handelt es sich allerdings bereits um Maßnahmen mit erheblichen geometrischen Abmessungen und damit einhergehenden hohen Kosten. Weiterhin ergibt sich hierbei oft die Problematik des Bauens auf fremden Grund, so dass ggf. Eigentumsaspekte maßgeblich werden.

Sind die genannten Maßnahmen nicht realisierbar, bleibt letztendlich die passive nachträgliche Schwingungsisolierung der betroffenen Gebäude oder Gebäudeteile. Sind nur einzelne Gebäudeteile zu isolieren, wie z. B. ein Tonstudio, ein Operationssaal o. ä., kann eine so genannte Raum-in-Raum-Lösung angemessen sein. Hierbei wird innerhalb eines bestehenden Raumes ein körperschall-isolierter zweiter Innenraum hergestellt, der i. d. R. durch elastische Elemente, u. U. kombiniert mit viskosen Dämpfern vom übrigen Gebäude komplett abgetrennt wird. Insbesondere eine zu geringe verbleibende Nutzhöhe dieser Innenräume schränkt die Umsetzung dieser Maßnahme möglicherweise ein. Bleibt als technische Lösung nur die Isolierung des gesamten Gebäudes oder ergibt sich aus



1 Kombiniertes Feder-Dämpfer-Element

der Nutzungsanforderung die Zielsetzung der Isolierung des gesamten Gebäudes, so muss das komplette Bauwerk vom umgebenden Erdreich in geeigneter Weise getrennt werden. Vorrangig ist hierbei zunächst die Isolierung in vertikaler Richtung durchzuführen, da i.d.R. der überwiegende Anteil der Körperschallmissionen auf diesem Wege eingeleitet wird. Die ggf. erforderliche Isolierung der Kellerwände in horizontaler Richtung hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab und muss im Einzelfall überprüft werden. Ggf. ist sie durch außen liegende Dämmplatten bereits vorhanden. Aus techni-



2 Schwingungsmessergebnisse oberhalb (oben) und unterhalb (unten) eines eingebauten Federelementes (Abbildungen 1 und 2: Gerb GmbH)

scher Sicht stellt die Isolierung dieser horizontalen Flächen normalerweise keine große Herausforderung dar.

Steht die nachträgliche Erdbebensicherung eines Gebäudes im Vordergrund, ist die Trennung vom Baugrund insbesondere gegen horizontale Verschiebungen anzustreben. Je nach Magnitude der erwarteten Erdbebenbelastung kann dieses allein mittels der vorhandenen horizontalen Federsteifigkeit der Elemente erreicht werden. Bei großen Amplituden im Dezimeterbereich ist die Kombination der beschriebenen Elemente mit zusätzlichen Gleitlagern sinnvoll.



3 Kopfkonstruktion eines Segmentpfahles



4 Pfahlsegmente mit Nut und Feder

## Grundkonzeption der nachträglichen Gebäudeisolierung

Zielsetzung ist es, das gesamte bestehende Gebäude vom schwingenden Baugrund abzukoppeln. Hierzu wird das Gebäude auf elastische Stahlfeder-elemente, ggf. in Kombination mit Dämpfungselementen, gestellt, welche sowohl zwecks Reduzierung der störenden Einwirkungen während der Umbauzeit als auch gegen langfristige äußere Störungen zweckmäßig unterhalb der bestehenden Fundamente eingesetzt werden. Es erfolgt somit nur ein kleiner temporärer Eingriff in die Bausubstanz, was insbesondere z. B. bei erhaltenswerten historischen Gebäuden äußerst vorteilhaft ist. Als besonders geeignete Auflagerkonstruktion für die Stahlfeder-elemente dienen von den gleichen Montagebaugruben aus vorgepresste Segmentpfähle. Diese gewährleisten die Abtragung der Gebäudelasten in den tragfähigen Baugrund. Die Lagerung auf den Stahl-

feder-elementen ist tief abgestimmt bei Systemeigenfrequenzen von 3 bis 5 Hz, so dass nicht nur die Übertragung von Körperschall wirkungsvoll verhindert wird, sondern auch typische Erschütterungen mit Frequenzen zwischen 10 und 20 Hz, wie sie in der Umgebung von Schienenverkehr häufig gemessen werden, erheblich reduziert werden. Es wird damit, abhängig von den Systemeigenschaften von Bauwerk und Baugrund, eine Reduktion der Schwingungen in der Größenordnung von 80 bis 90 % gegenüber dem ursprünglichen Zustand erreicht.

Das Segmentpfahlssystem besteht aus 0,5 m langen Fertigteilesegmenten, welche mittels eines Nut- und Federsystems zu einem beliebig langen Pfahl unterhalb der bestehenden Fundamente verlängert werden können. Nachdem alle Pfähle bis auf den ausreichend tragfähigen Baugrund vorgepresst wurden, wird das Gebäude über hydraulische Pressen auf den Pfahlköpfe um einen endlichen Betrag angehoben (2 bis 3 cm), um die

komplette Trennung vom Baugrund herzustellen. Im Pfahlkopfbereich werden anschließend die Stahlfeder-elemente eingesetzt und unter Gebrauchslast festgelegt, sodass sich planmäßig später keine elastischen Deformationen einstellen und sämtliche Dehnwege, sowohl bei den Pfählen als auch bei den Stahlfeder-elementen, vorweggenommen werden. Zwischenliegende Sohlplattenbereiche sind im Einzelfall entweder a priori freitragend oder werden vom Gebäude getrennt und/oder mit Dämmung unterfüttert. Damit die Schwingungsisolierung voll wirksam wird, muss bei der Planung und Ausführung darauf geachtet werden, dass keine Körperschallbrücken zwischen Baugrund und Gebäude verbleiben.

## Gebäudeisolierung mit Stahlfeder-elementen

Die Stahlfeder-elemente bilden das konstruktive Hauptelement der nachträglichen Gebäudeisolierung. Sie bestehen aus Schraubendruckfedern

aus Stahl, die durch Stahlplatten oder Schalenkonstruktionen zu Elementeneinheiten unterschiedlicher Größe und Tragfähigkeit zusammengefasst werden (Bild 1). Zur Gebäudeisolierung können sie mit viskosen Dämpfern in den Elementeneinheiten zusammengefasst werden, so dass die elastische Gebäudelagerung durch eine geschwindigkeitsabhängige Dämpfung unterstützt wird und auch diffuse und stoßartige dynamische Einwirkungen erheblich reduziert werden. Zusätzliche Einrichtungen am Stahlfederelement, wie z.B. die Einbettung der Federn in eine dauerelastische Masse, verhindern das Auftreten ausgeprägter Einbrüche der Dämmwirkung im Bereich der Stahlfedereigenfrequenzen. Elastische Zwischenscheiben bewirken eine weitere Reduzierung der Übertragung hochfrequenter Schwingungen. Die für diesen speziellen Einsatzzweck geeigneten Lager-Stahlfederelemente sind für Lasten zwischen 70 bis 700 kN ausgelegt. Höhere Werte sind im Bedarfsfall durchaus realisierbar. Das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Federsteifigkeit liegt bei ca. 1, sodass horizontale Lasten ohne zusätzliche horizontale Gebäudesicherungen übertragen werden können. Gleichzeitig wird die Erdbbensicherheit deutlich erhöht, wobei jedoch im Einzelfall das Ausreichen allein dieser Isolierung zu prüfen bleibt. Die Stahlfederelemente benötigen keine Wartung. Sie sind mit speziellem Langzeitkorrosionsschutz versehen, welcher praktisch eine unbegrenzte Lebensdauer gewährleistet. Bild 2 zeigt Messergebnisse oberhalb und unterhalb der Stahlfederelemente und verdeutlicht beispielhaft die erreichte Schwingungsreduktion.

### Das Segmentpfahlsystem

Nur in Ausnahmefällen wird der Baugrund direkt unterhalb der Stahlfederelemente ausreichend tragfähig sein, um die hohen Einzellasten über ein Betonpolster aufzunehmen. In der Regel muss unterhalb der Stahlfederelemente somit ein ausreichend tragfähiger Auflagerpunkt geschaffen werden. Hierzu wird zunächst ein ca. 1 m breiter Stichgraben unter dem

Fundament freigelegt (i. d. R. von innen aus dem Keller, möglicherweise auch von außen). Direkt unterhalb des Fundamentbalkens wird ein Lastverteilungsbalken eingebracht, dessen Größe sich nach der Höhe der zulässigen Mauerwerks- oder Betonpressung richtet. Auf den Boden des Stichgrabens wird direkt unterhalb des Fundamentes das erste Pfahlsegment angesetzt und mittels einer hydraulischen Presse zwischen Lastverteiler und Pfahlsegment in den Boden gepresst (Bild 3). Ist das erste Element im Baugrund verschwunden, wird die Presse zwischenzeitlich durch Stahlspindeln ersetzt und mittels eines Nut- und Federsystems das nächste Element aufgesetzt (Bild 4). Der Vorgang wird solange fortgesetzt, bis ausreichend tragfähiger Baugrund erreicht wird. Die Größe der Vorpreslast ergibt sich aus der aus dem Bauwerk rechnerisch ermittelten Belastung, multipliziert mit einem Sicherheitsbeiwert (DIN 1054). Damit wird zum einen die äußere Tragfähigkeit mit ausreichendem Sicherheitsabstand gewährleistet und zum anderen finden Setzungen infolge von Laständerungen folgend auf einem Wiederbelastungsast statt, sodass sie sehr stark reduziert werden. Serienmäßig stehen Segmente mit Gebrauchslasten zwischen 200 bis 1000 kN zur

Verfügung, so dass eine Anpassung an die lokal unterschiedlichen Bauwerkslasten ähnlich wie bei den Stahlfederelementen möglich ist.

Als Nebeneffekt der geplanten Bauwerksisolierung erhält das Bauwerk damit eine komplett sanierte Gründung und spätere Setzungsercheinungen in relevanter Größenordnung sind nicht mehr zu erwarten.

Wenn alle Pfähle vorgepresst sind, folgt die planmäßige Trennung von Bauwerk und Baugrund durch eine Bauwerkshebung. Hierzu werden zunächst die Stahlfederelemente unter dem Lastverteiler positioniert und mit einem Schutzrahmen umgeben. Folgend werden alle Pressen gleichzeitig über ein gekoppeltes Hydrauliksystem versorgt (Bild 5) und es wird mittels einer computergestützten Synchronhubanlage die Bauwerkshebung durchgeführt. Eine Horizontierung des Bauwerks kann, falls erforderlich, ebenfalls eingestellt werden. Ist der Hebevorgang abgeschlossen, werden die Pressen in ausgefahrenem Zustand endgültig durch um sie herum zu setzende schlupffreie Stahlspindeln ersetzt (Bild 6), womit Pfahl und Stahlfederelement nach Herstellung bereits unter Gebrauchslast stehen und sich keine weiteren planmäßigen Verformungen einstellen.



5 Hydraulikverteilerstation mit Anschlussleitungen für eine Bauwerkshebung (Fotos 3 bis 5: Erka Pfahl GmbH)

Abschließend werden die Pfahlköpfe bewehrt und ausbetoniert. Die Spindeln verbleiben im Betonkopf, sodass auch keine weiteren Einflüsse infolge Schwindens des Betons zu erwarten sind.

## Systemanpassung

Da alle Systemdaten bestimmbar, kontrollierbar und zeitlich konstant sind, ist der Erfolg der Maßnahme planbar und berechenbar. Das Erregerfrequenzspektrum wird vorab am bestehenden Gebäude mittels Schwingungsmessung bestimmt. Hierdurch werden alle dynamischen Einflüsse, auch aus dem aufgehenden Bauwerk, mit erfasst. Die Bedeutung dieses Punktes kann kaum ausreichend gewürdigt werden, besteht doch gerade bei Neubauten an dieser Stelle ein erhebliches Informationsdefizit. Die Wahl der Systemeigenfrequenz der Stahlfederelemente ergibt sich aus den Messwerten der Schwingungsmessung. Erfahrungswerte zeigen, dass die Abweichung der tatsächlichen von der angestrebten Systemeigenfrequenz üblicherweise kleiner als 10 % ist. Lage, Art, Anzahl und Position der Stahlfederelemente und Segmentpfähle ergeben sich aus der vorhandenen oder aufzustellenden statischen Bauwerksberechnung, der dynamischen Belastung durch das Erregerfrequenzspektrum sowie den zur Verfügung stehenden Auflagerpunkten. Die Trennung in ständige Lasten und wirklich vorhandene Verkehrslastanteile wird zur optimalen Anpassung der dynamischen Abstimmung der Stahlfederelemente erforderlich. Angaben zum anstehenden Baugrund erleichtern das Vorschätzen der wahrscheinlichen Pfahllängen der Segmentpfähle. Durch die Möglichkeit der nahezu unbegrenzten Verlängerung erreichen die Pfähle i. d. R. immer tragfähigen Untergrund.

Bei der Einstellung des Systems auf ausreichende Erdbbensicherheit ist die Erfassung der Randbedingungen aufwändiger. Die Schwierigkeiten beginnen bei der Festlegung der Einwirkung. Für die Örtlichkeit ist ein Vergleichsspektrum zu definieren, das



6 Feder-Pfahl-Kombination  
(Foto: Gerb GmbH, Erka Pfahl GmbH)

Art, Dauer und Amplitude der Erdbebenbelastung zutreffend beschreibt. Sinnvollerweise werden hier Spektren von gemessenen Belastungen unter vergleichbaren Randbedingungen herangezogen. Weiterhin wird die Schwingungsmessung schwierig, da die Einwirkung trivialerweise nicht ständig vorhanden ist. Der analytische Aufwand zur Ermittlung einer Systemantwort steigt dadurch erheblich an.

## Systemeigenschaften

Durch die Kombination der Segmentpfähle mit den Stahlfederelementen kann eine nachträgliche vollständige Schwingungsisolierung des gesamten Bauwerkes erfolgen. Vorteile des Systems sind unter anderem

- zielgenaue Planbarkeit der Maßnahme auf Grund bekannter Einflussfaktoren
- Umbau auf eigenem Grundstück unterhalb der Fundamente (keine Eigentumskonflikte)
- geringer Platzbedarf und geringe Immissionen während der Umbauarbeiten, nur kleine Geräte, Bauteile und Maschinen
- witterungsunabhängiger Baufortschritt
- kein maßgeblicher Eingriff in die vorhandene Bausubstanz (z. B. Denk-

malschutzanforderungen können uneingeschränkt erfüllt werden)

- Erfolg der Maßnahme ist definitiv voraussehbar und anhand von Schwingungsmessungen oberhalb und unterhalb der Stahlfederelemente nachträglich messbar
- ausgezeichnete Schwingungsreduktion von 80 % bis in günstigen Fällen 95 %
- kein Raumverlust nach Fertigstellung der Schwingungsisolierung (im Gegensatz zur Raum-in-Raum-Lösung)
- neue funktionsgetestete Gründung des Bauwerks implizit.

All diese Aspekte zeichnen das vorgestellte Verfahren als anspruchsvolle und erfolgreiche Maßnahme zur nachträglichen Schwingungsisolierung von Gebäuden aus. Unsicherheiten verschiedener Einflüsse werden nahezu vollständig ausgeschlossen. Zur Beseitigung des Einflusses schädlicher oder störender Körperschall- und Erschütterungsimmissionen steht damit ein klares und eindeutiges Sanierungskonzept zur Verfügung.

Eine Erweiterung des Verfahrens zur nachträglichen Erdbbensicherung bestehender Gebäude ist ohne weiteres möglich. Hier bietet es sich auf Grund der geringen Einwirkungen auf das Gebäude insbesondere zur Sicherung wertvoller historischer Gebäude an.

## Literatur:

- [1] Kebe, H.-W.; Kammerer, H.: „Gebäude: Schutz mit Stahlfederelementen vor Erschütterungen und sekundärem Luftschall“, Der Bauingenieur 75, Heft 6, 2000, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [2] Hock-Berghaus, K.; de Jong, H.: „Deformationsarme Unterfangungen“, TIS 9/1999, Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh.
- [3] Scherer, J.R.: „Schwingungsisoliertes Gebäude unter Erdbebenbelastung, Der Bauingenieur 61, 1986, Springer Verlag.
- [4] Stühler, W.; Reinsch, K.-H.: „Erschütterungs- und Körperschallschutz von Gebäuden mittels Stahlfeder und viskosen Dämpfern“, Der Bauingenieur 67, 1992, Springer Verlag.
- [5] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung „Stahlfederelemente für elastische Gebäudelagerung zum Erschütterungs- und Körperschallschutz“, Deutsches Institut für Bautechnik, 7/2000, Berlin.