

Seismische Systemidentifikation urbaner Gründerzeithäuser auf Basis messtechnischer Untersuchungen

Günther Achs & Helmut Wenzel

VCE Vienna Consulting Engineers, Wien, Österreich

Christoph Adam

*Institut für Grundlagen der Bauingenieurwissenschaften, Universität Innsbruck,
Österreich*

ZUSAMMENFASSUNG: In dieser Arbeit wird das im Rahmen des Forschungsprojekts SEISMID entwickelte wirtschaftliche Verfahren zur Beurteilung der seismischen Standsicherheit urbaner Gründerzeithäuser vorgestellt. Von besonderem Interesse sind bei diesen Gebäudetypen die möglichen Auswirkungen von Adaptierungs- und Zubaumaßnahmen, wie zum Beispiel der Ausbau ungenützter Dachgeschoße. Die Methode basiert auf einer Kombination von messtechnischen Untersuchungen an den Bauwerken und anschließenden Berechnungen an einfachen mechanischen Modellen, deren Parameter mit den Ergebnissen aus den Messungen kalibriert werden. Damit kann sehr rasch und effizient die Auswirkung struktureller Maßnahmen an Gründerzeithäusern auf deren Erdbebensicherheit abgeschätzt werden.

1. EINLEITUNG

In vielen Großstädten Mitteleuropas kam es in den vergangenen Jahrzehnten aufgrund stadtplanerischer Aspekte zu einer Dezentralisierung der Wohngebiete. Demzufolge dominieren in den Stadtzentren Wohngebäude, die größtenteils zu Beginn des vorigen Jahrhunderts errichtet worden sind. In Wien sind dies in etwa ein Drittel aller bestehenden Wohnhäuser (32.000 Gebäude), errichtet zwischen den Jahren 1850 bis 1918 in der so genannten Gründerzeit. Trotz allem ist die Nachfrage nach Wohnungen im Stadtzentrum sehr hoch. Um zusätzlichen Wohnraum zu schaffen, sind deshalb in den letzten zwanzig Jahren vermehrt ungenutzte Dachböden dieser Wohnhäuser adaptiert worden.

Der Um- und Ausbau von Dachgeschoßen in Altbauten wird in nationalen Richtlinien auf Länderebene geregelt (MA 37, 2006). Für den Nachweis des ausreichenden Erdbebenwiderstands bestehender Gebäude wird dabei zwischen den beiden folgenden Fällen unterschieden:

- Vereinfachter Nachweis bei einer zusätzlichen Gewichtskraft kleiner als $7,2 \text{ kN/m}^2$.
- Differenzierter Nachweis bei einer zusätzlichen Gewichtskraft größer als $7,2 \text{ kN/m}^2$.

Der vereinfachte Nachweis ist beinahe ausschließlich bei Dachgeschoßausbauten in Leichtbauweise anwendbar. In der überwiegenden Anzahl der Ausbauten beträgt die zusätzliche seismisch mitwirkende Gewichtskraft mehr als $7,2 \text{ kN/m}^2$, wodurch komplexe numerische Analysen für den Nachweis des Kräfteabtrags im Erdbebenfall erforderlich sind. Diese sind mit hohen Unsicherheiten behaftet und haben durch den hohen rechnerischen Aufwand zu unwirtschaftlichen Bauvorhaben und in weiterer Folge zu

einem starken Rückgang der Dachgeschoßausbauten geführt. Deshalb besteht großer Bedarf an wirtschaftlichen und zugleich genauen Nachweismethoden für die seismische Widerstandsfähigkeit bestehender Gebäude.

2. METHODIK

Die meisten Berechnungsverfahren des Erdbebeningenieurwesens basieren auf den grundlegenden dynamischen Parametern (Eigenfrequenzen, Eigenformen) des untersuchten Bauwerks. Für bestehende Gebäude, deren Materialeigenschaften und Tragverhalten nur unzulänglich bekannt sind, können diese Strukturparameter vorzugsweise durch messtechnische Analysen gewonnen werden.

2.1 SYSTEMIDENTIFIKATION

Die Identifikation der dynamischen Gebäudeparameter erfolgt durch die Analyse der gemessenen Schwingungsantwort zufolge transients (impulsartiger) und/oder ambienter Anregung. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen erfolgt meist aus der ambienten Strukturantwort, wobei die Schwingungsamplituden im Vergleich zur transienten Anregung klein sind. Die verrauschten Signale liefern jedoch häufig Störfrequenzen, welche die Gebäudeeigenfrequenzen überlagern.

Durch die Verwendung einfacher Analysekonzepte aus der statistischen Signalverarbeitung (z.B. optimale Filterung, Glätten bzw. Fensterung des Signals) kann die Auswertung ambienter Signale wesentlich verbessert werden (Safak, 2007). In der vorliegenden Untersuchung werden mit Hilfe der Autokorrelationsfunktion die störenden Anteile des Signals minimiert ohne die Information über die Struktur zu beeinflussen. Die Autokorrelation wird dabei durch die folgende Funktion beschrieben (Safak, 2007):

$$AKF(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) \cdot x(t - \tau) \quad (1)$$

Für stationäre Signale hat Safak (2007) gezeigt, dass durch die Autokorrelationsfunktion der Frequenzinhalt der Messsignale nicht verändert wird. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird von der aufgezeichneten ambienten Schwingungsantwort die Autokorrelationsfunktion bestimmt. Durch Transformation der Autokorrelationsfunktion in den Frequenzbereich treten die Eigenfrequenzen der Struktur wesentlich deutlicher hervor. Wird die Autokorrelation der zuvor bestimmten Autokorrelationsfunktion ermittelt und dieses Signal in den Frequenzbereich transformiert, kann die Qualität des Spektrums weiter gesteigert werden.

Je nach vorherrschender Anregung der Struktur werden die zugehörigen Eigenformen im Zeitbereich (impulsartige Anregung) bzw. im Frequenzbereich (ambiente Anregung) bestimmt (Achs et al., 2007).

Wenn das Gebäude durch einen Impulshammer transient erregt wird, wird die aufgezeichnete Beschleunigung des darauf einsetzenden Ausschwingvorganges für die Bestimmung der Eigenformen herangezogen. Da sich die n ten modalen Komponenten der freien ungedämpften Verschiebungs- und Beschleunigungsantwort \vec{w}_n und $\ddot{\vec{w}}_n$ nur durch das Quadrat der n ten Eigenkreisfrequenz ω_n^2 unterscheiden (Chopra, 2006),

$$\vec{w}_n = \vec{\phi}_n \cos \omega_n t, \quad \ddot{\vec{w}}_n = -\omega_n^2 \vec{\phi}_n \cos \omega_n t \quad (2)$$

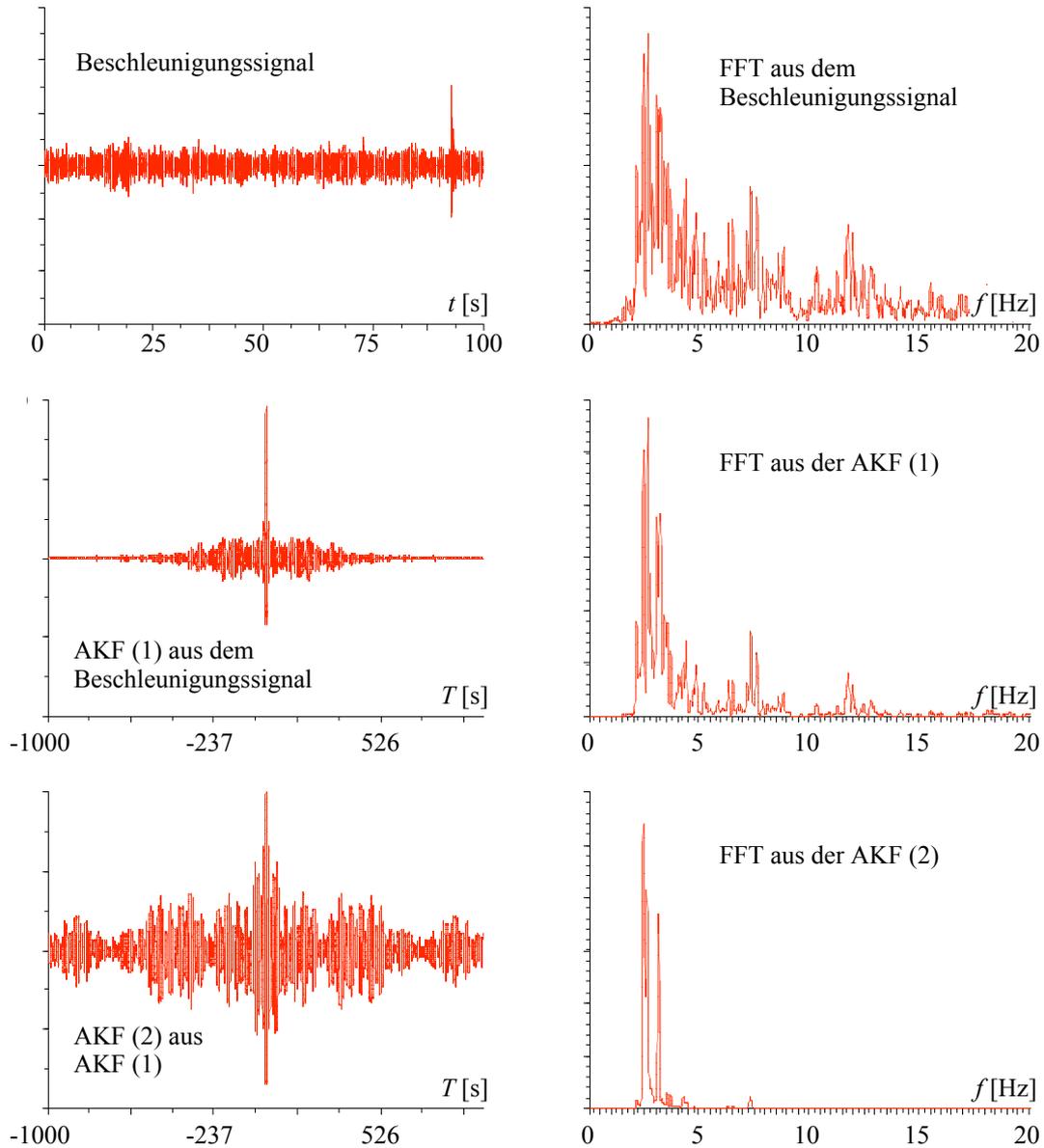


Abbildung 1: Abschätzung der Systemeigenfrequenzen aus gemessenen Beschleunigungssignalen durch wiederholte Bildung der Autokorrelationsfunktion und deren Transformation in den Frequenzbereich (FFT).

und die maximale Amplitude einer Eigenschwingungsform $\vec{\phi}_n$ beliebig festgelegt werden kann, werden die Eigenschwingungsformen direkt aus den Beschleunigungssignalen gewonnen. Dabei wird die Schwingungsantwort durch Filterung modal zerlegt. Das Rohsignal wird mittels Bandpassfilterung 4. Ordnung bearbeitet, wobei die untere und obere Grenzfrequenz $f_{u,l}$ des Frequenzbands gemäß der folgenden Beziehung gewählt wird:

$$f_{u,l} = f_n \pm \frac{f_n}{100} \quad (2)$$

Die modalen Zeitsignale werden geschößweise übereinander gelegt, die Amplituden zu einem gewissen Zeitpunkt abgelesen (siehe Abbildung 2) und deren Werte zu einem Vektor zusammengefasst, der die i te Abschätzung der n ten Eigenschwingungsform $\vec{\phi}_{n,i}$

darstellt. Durch Mittelung solcher zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelten Vektoren erhält man schließlich die n te Eigenform:

$$\vec{\phi}_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \vec{\phi}_{n,i} \quad (3)$$

Bei überwiegend ambienter Anregung der Struktur werden die Eigenformen bevorzugt im Frequenzbereich bestimmt. Dazu ist es zusätzlich erforderlich, die jeweilige Phase des Beschleunigungssignals in jedem Geschoß zu ermitteln. Um die Genauigkeit dieser Methode zu erhöhen, sollte die Auswertung von jedem aufgezeichneten Signal erfolgen und durch Mittelung dieser Werte die Eigenformen bestimmt werden (Wenzel und Pichler, 2005).

In Abbildung 2 ist beispielhaft die Bestimmung der Grundschwingungsform $\vec{\phi}_1$ eines untersuchten Gebäudes mit 5 Obergeschoßen gemäß den beiden beschriebenen Methoden dargestellt.

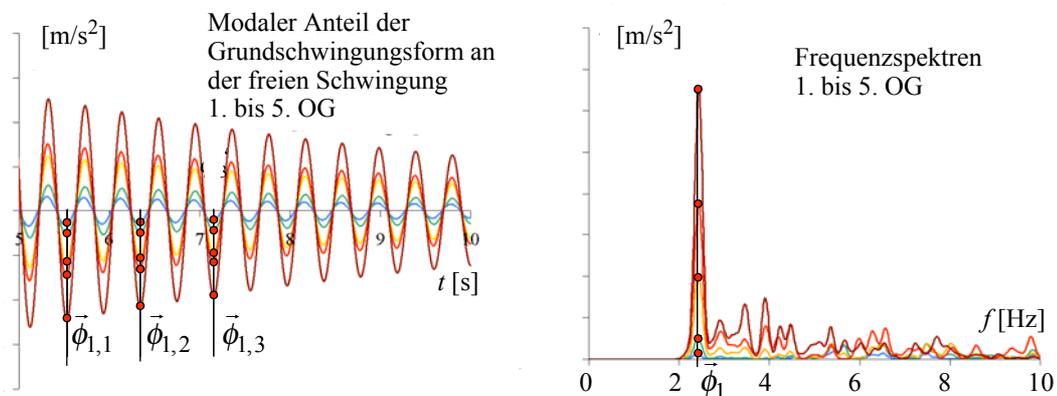


Abbildung 2: Bestimmung der Grundschwingungsform im Zeit- und Frequenzbereich aus der Beschleunigungsantwort zufolge transientser und ambienter Anregung.

2.2 GEBÄUDESTEIFIGKEIT

Mit Hilfe der so bestimmten Eigenfrequenzen und Eigenformen und den Bewegungsgleichungen eines Mehrmassenschwingers wird im nächsten Schritt die Verteilung der Steifigkeit über die Gebäudehöhe abgeschätzt. Dazu wird vorab die Gebäudemasse geschoßweise zu Punktmassen zusammengefasst und einem vereinfachten mechanischen Modell zugewiesen. Mit Hilfe eines so genannten Finite Elemente-Update-Verfahrens wird dieses mechanische Modell den dynamischen Parametern angepasst und so die Steifigkeit identifiziert.

Im Allgemeinen wird bei diesem Verfahren zwischen direkten und indirekten Methoden unterschieden (Friswell und Mottershead, 1995). Direkte Methoden haben den Vorteil, dass keine Iteration erforderlich ist und die gemessenen Daten exakt abgebildet werden. Allerdings wird der berechnete Parameter durch die Qualität der Messergebnisse stark beeinflusst. Indirekte Methoden dagegen basieren auf einer nichtlinearen Penalty-Funktion, die durch mehrere Schritte minimiert wird, wodurch längere Berechnungszeiten entstehen.

Im Zuge dieser Untersuchung wurde die indirekte Methode VCEUPDATE (Mordini et al., 2007) verwendet, die auf einem iterativen Rechenalgorithmus, programmiert in den Finite Elemente-Programmen Scilab und OpenSees, beruht.

2.3 ABSCHÄTZUNG DER KOLLAPSKAPAZITÄT

Die Standsicherheit des Gebäudes unter Erdbebenbeanspruchung wird mit Hilfe der Kapazitätsspektrum-Methode abgeschätzt (ATC-40, 1996). Dabei wird mit dem vereinfachten mechanischen Modell eine Pushover-Analyse durchgeführt, aus deren Ergebnissen die Kapazitätskurve des Gebäudes ermittelt wird. Es ist geplant, im Rahmen des SEISMID Projekts das nichtlineare globale Tragverhalten von Gründerzeitbauten durch einen Großversuch an einem Abrissobjekt zu bestimmen. Mit den so gewonnenen Daten soll das tatsächliche nichtlineare Verhalten und das zugehörige mechanische Modell kalibriert werden. Zur Ergänzung werden mit Mauerwerksproben, die Gründerzeitbauten entnommen werden, sowohl statische als auch dynamische Laborversuche durchgeführt. Bei der Anwendung der Kapazitätsspektrum-Methode wird der Schnittpunkt (der sogenannte Verhaltenspunkt bzw. „performance point“) eines geeigneten Entwurfspektrums mit der Kapazitätskurve iterativ ermittelt. Dieser Schnittpunkt stellt ein Maß für die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes unter einer definierten seismischen Beanspruchung dar (ATC-40, 1996).

3. ANWENDUNG

Um die Veränderungen der dynamischen Parameter von Gründerzeithäusern durch den Zu- und Umbau von ungenutzten Dachgeschoßen zu verifizieren, sind am Objekt Riglergasse 10 aus der Gründerzeit, welches in Abbildung 3 dargestellt ist, messtechnische Untersuchungen durchgeführt worden. In diesem Wohnhaus wurde im Zuge eines Umbaus in den Jahren 2006 bis 2007 das bis dahin ungenutzte Dachgeschoß ausgebaut und durch ein zusätzliches Geschoß erweitert. In den darunter liegenden Geschoßen wurden mit Ausnahme des Einbaus eines Aufzugs im Stiegenhaus keine strukturellen Änderungen durchgeführt. Das Gebäude besitzt einen regelmäßigen Grund- und Aufriss, siehe Abbildung 3.

3.1 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG AM OBJEKT RIGLERGASSE 10

Die Messungen an diesem Wohngebäude wurden vor und nach dem Dachgeschoßausbau durchgeführt. Dazu wurden dreidimensionale Beschleunigungsaufnehmer in horizontaler und vertikaler Ebene positioniert, um aus den Signalen in weiterer Folge die Eigenfrequenzen und Eigenformen in den jeweiligen Richtungen identifizieren zu können. Die Verteilung der Sensoren wird in Abbildung 4 gezeigt. Da eine reproduzierbare transiente Anregung dieses Gebäudes aufwändig und mit großen Unsicherheiten behaftet ist, basiert die Systemidentifikation in diesem Fall auf der Analyse der ambienten Schwingungsantwort.

In der Abbildung 5 sind Frequenzspektren dargestellt, bei denen die zugrunde liegenden ambienten Signale im Dachgeschoß aufgezeichnet worden sind. Die Frequenzspektren beruhen auf Messungen vor und nach dem Dachbodenausbau. Man erkennt, dass durch die zusätzliche Masse zufolge des Ausbaus die Grundfrequenz in beiden Gebäuderichtungen etwas kleiner ist als vor dem Umbau.

3.2 NUMERISCHE MODELLIERUNG DES OBJEKTS RIGLERGASSE 10

Parallel zu den messtechnischen Untersuchungen wurden auch numerische Analysen durchgeführt. Dazu wurde das Gebäude mit Hilfe des Finite Elemente-Programms ANSYS modelliert. Die Struktur des numerischen Modells besteht überwiegend aus

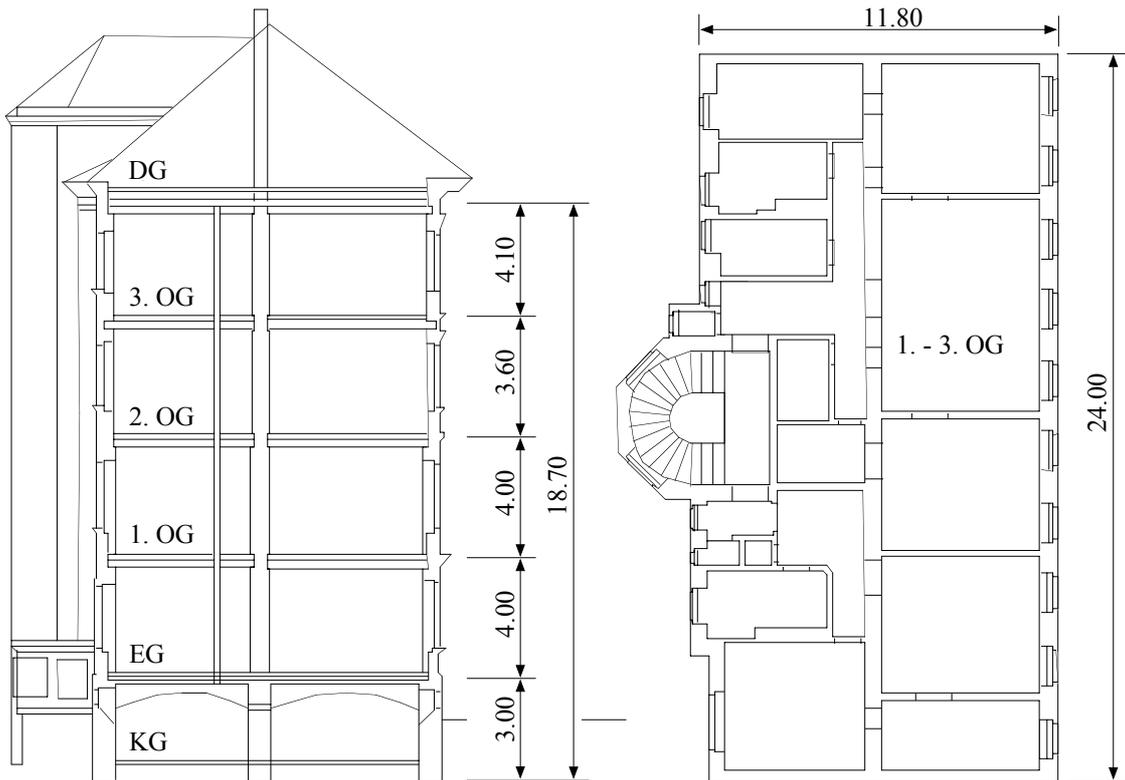


Abbildung 3: Grund- und Aufriss des Objekts Riglergasse 10.

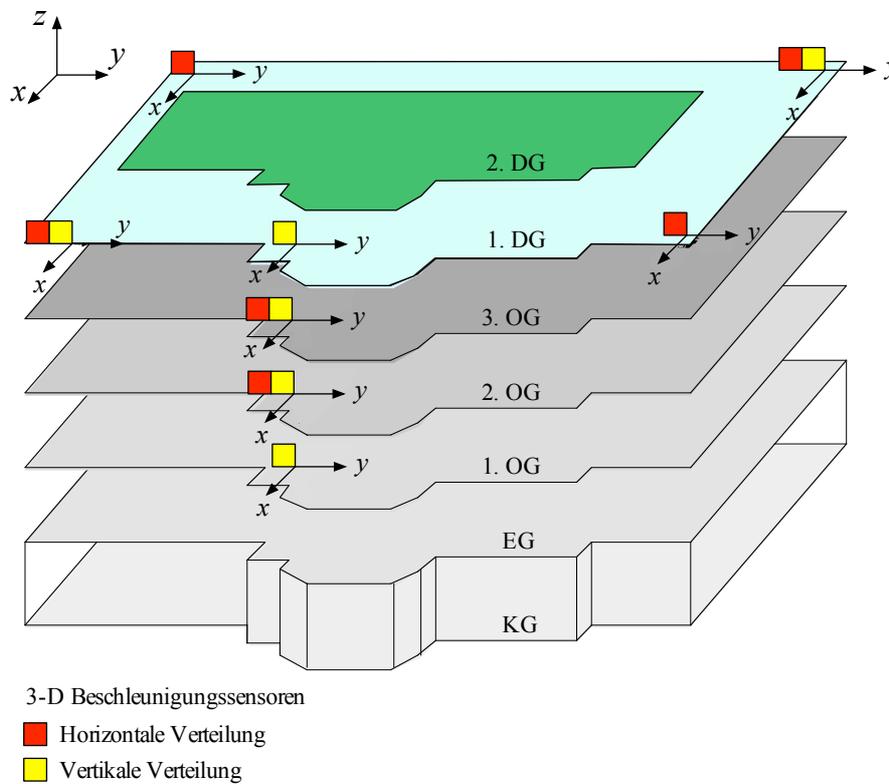


Abbildung 4: Verteilung der dreidimensionalen Beschleunigungsaufnehmer in vertikaler und horizontaler Ebene im Objekt Riglergasse 10.

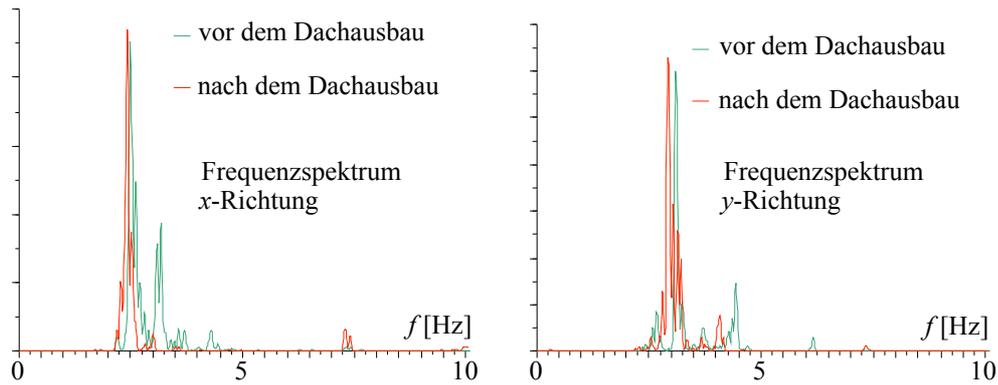


Abbildung 5: Frequenzspektren für das Objekt Riglergasse 10 vor und nach dem Dachbodenausbau für beide Gebäuderichtungen.

Schalen- (shell93) und Balkenelementen (beam4). In Abbildung 6 ist die numerisch ermittelte erste Eigenform des Modells dargestellt.

Um die numerischen Ergebnisse vor und nach dem Ausbau mit jenen aus der messtechnischen Untersuchung vergleichen zu können, wurden die zusätzlichen Lasten des Dachgeschosses abgeschätzt. Aus den vorhandenen Planunterlagen wurde eine zusätzliche vertikale Last von $6,8 \text{ kN/m}^2$ errechnet. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der Masse um ca. 200 Tonnen. Diese zusätzliche Masse wurde in einem zweiten Modell berücksichtigt, ohne jedoch die Steifigkeit des ursprünglichen Modells zu erhöhen. Nach der Modellierung des Gebäudes wurden die vorab abgeschätzten Materialparameter mit Hilfe des Finite Elemente-Update-Verfahrens optimiert. Der daraus errechnete linear elastische Elastizitätsmodul E und die Massendichte ρ des Mauerwerks sind in Tabelle 1 dargestellt. Als Eingangswerte für die Optimierung der Materialparameter dienen die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen.

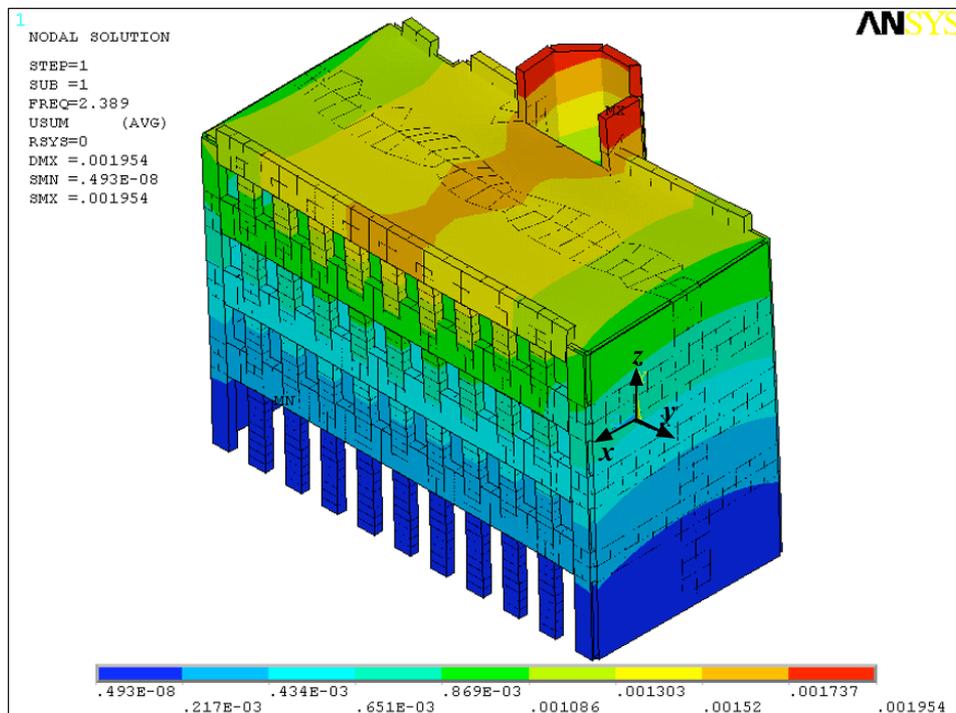


Abbildung 6: Numerisches Modell des Objekts Riglergasse 10. Grundswingungsform in x -Richtung.

3.3 ERGEBNISSE UND GEGENÜBERSTELLUNG

Aus den Resultaten gemäß Tabelle 2 ist eine gute Korrelation zwischen numerischer Simulation und messtechnischer Untersuchung erkennbar. Die Ergebnisse aus den messtechnischen Untersuchungen nach dem Dachgeschoßausbau weichen im Rahmen der Messungenauigkeiten nur geringfügig von jenen vor dem Ausbau ab. Aus der Gegenüberstellung der Ergebnisse vor und nach dem Dachgeschoßausbau ist erkennbar, dass der Einfluss der Massenerhöhung nur in der numerischen Modellierung eine erkennbare Reduktion der Eigenfrequenzen bewirkt.

Um die Auswirkung der dynamischen Parameter auf die Steifigkeit der Struktur abzuschätzen, wurde gemäß Abbildung 7 das Gebäude als auskragender Balken mit geschoßweise angebrachten Punktmassen modelliert. Mit dem Finite Elemente-Update-Verfahren wurden die äquivalenten Trägheitsmomente des Modells berechnet. Dazu wurden der Elastizitätsmodul ($E = 2141 \text{ N/mm}^2$) und die aus der messtechnischen Untersuchung ermittelten Biegeeigenfrequenzen als Eingangswert verwendet. Für die Trägheitsmomente des Ersatzträgers in x - und in y -Richtung ergeben sich in etwa konstante Werte für alle Geschoße: $I_x = 839 \text{ m}^4$ vor dem Ausbau und $I_x = 869 \text{ m}^4$ nach dem Ausbau; $I_y = 213 \text{ m}^4$ vor dem Ausbau und $I_y = 227 \text{ m}^4$ nach dem Ausbau.

Auch bei diesem Modell mit optimierter Steifigkeit führt die Erhöhung der Masse zu einer Verkleinerung der Eigenfrequenzen. Bei den ermittelten Eigenfrequenzen auf Grundlage der messtechnischen Untersuchungen vor und nach dem Umbau konnte dieser Effekt aus den folgenden Gründen nicht festgestellt werden:

- Die numerische Modellierung des Zustands nach dem Dachausbau erfolgte durch die Erhöhung der Masse im Dachgeschoß. Die Steifigkeit des Tragwerks wurde dabei nicht verändert.
- Gemäß vorliegender Ausführungsplanung wurden mehrere steifigkeitserhöhende Maßnahmen gesetzt (z.B. Holz-Beton-Verbunddecke über 3. OG, Stahlrahmen, Aufzugseinbau), die bei der numerischen Modellierung nicht berücksichtigt wurden.

	Eingangswert (abgeschätzt)	Endwert (nach Optimierung)
Elastizitätsmodul E	2500 N/mm ²	2141 N/mm ²
Massendichte ρ	1500 kg/m ³	1642 kg/m ³

Tabelle 1: Optimierte Materialparameter.

	1. EF (x -Richtung)	2. EF (Torsion)	3. EF (y -Richtung)
Messtechnische Untersuchung vor dem Umbau (Juli 2006)	2,55 Hz	3,13 Hz	4,35 Hz
Messtechnische Untersuchung nach dem Umbau (Juli 2007)	2,40 Hz	2,95 Hz	4,05 Hz
Numerische Simulation vor dem Umbau	2,57 Hz	3,13 Hz	4,34 Hz
Numerische Simulation nach dem Umbau	2,30 Hz	2,73 Hz	3,86 Hz

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Eigenfrequenzen des Objekts Riglergasse 10 aus der messtechnischen Untersuchung und der numerischen Analyse.

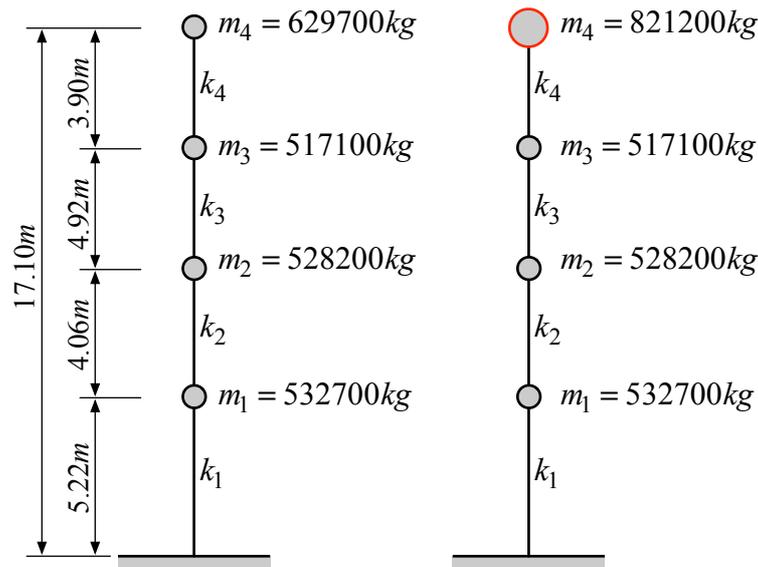


Abbildung 7: Modellierung des Objekts Riglergasse 10 als diskreter Mehrmassenschwinger vor und nach dem Dachausbau.

4. WEITERE ENTWICKLUNGEN

Im Rahmen des Forschungsprojekt SEISMID soll die vorgestellte Methode wie folgt verbessert und weiterentwickelt werden:

- Da im Allgemeinen Gründerzeithäuser aufgrund ihrer Bauweise und ihrer Planung kein ausgeprägtes globales Schwingungsverhalten zeigen, ist die Identifikation der Eigenfrequenzen und Eigenformen oftmals schwierig. Mit Hilfe alternativer Methoden sollen die dynamischen Parameter eindeutig identifiziert werden.
- Bei den messtechnischen Aufzeichnungen müssen insbesondere bei der ambienten Methode störende Signale (verursacht durch Bewohner, Geräte wie Waschmaschinen, etc.) vermieden werden, da sonst die Ergebnisse verfälscht werden.
- Bei kleinen Gebäuden ist die Analyse der Eigenformen aus transientser bzw. impulsartiger Anregung sehr zuverlässig, da die freie Schwingung im gesamten Gebäude aufgezeichnet werden kann. Für größere Gebäudeabmessungen mit abwechselnden Sensoraufstellungen ist diese Methode nur dann vorteilhaft, wenn der eingebrachte Impuls mehrfach reproduziert werden kann (z.B. Impulshammer).
- Die Identifikation höherer Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen ist bei den vorliegenden Gebäuden meist schwierig. Dazu sollen in Zukunft alternative Anregungsarten, bzw. verbesserte Methoden zur Systemidentifikation verwendet werden. Durch die Bestimmung von mehreren Oberschwingungsformen kann die Zuverlässigkeit von Finite Elemente-Update-Verfahren gesteigert werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren ist das Interesse an der wirklichkeitsnahen seismischen Gebäudeklassifizierung enorm gestiegen. Der Anlass dazu ist vor allem die Verschärfung von Normen und Richtlinien, wovon insbesondere die Einschätzung des Widerstands gegen Erdbeben von urbanen historischen Wohnhäusern betroffen ist. Im Speziellen ist der Aus- und Umbau der ungenutzten Dachböden von Gründerzeithäusern neu geregelt worden, wodurch in Wien der Ausbau von Dachböden massiv zurückgegangen ist.

Aufgrund des enormen Potentials an ungenutzten Dachböden ist der Bedarf an realistischen ökonomischen Gebäudebeurteilungen bezüglich deren Erdbbensicherheit sehr hoch. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren soll einerseits durch die Kombination von messtechnischen Untersuchungen und vereinfachten numerischen Modellen die Zuverlässigkeit dieses Nachweises erhöhen. Andererseits soll es eine kostengünstige Alternative zu den aufwändigen numerischen Analysen mittels komplexen Finite Elemente-Modellen (mit fraglichen Materialeingangsparametern) bieten. Die bisher durchgeführten Untersuchungen belegen, dass die Auswirkungen des Dachausbaus auf die dynamischen Gebäudeparameter mit Hilfe von messtechnischen Methoden erfasst werden können. In weiteren Untersuchungen sollen vor allem die auftretenden Nichtlinearitäten unter Starkbebenereignissen mit Hilfe von Großversuchen abgeschätzt werden. Dazu soll ein Pushover-Versuch an einem Abbruchobjekt aus der Gründerzeit durchgeführt werden. Die daraus gewonnenen Daten sind wesentliche Eingangsparameter für die Entwicklung von Kapazitätskurven zur Abschätzung der Kollapskapazität von Gründerzeithäusern.

DANKSAGUNG

Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit Fördermitteln des Forschungsprojekts SEISMID, maßgeblich unterstützt durch das Zentrum für Innovation und Technologie ZIT, finanziert.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Achs, G., Wenzel, H., Adam, C., 2007. Seismic Hazard Analysis of historic residential buildings utilizing in-situ measurements. In: Proc. of the ECCOMAS Thematic Conference in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (M. Papadrakakis et al., eds), Paper No. 1122.
- ATC-40 (Applied Technology Council), 1996. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report No. SSC 96-01.
- Chopra, A., 2006. Dynamics of Structures, 3. Auflage. Prentice Hall.
- Friswell, M., Mottershead, J., 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Kluwer Academic.
- MA 37 (Magistratsabteilung 37), 2006. Merkblatt für die Verfasser der statischen Unterlagen über Vorgangsweise und Inhalt der statischen Vorbemessung und des Ingenieurbefundes bei Bauführungen gemäß § 60 Abs. 1 lit. a (Neu-, Zu- und Umbau), b (sonstige bauliche Anlagen) und c (Änderung und Instandsetzung von Gebäuden und baulichen Anlagen) BO.
- Mordini, A., Savov, K., Wenzel, H., 2007. Damage detection on stay cables using an open source-based framework for Finite Element Model Updating. Structural Health Monitoring, accepted for publication.
- OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation, <http://opensees.berkeley.edu>.
- Safak, E., 2007. New techniques to analyze ambient vibration data. In: Proc. of the ECCOMAS Thematic Conference in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (M. Papadrakakis et al., eds), Paper No. 1154.
- Scilab, A Free Scientific Software Package, <http://www.scilab.org>.
- Wenzel, H., Pichler, D., 2005. Ambient Vibration Monitoring. Wiley.