Eigenschwingungs-Messungen an Zivilschutzbauten. Teil 1: Messhypothesen und Interpretation

Autor(en): **Kessler, Erwin / Brauchli, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 39

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75535

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eigenschwingungs-Messungen an Zivilschutzbauten

Im Rahmen von Grundlagen-Studien über das Erschütterungsverhalten von Schutzbauten [1] wurde versucht, die Schwingungseigenschaften von bestehenden Anlagen zu messen. Im Teil 1 werden dazu theoretische Untersuchungen zur Messhypothese und Messdaten-Interpretation dargestellt. Teil 2 enthält einige praktische Hinweise über die Durchführung der Ausschwingversuche.

Teil 1. Messhypothesen und Interpretation

Von Erwin Kessler und Hans Brauchli, Zürich

Einleitung

Zivilschutzbauten müssen auf dynamische Belastungen aus *Waffenwirkungen* bemessen werden. Die *Einbauteile* (Schutzraum-Einrichtungen) müssen so konstruiert bzw. schockisoliert werden, dass sie durch die Schutzraumerschütterungen nicht beschädigt werden. Bei diesen Bemessungsproblemen spielen die Schwingungseigenschaften der Schutzbauten eine wichtige Rolle.

Für die Einbauteile sind Schwingungsfrequenzen der Bauwerksteile (Decken, Wände, Böden) bis etwa 200 Hz von Bedeutung. Das schliesst eine grosse Anzahl *Oberschwingungen* ein, welche analytisch oder numerisch nur mit grossem Aufwand und ungenau berechnet werden können. Besonders die *Bodeneinbettung* und Erdüberschüttung tragen zur rechnerischen Komplexität dieser Bauten bei (es werden hier speziell solche Schutzbauten gemäss den TWO-Vorschriften des Bundesamtes für Zivilschutz [2] betrachtet, die nicht unter Hochbauten liegen).

Da schon viele ähnliche Zivilschutzbauten bestehen, ist es naheliegend, typische Schwingungseigenschaften experimentell durch Schwingungsmessungen in situ zu ermitteln. Dabei interessiert vor allem die Schwingungs*dämpfung*, welche von der *Energieabstrahlung in den Boden* dominiert wird.

Schutzbauten werden so bemessen, dass sie unter Waffenwirkungen teilweise *inelastisch deformiert* werden. Dies beeinflusst wohl die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen, hingegen kaum die Energieabstrahlung in den Boden.

Eigenfrequenzdichte und Messbarkeit

Zur experimentellen Ermittlung der Schwingungseigenschaften von Strukturen hat sich - insbesondere im Maschinenbau - ein eigenes Fachgebiet entwickelt, das durch die Stichworte *Strukturidentifikation* oder (experimentelle) *Modalanalyse* gekennzeichnet wird:

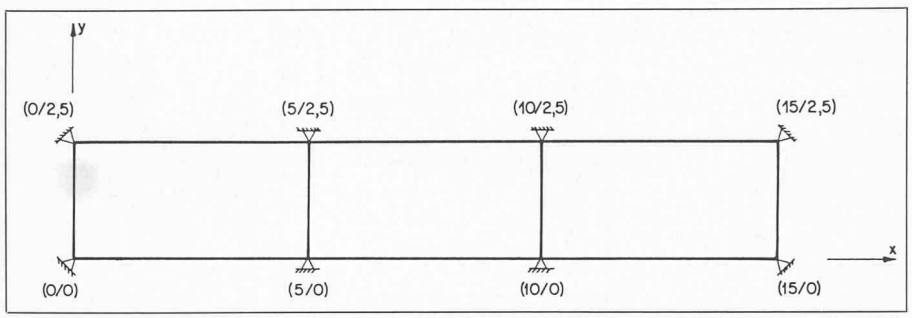
Die Schwingungsanregung erfolgt mit Vibratoren (harmonische oder stochastische Anregung) oder Stössen (Impulsbelastung). An verschiedenen Stellen der Struktur wird der Response (Systemantwort) mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen. Zur Bestimmung der Eigenschwingungen (Formen, Frequenzen, Dämpfung) aus diesen Messdaten sind komplizierte Methoden entwickelt worden. Elementar-mechanische Überlegungen genügen nur bei einfachen Schwingungssystemen, wo die einzelnen Resonanzen deutlich verschieden sind. Diese Schwierigkeit wird im folgenden am Beispiel von Schutzraumschwingungen illustriert. In Bild 1 ist ein ebener Rahmen (idealisierter Schutzraumquerschnitt) gezeigt. Greift man einen horizontalen Stab - nennen wir ihn S - zwischen zwei Knoten heraus (Bild 2), so hat dieser in unserem Fall im Bereich bis 300 Hz gerade 3 Eigenfrequenzen, die deutlich auseinanderliegen und sich experimentell leicht messen lassen.

Nun werden an diesem Stab weitere Stäbe angefügt, so dass der Rahmen gemäss Bild 1 entsteht. Dann wird ein Beobachter des Stabes S (der übrige Rahmen sei für ihn verdeckt) erstaunt feststellen, dass er nun plötzlich viel mehr Eigenschwingungen unterscheiden kann. Diese Eigenschwingungen sind mit dem an der ETH in Zürich entwickelten Programm *Flowers* [3] berechnet worden. Im Frequenzbereich bis 300 Hz, wo vorher 3 Eigenfrequenzen lagen, sind nun deren 19 zu finden, die natürlich entsprechend näher liegen: Mit zunehmender Grösse und Komplexität nimmt die *Eigenfrequenzdichte* zu (= Anzahl Eigenfrequenzen pro Frequenzband, hier also n = 19/300 Hz = 0,063 Hz^{-1}; beim einfachen Balken gemäss Bild 2: n = 3/300 Hz = 0,010 Hz^{-1}). Die Eigenfrequenzdichte nimmt noch weiter zu, wenn wir die dritte Dimension des Schutzraumes einbeziehen: Aus diesen Stäben werden dann Platten. Auch dieser Fall ist mit Flowers berechnet worden.

Bild 3 zeigt das dreidimensionale Schwingungssystem. Die Auflager repräsentieren die Bodeneinbettung natürlich schlecht. Hier ging es nicht um eine möglichst realistische Berechnung von Schutzraumschwingungen, sondern um prinzipielle Überlegungen zu deren Messbarkeit (Messhypothese). Aus Symmetriegründen konnte die Berechnung auf den gerasterten Bereich beschränkt werden. Dies gibt eine weitere Einsicht in die Eigenfrequenzverdichtung bei «Vergrösserung» einer Struktur: Das System hat drei Symmetrieebenen. Durch passende Wahl der Randbedingungen am gerasterten Oktanten (Bild 3) können alle Eigenschwingungen der ganzen Struktur berechnet werden. Dazu sind insgesamt 8 Berechnungen mit verschiedenen Randbedingungen nötig (8 Symmetrie-Klassen). Das heisst praktisch, dass sich durch Anhängen der symmetrischen Teile an den gerasterten Oktanten die Eigenfrequenzen rund *verachtfachen*.

Bild 4 zeigt die berechneten Frequenzresponse (frequency response, Frequenzgang) je für den einfachen Balken (Stab S) und den Rahmen sowie noch die Frequenzverteilung der dreidimensionalen Struktur. Man erkennt gut, wie *die einzelnen Resonanzhügel mit zunehmender Dämpfung* (ξ = Dämpfungsverhältnis, damping ratio) *und/oder zunehmender Eigenfrequenzdichte (modal density) ineinander zu fliessen beginnen*. Dementsprechend sind sie daraus - wenn solche Frequenzresponse gemessen werden - zunehmend schlechter bestimmbar.

Durch andere Messverfahren und Darstellungsformen wird diese Schwierigkeit grundsätzlich nicht behoben. Es gibt aber, wie schon erwähnt, spezielle Techniken, die in bestimmten Fällen die Unterscheidbarkeit verbessern. Diese verlangen jedoch einen grossen Mess- und Datenauswertungsaufwand, der bei Bauwerken schneller als bei Maschinenteilen rasch unsinnig hoch werden kann. Bauwerke benötigen sehr grosse Anregungskräfte und haben oft eine ungünstig starke Dämpfung. Bei den üblichen Schwingungsmessungen



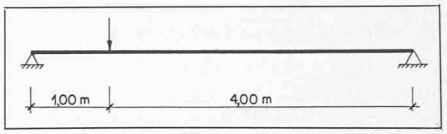


Bild 2 (oben). Isolierter Stab aus dem System gemäss Bild 1, mit Kraftangriffsstelle für die Frequenz-Response-Berechnung

Bild 1 (links). Idealisierter Querschnitt eines Schutzraumes

an Hochbauten zu Erdbebenzwecken genügen die untersten wenigen Frequenzen, die messtechnisch noch leicht unterscheidbar sind.

Messungen an Zivilschutzbauten

Bei erdeingeschütteten Schutzbauten wurde aufgrund verschiedener Abschätzungen ein Dämpfungsverhältnis von mindestens $\xi = 0{,}2$ angenommen. Gestützt auf die Überlegungen im vorhergehenden Abschnitt, wurde damit der Aufwand zur Messung der Eigenfrequenzen und Schwingungsformen (bis mindestens 200 Hz) als zu hoch beurteilt, insbesondere auch im Hinblick auf den nicht erfassbaren Einfluss inelastischer Verformungen unter Waffenwirkungen.

Um wenigstens die Dämpfungsannahmen zu überprüfen, wurden einfache *Ausschwingversuche* durchgeführt. Bild 5 zeigt typische, gemessene Beschleunigungs-Zeitfunktionen im Innern des Schutzraumes.

Nur bei wenigen Messstellen an Zwischenwänden dominierte eine einzige Eigenfrequenz genügend stark, so dass das logarithmische Dekrement durch Messen der Amplituden abgeschätzt werden kann. Sonst sind die Responsekurven meistens Überlagerungen aus vielen Eigenschwingungen, aus denen die Eigenfrequenzen und Dämpfungen nicht ermittelt werden können. Fourier-Analysen lieferten wie erwartet keine brauchbaren Resultate.

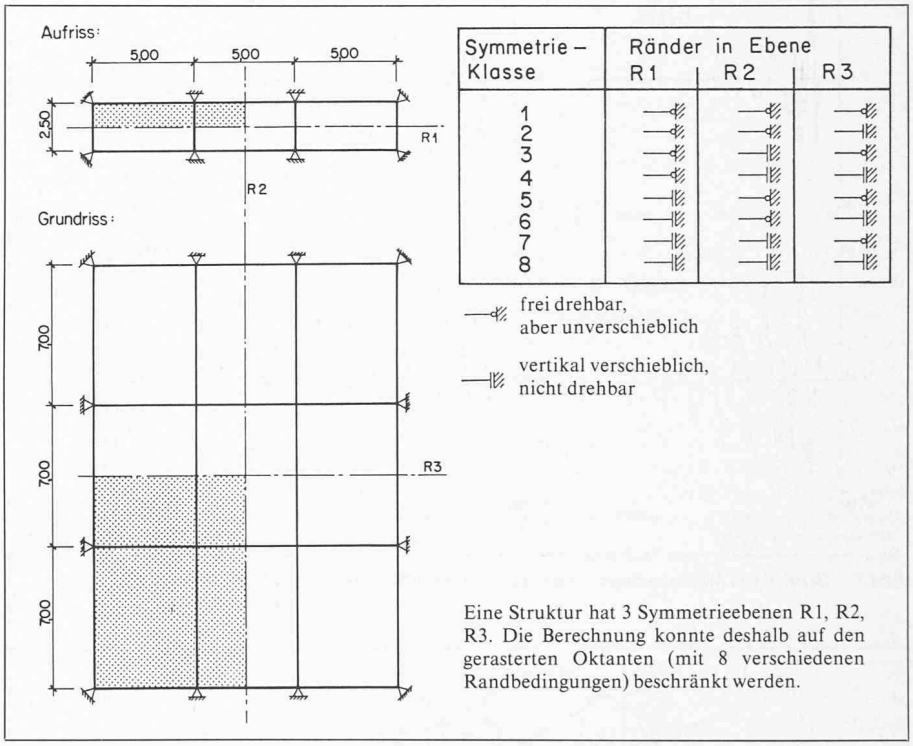


Bild 3. Dreidimensionale idealisierte Struktur eines Schutzraumes analog zu Bild 1

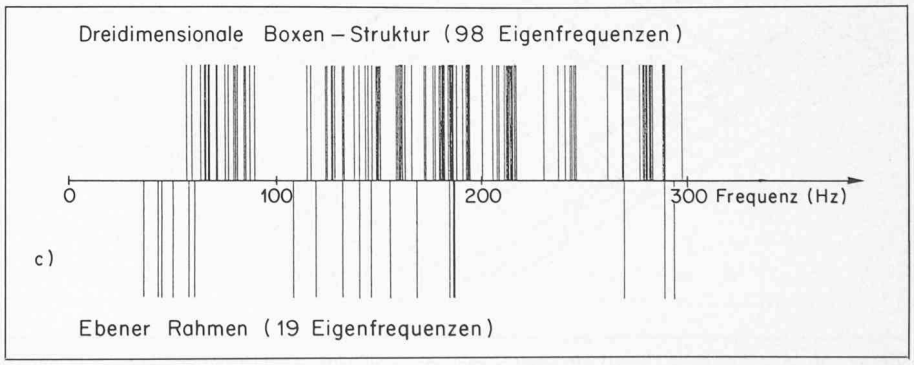


Bild 4c. Vergleich der Eigenfrequenzverteilung der Strukturen gemäss Bild 1 und 3

Bild 4a. Frequenz-Response des einfachen Balkens gemäss Bild 2

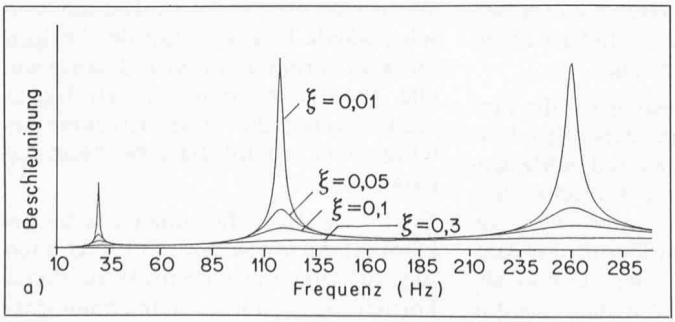
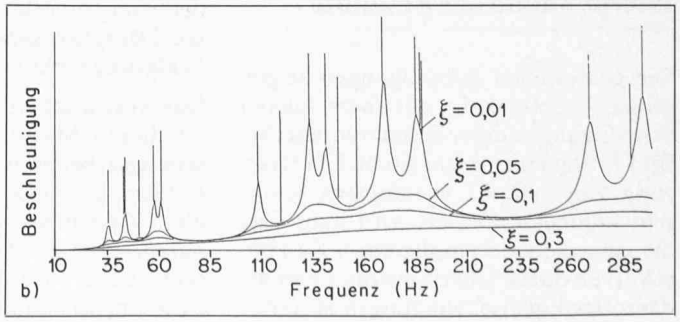


Bild 4b. Frequenz-Response des ebenen Rahmens gemäss Bild 1



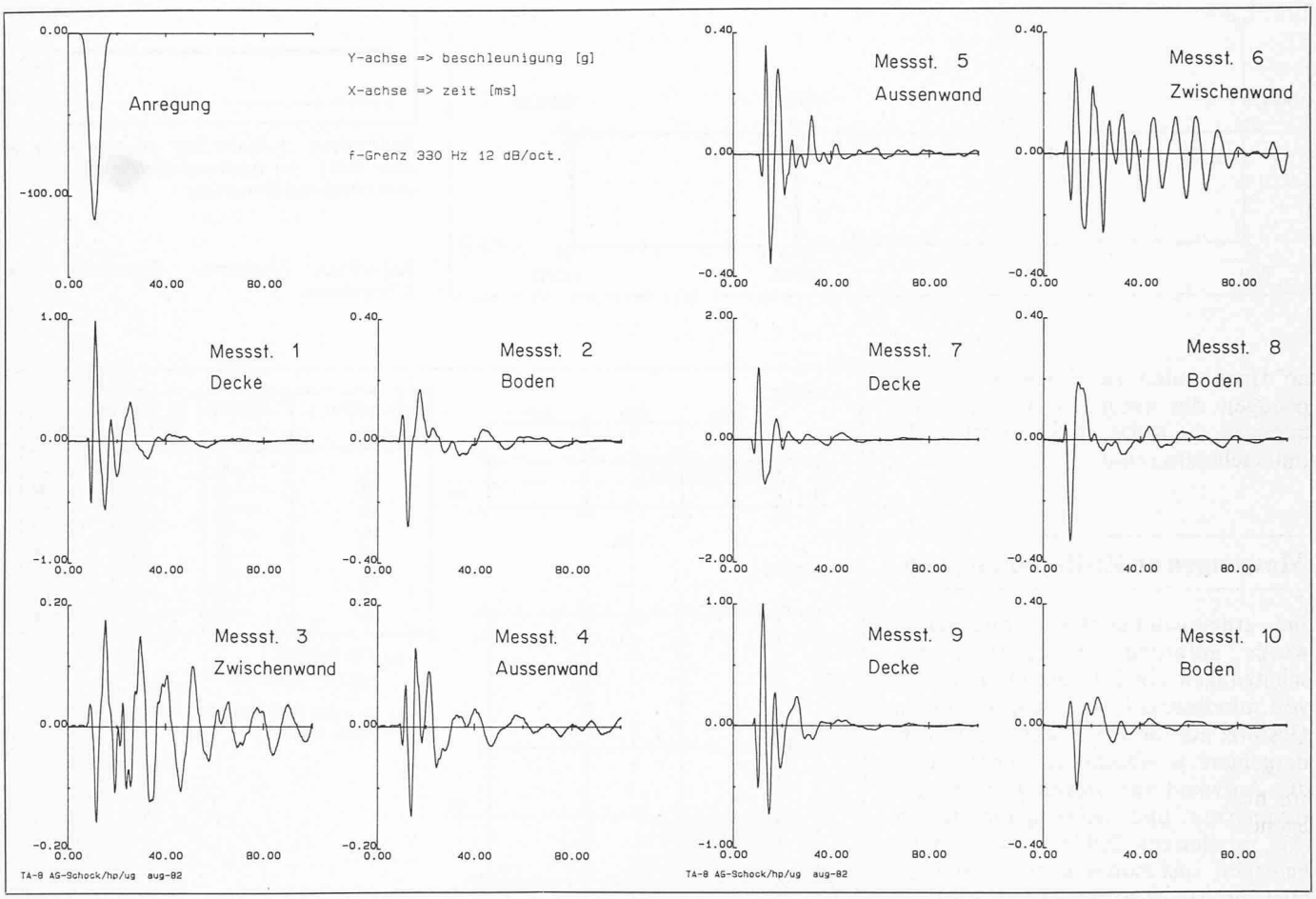


Bild 5. Beispiel von Messresultaten (Schwingungsmessungen San Hi Buchholz)

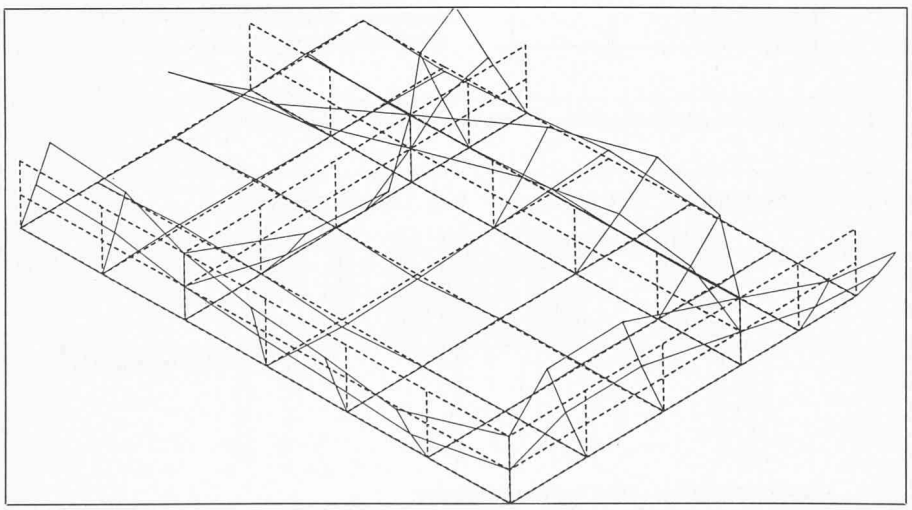


Bild 6. Mit dem Programm Flowers berechnete Eigenschwingungsform des gerasterten Oktanten aus Bild 3. Bei dieser Schwingungsform treten in den Wänden starke, in der Decke (bzw. im Boden) schwache Auslenkungen auf

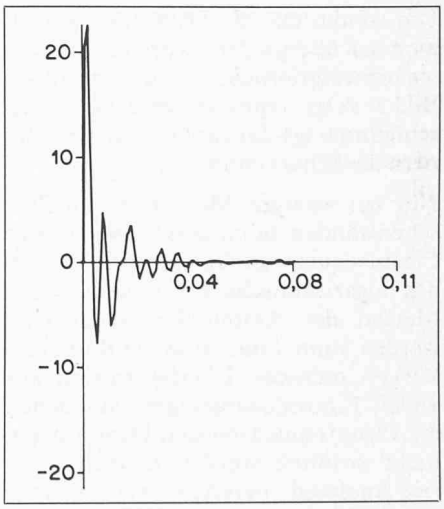


Bild 7. Rechnerische Überlagerung von 62 gedämpften Sinusschwingungen mit stochastischer Anfangsamplitude

Interpretation der Resultate

Die gemessenen Schwingungen zeigen grosse Ähnlichkeit mit berechneten Schwingungen einer Schutzraumdecke. Bild 7 zeigt eine rechnerische Überlagerung von z. B. 62 gedämpften Sinusschwingungen. Daraus wird klar, dass die gemessenen komplizierten Responsekurven durch Überlagerung vieler gedämpfter Eigenschwingungen zustande kommen. Kompliziertere Strukturmodelle mit Nichtlinearitäten oder speziellen Dämpfungsgesetzen sind zu deren Erklärung nicht notwendig.

Das wesentlichste Resultat für die hinter diesen Messungen stehenden Forschungsarbeiten ist die aus den Messresultaten hervorgehende Tatsache, dass die *Zwischenwände schwächer gedämpft* sind als die erdberührten Aussenbauteile. Infolge der Energieabstrahlung in den Boden scheint dies auf den ersten Blick logisch, ja sogar trivial. Wenn man aber bedenkt, dass die Zwischenwände biegesteif mit der übrigen Struktur verbunden sind und damit wie alle anderen bauteile an den Eigenschwingungen der Gesamtstruktur beteiligt sind, scheint diese Beobachtung paradox.

Es gibt jedoch hiefür eine einfache Erklärung: An Zwischenwänden können Eigenschwingungen dominieren, deren Formen sich dadurch auszeichnen, dass

ihre Auslenkungen an den Wänden gross, an Boden- und Deckenplatten aber klein sind. Tatsächlich gibt es solche Eigenformen, wie Bild 6 zeigt. Dadurch treten diese Schwingungen an der Decke und am Boden kaum in Erscheinung und verlieren dort infolge der Erdberührung auch nur wenig Energie (die Aussenwände haben einen relativ geringen Anteil an der gesamten erdberührten Fläche). Sie schwingen deshalb langsamer aus, was an den Zwischenwänden auffällig in Erscheinung tritt. Dieser Effekt wurde *erst aufgrund der Messresultate entdeckt*. Neben der Bestimmung von Schwingungsparametern können Messungen auf diese Weise auch zu qualitativen Einsichten und Verbesserungen des Rechenmodelles führen.

Adressen der Verfasser: *E. Kessler*, Bauing. SIA, Ingenieurbureau Heierli AG, Postfach 248, 8033 Zürich; Prof. *Dr. H. Brauchli*, Institut für Mechanik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Literaturverzeichnis

[1] *Kessler, E.*: «Stochastische Simulation von Schutzraumerschütterungen infolge Nuklearexplosionen am Beispiel von 3-bar-Zivilschutzbauten, AC-Laboratorium Spiez» (in Vorbereitung).

[2] Bundesamt für Zivilschutz: Technische Weisungen für die Schutzanlagen der Organisation und des Sanitätsdienstes (TWO 1977). Bern, 1977

[3] *Anderheggen, E.; Bazzi, G.; Elmer, H.; Friedrich T.; Maag H.; Theiler J.*: Flowers user's manual. ETH Zürich, April 1983

Teil 2. Ausschwingversuche an Zivilschutzbauten

Von Peter Hunziker und Jürg Umhang, Spiez

Einleitung

Um eine erste, grobe Überprüfung der in Teil 1 aufgestellten Hypothesen zu ermöglichen, führte das *AC-Laboratorium Spiez* einfache Ausschwingversuche an zwei, den TWO-Richtlinien entsprechenden, nicht unter Hochbauten liegenden Sanitätshilfsstellen durch.

Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Messungen wurden im Innern der Schutzbauten jeweils zwei nebeneinanderliegende Räume ausgesucht, welche mindestens eine erdberührte Aussenwand aufwiesen (Bild 1). Eine *stossartige Anregung* der Bauwerkstruktur wurde eingeleitet, indem ein 350 kg schwerer Betonquader aus einer Höhe von 1 m flach auf den Erdboden über diesen Räumen fallen gelassen wurde. Um Schäden am Bauwerk zu vermeiden, erfolgte dieser Fallmassen-Stoss über einer Zwischenwand. Bild 2 zeigt den an einer Ausklinkvorrichtung hängenden Betonquader, welcher mit einem Hubstapler auf die notwendige Fallhöhe angehoben wurde. Für die Triggerung der Messeinrichtung und zu Kontrollzwekken wurde bei jedem Versuch der Beschleunigungs-Zeit-Verlauf auf der Fallmasse gemessen.

Im Innern der beiden ausgesuchten Räume wurden die infolge der Stossanregung an Decke, Boden, Aussen- und

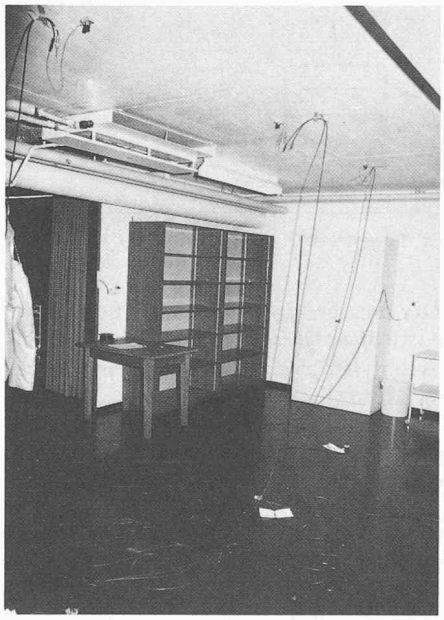


Bild 3. An Decke, Boden und Wänden aufgeklebte Beschleunigungsaufnehmer messen das Ausschwingverhalten der Bauteile

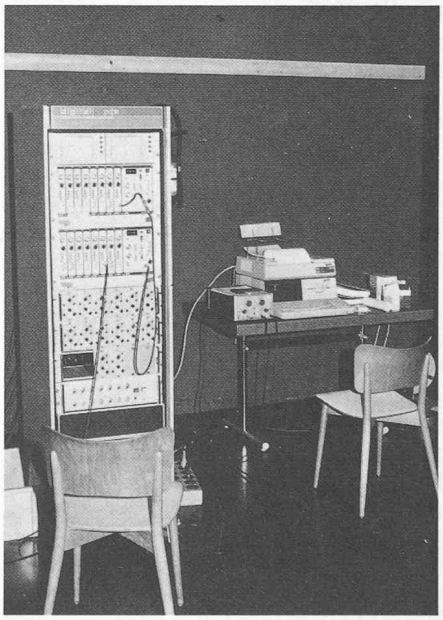


Bild 4. Verstärkungs- und Registrierelemente. Im Rack sind die Ladungsverstärker (unten) und die Transient-Recorder (oben) eingebaut. Rechts der Tischrechner HP 9826

Bild 1. Gesamtansicht der zwei ausgemessenen Räume und der Messeinrichtung

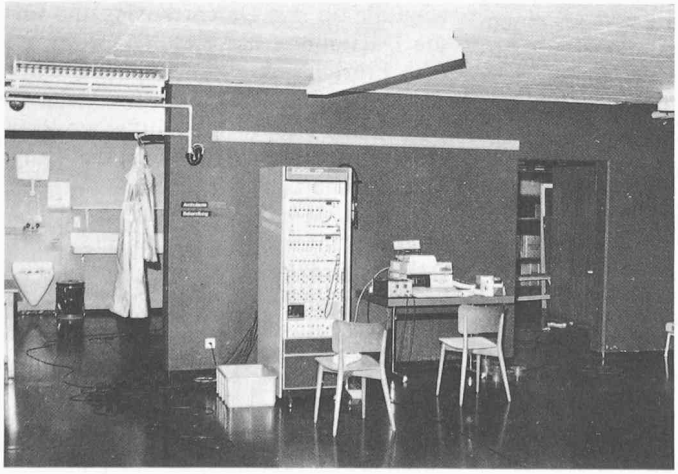


Bild 2. Der an einer Ausklinkvorrichtung hängende Betonquader wurde mit einem Hubstapler auf die notwendige Fallhöhe angehoben

