

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 96 (1978)
Heft: 48

Artikel: Neuartige Belastungs- und Messeinrichtungen für Schwingungsversuche an armierten und vorgespannten Betonprüfkörpern
Autor: Baumann, Markus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73795>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 04.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

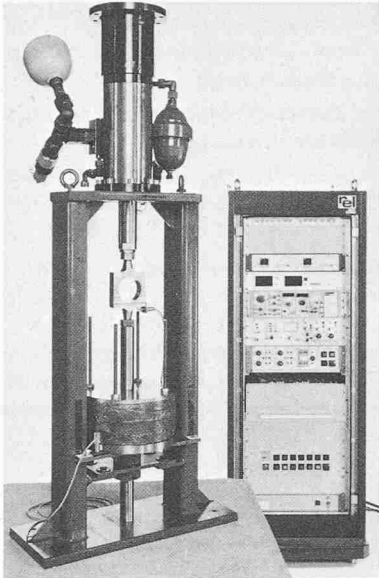


Bild 1. Servohydraulischer Schwingungserreger

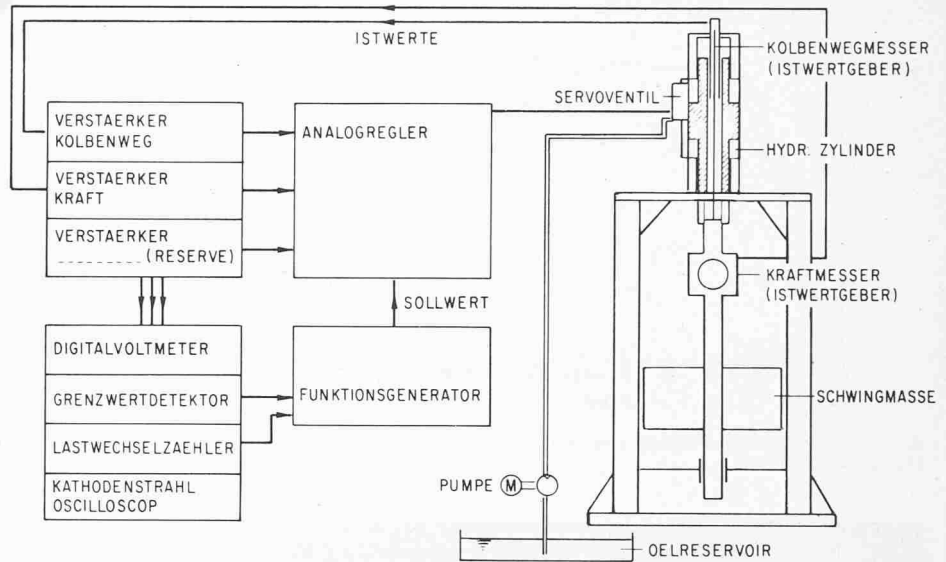


Bild 2. Schema der Steuerung (Regelkreis)

2. Stufenlose Einstellung der Erregerkraft zwischen 10 und 10000 N und der Erregerfrequenz zwischen 1 und 25 Hz (Leistungsspektrum).

3. Geringe Eigenmasse.

4. Keine Behinderung der Schwingungen des Prüfkörpers, d.h. keine Abstützung gegen einen ruhenden Rahmen.

Vorerst wurden verschiedene in Hochschulen, Prüfständen und Industrie vorhandene Schwingungserreger auf ihre Tauglichkeit geprüft:

- Bei den klassischen Unwuchtschwingern kann die Variation der Erregerkraft bei gleichbleibender Erregerfrequenz nur durch eine Verschiebung der Schwingmasse auf dem Schwungrad erreicht werden. Diese mechanische Einstellung ist umständlich und ungenau. Im übrigen führt eine Änderung der Erregerfrequenz stets zwingend zu einer Änderung der Erregerkraft (1. Anforderung nicht erfüllt).
- Elektrodynamische Schwingungserreger erlauben nur kleine Amplituden der Schwingmasse. Sie erzeugen bei den angestrebten Erregerfrequenzen zu kleine Erregerkräfte (2. Anforderung nicht erfüllt).
- Ein in der Industrie verwendeter servohydraulischer Schwingungserreger weist mangels Veränderbarkeit der Schwingmasse ein zu geringes Kraft-Frequenz-Leistungsspektrum auf (2. Anforderung nicht erfüllt).

Da in den neuen Forschungsanlagen der Abteilung für Bauingenieurwesen an der ETH-Hönggerberg eine leistungsfähige ölhydraulische Pumpenanlage zur Verfügung steht, wurde beschlossen, einen servohydraulischen Schwingungserreger mit dem gewünschten Leistungsspektrum selbst zu entwickeln.

Funktionsprinzip

Bild 1 zeigt den Schwingungserreger des IBK. Das Prinzip ist einfach: In einem Rahmen wird mittels eines hydraulischen Zylinders eine Schwingmasse hin und her bewegt.

Die Ölzufuhr zum Zylinder wird durch ein elektronisch gesteuertes Servoventil derart geregelt, dass sich die Masse, die mit der Kolbenstange verbunden ist, entsprechend bewegt. Die nötige Ölmenge fördert ein Pumpenaggregat. Der Schwin-

gungserreger wird mit dem Prüfkörper fest verbunden. Die auf den Prüfkörper ausgeübten dynamischen Kräfte entsprechen im wesentlichen den durch die Hin- und Herbewegung der Schwingmasse m entstehenden Trägheitskräften $m \cdot \ddot{x}$ (x = Weg der Masse = Kolbenweg).

Mechanische Teile

Der *Rahmen* hat die Aufgabe, die Schwingmasse im Frequenzbereich von 1 bis 25 Hz und im Wegbereich von 0 bis 10 cm spielfrei zu führen. Es dürfen keine inneren Resonanzschwingungen auftreten. Schwingungen, die aus Bewegungen des Prüfkörpers senkrecht zur Rahmenebene entstehen, müssen unbeschadet ertragen werden können. Diese Anforderungen werden erfüllt durch eine verhältnismässig steife Ausbildung des Rahmens und eine statisch unbestimmte Lagerung der Verbindungsstange Masse-Zylinder mittels Längskugellagern.

Die *Schwingmasse* aus Blei kann aus verschiedenen tellerförmigen Einzelmassen zu einer Gesamtmasse zwischen 10 und 200 kg zusammengesetzt werden. Dadurch ist es möglich, innerhalb der Leistungsgrenzen der Servohydraulik jede beliebige Kraft-Frequenz-Kombination zu erzeugen.

Der hydraulische *Zylinder* arbeitet mit einem Systemdruck zwischen 0 und 280 bar. Infolge der Haft- und Gleitreibung im Zylinder eignet sich dieser nur für Frequenzen bis zu 25 Hz. Der Kolbenhub beträgt maximal 10 cm.

Das *Servoventil* mit einer maximalen Leistung von 57 l/min regelt den Ölfluss in die Zylinderkammern. Es ist direkt beim hydraulischen Zylinder angeordnet. Dadurch werden sekundäre Einflüsse, wie sie z.B. aus Querschnittsänderungen der Rohrleitungen durch die rasch wechselnden Drücke entstehen, weitgehend vermieden.

Das *Pumpenaggregat* zum Betrieb des Schwingungserregers fördert bei einem Betriebsdruck von 280 bar eine Ölmenge von 10, 40 oder 50 l/min.

Elektronische Steuerung und Überwachung

Die *Steuerung des Schwingungserregers* (Bild 2) erfolgt über das Servoventil als Bindeglied zwischen Elektronik und Hydraulik derart, dass Amplitude und Frequenz der Kolbenbewegung den bestimmten gewünschten Grössen entsprechen.

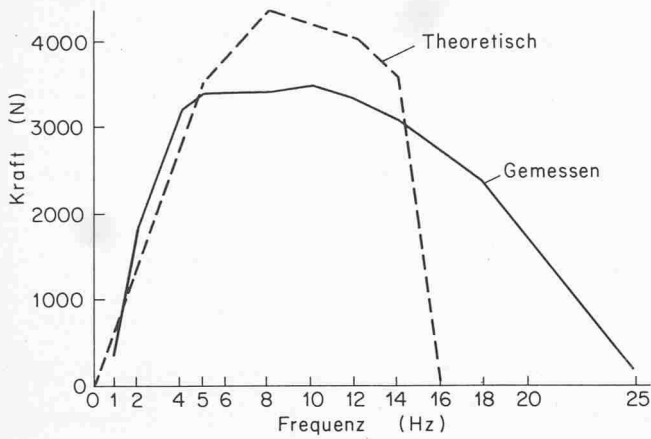


Bild 3. Kraft-Frequenz-Grenzkurve des Schwingungserregers für eine Masse von 104 kg

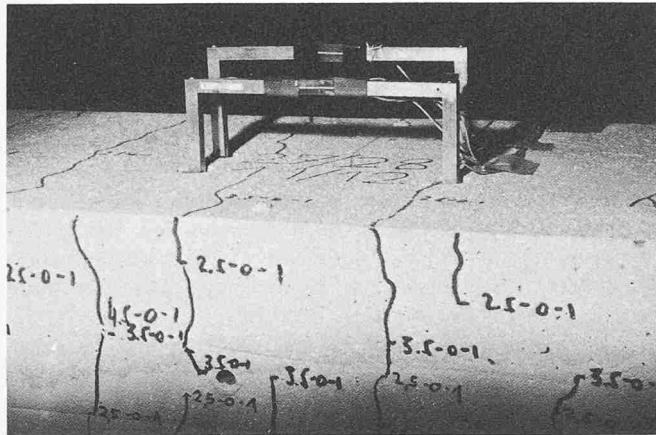


Bild 4. Dreigelenk-Dehnungsmessrahmen

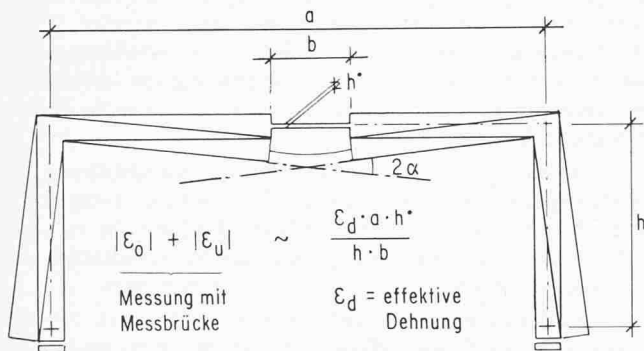


Bild 5. Geometrie des Dreigelenk-Dehnungsmessrahmens

Das erforderliche Steuersignal wird im elektronischen Analog-Regler aus der Differenz zwischen Ist- und Sollwert ermittelt. Der Istwert (oder Messwert) lässt sich mit dem Kolbenwegmesser oder mit dem Kraftmesser erfassen. Als Sollwertgeber dient ein Funktionsgenerator.

Der *Kolbenwegmesser* besteht aus einem induktiven Wegaufnehmer, der in der hohlen Kolbenstange untergebracht ist. Er erzeugt – entsprechend dem Standort der Schwingmasse – ein Spannungssignal.

Der *Kraftmesser* zwischen Kolbenstange und Schwingmasse ist ein speziell entwickeltes ringförmiges Element. Die Biegedehnungen der beiden Schenkel werden mit Dehnungsmessstreifen in Vollbrückenschaltung erfasst. Die Kraft ent-

spricht dem erzeugten Spannungssignal und ist – abgesehen von vernachlässigbar kleinen elastischen Kräften und Dämpfungskräften – gleich der vom Schwingungserreger auf den Prüfkörper ausgeübten dynamischen Kraft.

Der *Funktionsgenerator* hat die Aufgabe, ein Spannungssignal entsprechend dem Sollwert zu erzeugen.

Der *Analogregler* vergleicht den Ist- mit dem Sollwert und liefert einen zur Differenz der beiden Spannungssignale proportionalen Steuerstrom.

Die *Überwachung* des *Schwingungserregers* geschieht durch Messung der wirksamen dynamischen Kraft in der Verbindungsstange Masse-Zylinder sowie durch einen entsprechenden Sicherheitsschaltkreis. Dieser ermöglicht eine akustische oder optische Warnung bzw. ein Abschalten des Schwingungserregers bei Überschreiten festgelegter Grenzen der Kraft.

Charakteristische Grössen

Die dynamische Kraft des Schwingungserregers ergibt sich theoretisch für eine sinusförmige Bewegung

$$x = x_0 \cdot \sin \omega t$$

$$\text{zu } P_{\text{dyn max}} = m \cdot x \cdot \omega^2 = \frac{G}{g} \cdot x \cdot 4 \pi^2 \cdot f^2$$

mit: ω = Kreisfrequenz der Bewegung (sec^{-1})

f = Frequenz der Bewegung (sec^{-1})

G = Gewichtskraft (kN)

g = Erdbeschleunigung ($m \cdot \text{sec}^{-2}$)

Durch verschiedene Einflüsse wie Charakteristik des Servoventils, Reibung zwischen Kolben und Zylinder, Lagerreibung usw. ergeben sich indessen gewisse Abweichungen. Die Leistungswerte des Schwingungserregers sind ferner durch die Kapazitäten von Pumpenaggregat, Servoventil und Hydraulikzylinder begrenzt. Bild 3 zeigt als Beispiel die im Prüfstand gemessene tatsächliche Kraft-Frequenz-Grenzkurve des Schwingungserregers für eine Masse von 104 kg. Zum Vergleich ist die theoretische, aufgrund der Leistungsfähigkeiten von Hydraulik und Elektronik ermittelte Kurve gestrichelt eingetragen. Unterhalb der gemessenen Grenzkurve kann jede beliebige Kraft-Frequenz-Kombination realisiert werden.

Messeinrichtungen

Analoge Aufzeichnung und Spitzenwertmessung

Messungen bei dynamischen Beanspruchungen bedingen eine umfangreiche Ausrüstung, sofern jeder Messstelle während des ganzen Versuchsablaufs eine komplette Registriereinheit (Kanal) zur analogen Aufzeichnung zugeordnet werden muss. Wenn jedoch die zeitliche Funktion der Bewegung als solche stationär und zudem bekannt ist, kann der Aufwand mittels einer Umschaltanlage und nachgeschalteter Spitzenwertmessung stark verringert werden. Die am IBK zur Verfügung stehende Anlage erlaubt 100 Messpunkte seriell nach dem oberen und unteren Spitzenwert abzutasten. Diese Messart erfordert für jede Messstelle nur den fest verdrahteten Messwertgeber. Die entsprechenden Messwerte werden dann chronologisch durch eine einzige Gerätegruppe registriert. Das Abtasten und Registrieren der Spitzenwerte von 100 Messstellen dauert etwa 100 sec.

Dreigelenk-Dehnungsmessrahmen

Die Deformationsmessung beim Beton schliesst zum vorneherein den direkt applizierten Dehnungsmessstreifen aus, da dieser durch Rissebildung Schaden nimmt und infolge Inhomogenitäten der Betonoberfläche oft zu Fehlmessungen führt. Induktive Wegaufnehmer sind nur geeignet, wenn die hohen Beschaffungskosten und der beträchtliche Montageauf-

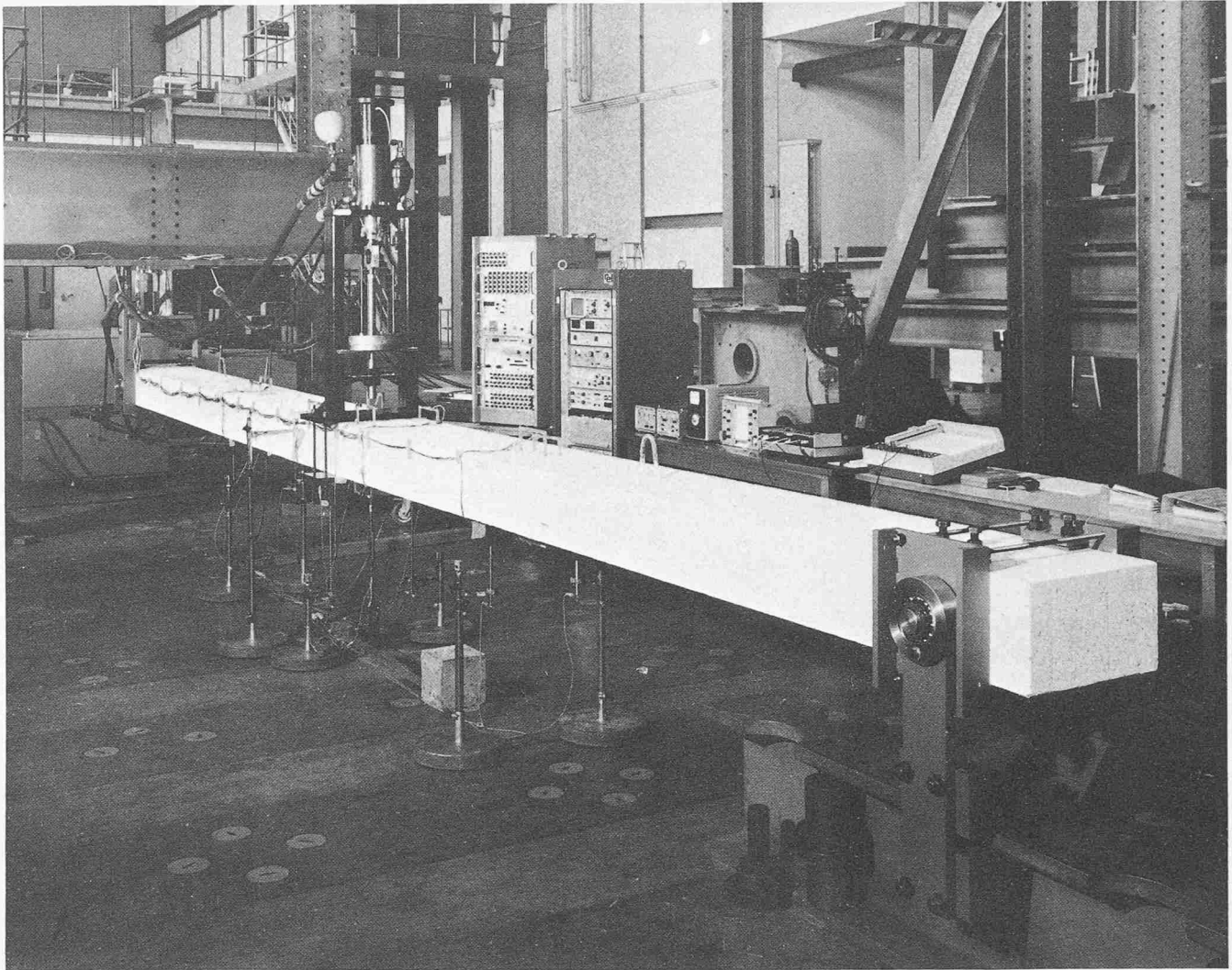


Bild 6. Schwingungsversuch an einem Leichtbetonbalken

wand keine Rolle spielen. Aus diesen und weiteren Gründen musste für die erwähnten Balkenversuche eine neuartige Messeinrichtung gesucht werden.

Die Aufgabe bestand darin, über einer Basislänge von 20 cm die Dehnung auf dem Versuchsobjekt mit einer Genauigkeit von etwa 1% zu erfassen. Die Lösung wurde im sog. Dreigelenk-Dehnungsmessrahmen gefunden (Bild 4). Das mittlere Gelenk, eine 2,85 cm lange Leichtmetall-Lamelle, dient als eigentliches Messelement. Die Fusspunkte des Dehnungsmessrahmens sind als wirkliche Gelenke mit konischen Axen zum spielfreien Einstellen ausgebildet. Die Fixierung des Gerätes auf dem Beton oder Bewehrungsstahl des Versuchsobjektes erfolgt mit normalem Dehnungsmessstreifen-Klebstoff.

Um eine vollständige Endeinspannung der Lamelle zu erhalten, wurde sie aus dem vollen Material herausgefräst. Diese Ausbildung bewirkt eine konzentrierte Biegeverformung über die Länge der Lamelle und bildet die Grundlage einer exakten Verformungsmessung durch zwei beidseitig auf die Lamelle geklebte Dehnungsmessstreifen in Halbbrückenschaltung. Bei dieser Schaltung werden die absoluten Dehnungsbeträge der Zug- und Druckfaser der Lamelle addiert. Eine günstige Kombination von Rahmenhöhe, Gelenklänge und Gelenkhöhe führt zu einer kalibrierten Aussage mittels

herkömmlicher Messbrücken. Im verwendeten Messgerät kann als kleinste Einheit am manuellen Kompensator bei einer k -Wert-Einstellung von 2,0 noch eine Dehnung von 0,001%, d.h. 10^{-5} abgelesen werden. Bei einer direkten Messung über einen Messverstärker lässt sich die Auflösung noch um den Faktor 100 verbessern.

Der geometrische Zusammenhang, der innerhalb der üblichen Verformungen von Betonprüfkörpern die Genauigkeitsanforderungen erfüllt, ist in Bild 5 festgehalten. Weitere beeinflussende Parameter sind K -Faktor der verwendeten Dehnungsmessstreifen und Umschaltgeräte. Die Reibungskraft im Fussgelenk ist so klein, dass sie die Reproduzierbarkeit der Messung nur unmerklich beeinflusst. Die Dreigelenk-Dehnungsmessrahmen können im elastischen Bereich des verwendeten Materials – im vorliegenden Fall bis zu Längenänderungen von ± 4 mm – verwendet werden. Selbst bei Schwingungen von 25 Hz sind noch exakte Aussagen über das tatsächliche Dehnungsverhalten möglich.

Beispiel

Die vorgängig beschriebenen Belastungs- und Messeinrichtungen wurden erstmals bei Schwingungsversuchen an schlaff armierten Leichtbeton- und Betonbalken verwendet (Bild 6). Alle Balken hatten dieselben Aussenabmessungen

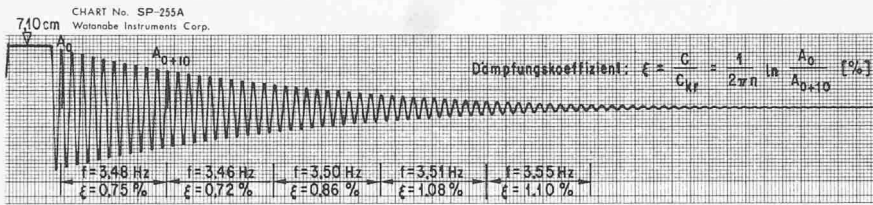


Bild 7. Ausschwingversuch, Durchbiegung in Balkenmitte

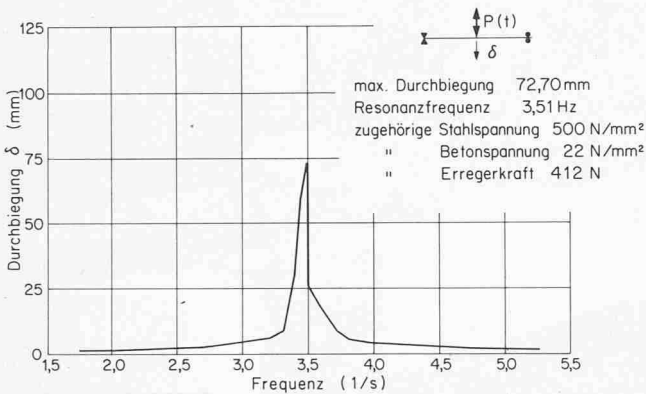


Bild 8. Resonanzversuch, Durchbiegungen in Balkenmitte

von $0,40 \times 0,24 \times 8,40$ m. Sie unterschieden sich jedoch bezüglich Betonart und Armierungsgehalt. Die Lagerung entsprach der eines einfachen Balkens. Die Auflager wurden zug- und druckfest sowie möglichst reibungsfrei ausgebildet.

An den Probekörpern wurden Ausschwing- und Resonanzversuche durchgeführt.

Ausschwingversuche

Den Balken wurde vorerst mittels einer speziellen Vorrichtung eine Anfangsauslenkung aufgezogen. Danach wurde diese Vorrichtung schlagartig gelöst, worauf der Prüfkörper frei ausschlagen konnte. Bild 7 zeigt den Amplitudenverlauf in Funktion der Zeit bei einem derart durchgeführten Ausschwingversuch an einem Leichtbetonbalken. Es fällt auf, dass die Dämpfung bei hoher Beanspruchung trotz starker Rissebildung geringer ist als bei kleinerer Beanspruchung.

Resonanzversuche

Mit dem servohydraulischen Schwingungserreger wurden erzwungene Schwingungen erzeugt und die Resonanzkurven jeweils im Bereich der ersten Eigenfrequenz der Balken durchfahren. Die Beanspruchung der Balkenarmierung wurde dabei bis zur Fließgrenze gesteigert. Bild 8 zeigt die an einem Leichtbetonbalken ermittelte Resonanzkurve. Sie ist infolge des nichtlinearen Verhaltens stark asymmetrisch.

Die Stahl- und Betondehnungen bzw. -stauchungen wurden in drei Querschnitten mittels total 18 Dreigelenk-Dehnungsmessrahmen auf der Balkenoberseite und -unterseite gemessen. In denselben Querschnitten wurden mit induktiven Weggebern auch die vertikalen Balkendurchbiegungen aufgenommen. Ferner wurden in Balkenmitte die Beschleunigungen der Balkenunterseite registriert. Ein zusätzlicher induktiver Wegmesser am Schwingungserreger diente der Aufnahme des Hubes der Schwingmasse. Damit konnte die aufgebrachte Erregerkraft auch nachträglich noch kontrolliert werden.

Die erhaltenen Messgrößen wurden teils analog, teils mittels Spitzenwertmessung registriert. Zur analogen Aufzeichnung standen sieben Kanäle zur Verfügung, d.h. ein 4-Kanal-Magnetband, ein 2-Kanal-x-t-Schreiber und ein x-y-Schreiber. Die restlichen Messwertnehmer wurden an die beschriebene Umschaltanlage mit nachgeschalteter Spitzenwertmessung angeschlossen. Damit konnten nacheinander jeweils die maximalen und minimalen Messwerte der entsprechenden Messstellen registriert werden.

Folgerungen bezüglich Versuchseinrichtung

Der neu entwickelte servohydraulische Schwingungserreger hat sich unter allen Bedingungen sehr gut bewährt und zeichnete sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. Während total 14 Wochen Versuchsdauer trat keine einzige Panne auf.

Die Wahl der Frequenz und des Kolbenhubes konnte stufenlos erfolgen, was sich bei der Aufnahme der Resonanzkurven als sehr günstig erwies. Die Resonanzstelle konnte stets exakt ermittelt werden. Auch bei Resonanz mit grossen Amplituden hielt der Schwinger die eingestellte Frequenz und den gewählten Kolbenhub jederzeit aufrecht. Vom Schwinger her gesehen waren damit während der Messzeit stationäre Verhältnisse garantiert. Die vertikalen Durchbiegungs-Amplituden der Balken wurden bei der erzwungenen Schwingung zum Teil bis zu $\pm 10,0$ cm gesteigert. Auch bei diesen grossen Amplituden und den aufgetretenen Beschleunigungen von $2,0 g$ ergaben sich keine besonderen Probleme. Die maximal erreichbare Frequenz des Schwingers lag erwartungsgemäss bei 30 Hz. Um mögliche Nebeneffekte auszuschliessen, musste die Versuchsanlage so konzipiert werden, dass der Schwinger nur vertikale Verschiebungen in Richtung der Störkraft ausführen konnte. Im vorliegenden Fall waren die aufgetretenen horizontalen Längs- und Querverschiebungen minim.

Die Dreigelenk-Dehnungsmessrahmen eigneten sich sehr gut zur Erfassung von dynamischen Dehnungen. Während des ganzen Versuches absolvierte jeder Messrahmen problemlos etwa 1,5 Millionen Lastwechsel. Es zeigte sich, dass es zweckmässig war, die Messrahmen bei der Montage etwas «vorzuspannen», um ein allfälliges Spiel in den Gelenken bei einem Nulldurchgang zu vermeiden.

Die analoge Registrierung der Messdaten bot keine Schwierigkeiten, bedingte jedoch einen erheblichen Aufwand an elektronischen Geräten. Die Spitzenwertmessung ist bedeutend weniger aufwendig. Nach Überwindung anfänglicher Schwierigkeiten hat sich auch die Spitzenwertmessung bewährt.

Ein umfassender Bericht über die Versuchsergebnisse wird im Laufe des Jahres 1979 veröffentlicht werden.

Adresse der Verfasser: M. Baumann, dipl. Bauing. ETH, R. Dieterle, dipl. Bauing. ETH, und Prof. Dr. H. Bachmann, dipl. Bauing. ETH, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.