Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 98 (1980)

Heft: 32

Artikel: Einfluss der Rissbildung auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken

Autor: Dieterle, Rudolf / Bachmann, Hugo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74161

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: 11.07.2025

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

Einfluss der Rissbildung auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken

Von Rudolf Dieterle und Hugo Bachmann, Zürich

Seit längerer Zeit ist bekannt, dass die dynamischen Eigenschaften von Stahlbetontragwerken durch die Rissbildung verändert werden. In Berechnungen wird meist angenommen, dass im Risszustand nebst kleineren Eigenfrequenzen eine erheblich grössere Dämpfung als im ungerissenen Zustand vorhanden sei. Die in diesem Artikel dargestellten Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass durch die Rissbildung die Dämpfung nach anfänglichem Anstieg auf sehr kleine Werte absinken kann. Demgegenüber ergeben sich durch die Verwendung von Leichtbeton anstelle von Beton keine erheblichen Unterschiede im dynamischen Verhalten der Tragwerke.

Die Technik der *dynamischen Analyse von Tragwerken mit Hilfe von Computerprogrammen* ist heute weit fortgeschritten; darüber ist eine umfangreiche Literatur vorhanden. Die Berechnungsergebnisse können jedoch nur brauchbar sein, wenn sie auf *wirklichkeitsnahen Grundlagen* beruhen. Solche Grundlagen fehlen heute auf dem Gebiet des *Stahlleichtbetons* noch weitgehend, für den *Stahlbeton* sind sie noch sehr unvollständig. Insbesondere bestehen wesentliche *Wissenslücken* über den *Einfluss der Rissbildung*, der *Beanspruchungshöhe*, des *Armierungsgehaltes*, des *Vorspanngrades* und der *Betonart* auf wichtige Bauwerkseigenschaften wie *Steifigkeit*, *Eigenfrequenzen* und *Dämpfungsverhalten* sowie *Grösse der Amplituden bei erzwungenen Schwingungen*.

Zur Abklärung dieser Fragen wurden am *Institut für Baustatik und Konstruktion an der ETH Zürich* insgesamt sieben schlaff armierte Leichtbeton- und Betonbalken in dynamischen Versuchen geprüft. Die drei Leichtbetonbalken mit Leichtzuschlagstoffen Lecahade unterschieden sich in der Grösse der Längsarmierung. Die drei Betonbalken wurden als Duplikate der Leichtbetonbalken ausgebildet. Damit konnte ein direkter Vergleich zwischen analogen Balken aus Leichtbeton und Beton durchgeführt werden. Zusätzlich wurde ein vierter Leichtbetonbalken mit Leichtzuschlagstoffen Leca geprüft. Über die durchgeführten Versuche und deren wichtigste Ergebnisse wird hier zusammenfassend berichtet. Eine ausführliche Beschreibung ist in einem Bericht des Institutes für Baustatik und Konstruktion enthalten [1].

Zielsetzung

Die durchgeführten Untersuchungen dienten der Erforschung des Einflusses
- der Rissbildung,
- der Beanspruchungshöhe,
- des Armierungsgehaltes,

auf die dynamischen Eigenschaften von schlaff armierten Leichtbeton- und Betonbalken, insbesondere auf
- die Steifigkeit,
- die Eigenfrequenz,
- das Dämpfungsverhalten.

Dem Vergleich analoger Leichtbeton- und Betonbalken war besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die Versuchsresultate sollten als Grundlage dienen für die Entwicklung theoretischer Modelle zur wirklichkeitsnahen Erfassung des dynamischen Verhaltens von Leichtbeton- und Betonkonstruktionen im ungerissenen und insbesondere im gerissenen Zustand.

Versuchsplanung

Die Planung der gesamten Versuchsserie erfolgte aufgrund einer ausführlichen Auswertung früherer Forschungsarbeiten sowie einer eingehenden theoretischen Betrachtung der möglichen Einflussparameter.

Nebst zahlreichen Berichten über Untersuchungen, bei denen an Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen wie Brücken, Decken, Türmen usw. Eigenfrequenzen und Dämpfungswerte gemessen wurden, standen Angaben über frühere Versuche an Stahlbeton- und Spannbetonbalken zur Verfügung. Versuche an schlaff armierten Stahlbetonbalken wurden zum Beispiel von *Bock* [2], *Ehlers* [3], *Lenk* [4] und *Penzien* [5] durchgeführt. *Denkhaus* und *Dück* [6], *Müller* [7], *Fritz-de-la-Orta* [8] und *Penzien* [5] nahmen Versuche an Spannbetonbalken vor. Die untersuchten Balken wurden teils in Ausschwingversuchen, teils in Resonanzversuchen geprüft.

Aus den genannten Untersuchungen lässt sich im wesentlichen folgendes herauslesen:
- Bei *Stahlbetonbalken* werden die Eigenfrequenzen und die Dämpfung stark von der Rissbildung beeinflusst. Gerissene Balken weisen gegenüber ihrem ungerissenen Zustand tiefere Eigenfrequenzen und in der Regel eine grössere Dämpfung auf. Die festgestellten Werte für die Dämpfung streuen jedoch innerhalb eines sehr weiten Bereichs.
- Bei *Spannbetonbalken* ist im ungerissenen Zustand die Dämpfung meist geringer als bei schlaff armierten und gerissenen Betonbalken.
- Von *Stahlleichtbetonbalken* und *Spannleichtbetonbalken* sowie von teilweise vorgespannten Beton- und Leichtbetonbalken sind keine Versuche zur Ermittlung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung bekannt geworden.

Die meisten der in den erwähnten Versuchen geprüften Balken hatten geringe Abmessungen und deshalb hohe erste Eigenfrequenzen im Bereich von 35 bis 120 Hz. Die erzeugten Verschiebungen und Beanspruchungen blieben relativ klein.

Trotz dieser Einschränkungen ist ersichtlich, dass die dynamischen Eigenschaften von Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen von zahlreichen nur wenig erforschten Einflussparametern abhängen. Grosse Bedeutung scheinen vor allem der Rissbildung und der Höhe der Beanspruchung sowie dem Armierungsgehalt und dem Vorspanngrad zuzukommen.

Wegen der grossen Anzahl Einflussparameter und deren teilweise gegenseitiger Abhängigkeit wurde angestrebt, anhand möglichst einfacher Versuche den

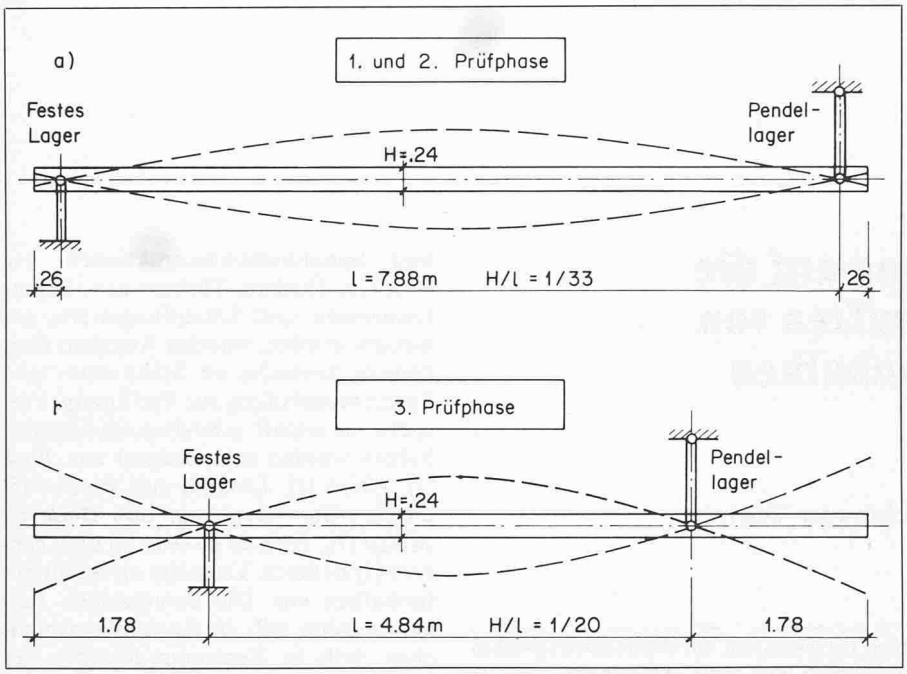


Bild 1. Statische Systeme und Schwingungsformen der geprüften Balken

Tabelle 1. Eigenschaften der verwendeten Baustoffe

Balken-bezeichng.	Bewehrungsstahl				Leichtbetone und Beton				
	$\mu = \mu'$ [%]	ϕ [mm]	$\sigma_{2,0}$ [N/mm²]	β_z [N/mm²]	Zuschlag-stoffe	Alter bei Prüfung	β_p [N/mm²]	β_w [N/mm²]	ρ [t/m³] (inkl. Bewehrg)
LB1	0.57	12	520	615	Leca hade	36	37.9	44.4	1.76
LB2	1.01	16	572	657	"	38	38.5	41.4	1.76
LB3	1.57	20	534	646	"	33	25.9	35.0	1.76
LB4	1.01	16	572	657	Leca	36	13.3	24.3	1.53
B1	0.57	12	520	615	Kies	35	32.1	39.3	2.50
B2	1.01	16	572	657	"	40	24.9	38.9	2.50
B3	1.57	20	534	646	"	39	22.0	30.3	2.50

$\sigma_{2,0}$=Streckgrenze, β_z = Zugfestigkeit, β_p = Prismendruckfestigkeit, β_w = Würfeldruckfestigkeit, ρ = Dichte

jeweiligen Einfluss der wichtigsten einzelnen Parameter auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken abzuklären. Der Einfluss der Vorspannung wurde vorläufig ausgeklammert. Vorgespannte Balken sollen in einer späteren Serie geprüft werden.

Versuchsbalken

Es wurden vier Leichtbetonbalken (LB1, LB2, LB3, LB4) und drei Betonbalken (B1, B2, B3) untersucht. Die Balken unterschieden sich nebst der verwendeten Betonart nur durch die Grösse der Längsarmierung.

Lagerung und Abmessungen

In Bild 1 sind die statischen Systeme und die Schwingungsformen der statisch bestimmt gelagerten Versuchsbalken dargestellt. Hiermit waren einfache und übersichtliche Verhältnisse gegeben, so dass die vorgängigen und nachträglichen theoretischen Untersuchungen mit vertretbarem Aufwand und genügender Genauigkeit durchgeführt werden konnten.

Die ersten Eigenfrequenzen der Versuchsbalken sollten etwa den an ausgeführten wirklichen Tragwerken feststellbaren Eigenfrequenzen entsprechen, damit aus den vorgenommenen Untersuchungen praxisnahe Folgerungen gezogen werden können. Deshalb wurden erste Eigenfrequenzen im Bereich von 2 bis 10 Hz angestrebt. Tiefe Eigenfrequenzen erfordern relativ grosse und schlanke Balken (Bild 1a). Ferner wurden, um den genannten Frequenzbereich abdecken zu können, alle Prüfkörper auch mit verkleinerter Stützweite und entsprechenden Kragarmen geprüft (Bild 1b). Die Trägerhöhe wurde so gewählt, dass die erforderliche Schlankheit erreicht wurde, und die Balken in der anfänglichen Ruhelage noch weitgehend ungerissen waren. Zudem sollten in der Konstruktionspraxis übliche Grössenordnungen – auch bezüglich des Durchmessers der Armierungsstäbe – eingehalten werden. Die Breite der Balken musste relativ klein sein, um die Masse der Versuchskörper und damit auch die notwendigen Erregerkräfte gering halten zu können.

Aufgrund dieser Überlegungen wurden als Versuchskörper einfache Balken der Gesamtlänge L = 8,40 m, der Breite B = 0,40 m und der Höhe H = 0,24 m gewählt, die mit den Stützweiten l = 7,88 m und l = 4,84 m geprüft wurden (Bilder 1 und 2).

Armierungen

Die Anordnung der Längs- und Bügelarmierungen geht aus Bild 2 hervor. Die Armierungen bestanden aus kaltverformtem, hochwertigem Armierungsstahl IIIb (Torstahl). Die Eigenschaften der für die Längsarmierung verwendeten Stäbe sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Der Längsarmierungsgehalt μ der Balken LB1, LB2 und LB3 betrug 0,57%, 1,01% und 1,57%, was je vier Stäbe mit ∅ 12, ∅ 16 und ∅ 20 mm ergab. Die Balken B1, B2 und B3 entsprachen bezüglich ihrer Armierung genau den Balken LB1, LB2 und LB3. Der Balken LB4 hatte die gleiche Armierung wie die Balken LB2 und B2. Bei allen Balken wurde die Druckarmierung gleich wie die Zugarmierung ausgebildet ($\mu' = \mu$). Sämtliche Balken wiesen dieselbe Bügelarmierung aus Stäben ∅ 8 mm auf.

Leichtbetone und Beton

Die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Leichtbetone und des Betons sind ebenfalls in der Tabelle 1 angegeben. Die Balken LB1, LB2 und LB3 wurden aus einem Leichtbeton mit hochfesten Leichtzuschlagstoffen aus Blähton Leca-hade hergestellt. Für den Balken LB4 kam ein Leichtbeton mit Leichtzuschlagstoffen aus Blähton Leca zur Anwendung. Für die Balken B1, B2 und B3 wurde normaler Kiesbeton verwendet.

Durchführung der Versuche

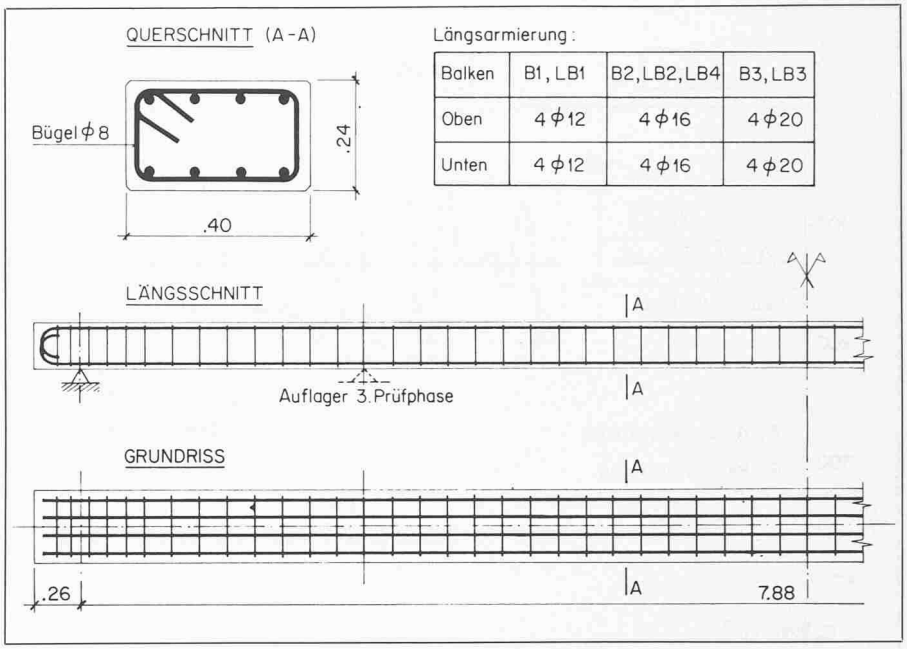
Die Versuchsbalken wurden auf dem Aufspannboden im Forschungsgebäude der ETH-Hönggerberg geprüft. Ein Vorversuch konnte an der *Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt* (EMPA) in *Dübendorf* durchgeführt werden, wobei die vorgängig entwickelten Versuchs- und Messeinrichtungen ausprobiert und einer eingehenden Prüfung unterzogen wurden.

Versuchsanlage

Bild 3 zeigt eine Übersicht über die gesamte Anlage, in der sämtliche Versuchsbalken geprüft wurden. Auf der einen Seite war ein stehendes festes Lager angeordnet, das nur Auflagerdrehwinkel zuliess; auf der andern Seite war ein hängendes Pendellager angebracht, das nebst Verdrehungen auch Längsverschiebungen ermöglichte.

Belastungsvorrichtungen

Zur Ermittlung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung der Versuchsbalken wurden Resonanzversuche und Ausschwingversuche durchgeführt. Sämtliche Balken wurden ausserdem auch in statischen Versuchen belastet, womit die im jeweiligen Zeitpunkt der Belastungsgeschichte vorhandene Steifigkeit genauer ermittelt werden konnte.



Balken	B1, LB1	B2, LB2, LB4	B3, LB3
Oben	4 ϕ 12	4 ϕ 16	4 ϕ 20
Unten	4 ϕ 12	4 ϕ 16	4 ϕ 20

Bild 2. Abmessungen und Armierungen der Leichtbeton- und Betonbalken

Resonanzversuche

Bild 4 zeigt den für die Erzeugung der erzwungenen Schwingung benützten und am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich entwickelten Schwingungserreger. In einem steifen Rahmen, der fest auf dem Versuchsbalken montiert ist, wird mit Hilfe eines durch eine Servohydraulik gesteuerten Zug-Druck-Zylinders eine Schwingmasse hin und her bewegt. Die auf den Balken ausgeübten dynamischen Kräfte entsprechen den durch die Beschleunigung der Schwingmasse entstehenden Trägheitskräften. Eine genauere Beschreibung wird in [9] gegeben.

Ausschwingversuche

Durch eine zwischen der unteren Befestigungsplatte des Schwingungserregers und dem Aufspannboden angebrachte Spannschraube konnte dem Versuchsbalken die gewünschte Anfangsdurchbiegung aufgezwungen werden. Die Verbindung liess sich schlagartig lösen, worauf der Balken frei ausschwingen konnte.

Statische Versuche

Die Versuchsbalken wurden durch einen gegen einen Rahmen abgestützten hydraulischen Zug-Druck-Zylinder in verschiedenen Stufen nach unten bzw. nach oben bewegt, wobei die Kraft und die zugehörige Durchbiegung in Balkenmitte gemessen wurden.

Zusatzmassen

In bestimmten Stadien des Versuchsablaufs wurden an sechs längs der Balkenachse verteilten Punkten zusätzliche Massen entsprechend einer verteilten Masse von $\Delta M_1 = 152{,}4$ kg/m oder $\Delta M_2 = 295{,}2$ kg/m auf die Versuchsbalken aufgebracht. Dadurch konnten *zwei Effekte* erzielt werden: Einerseits wurden die Eigenfrequenzen der Versuchsbalken verringert, womit die Breite des untersuchten Frequenzbereichs nach unten erweitert werden konnte. Andererseits hatte das Aufbringen der Zusatzmassen zur Folge, dass die Beanspruchung der Versuchsbalken infolge Eigengewichtes und die entsprechenden Rissweiten vergrössert wurden, was insbesondere für die Dämpfung von Bedeutung war.

Versuchsablauf

Jeder Balken wurde einem genau festgelegten Prüfprogramm unterworfen (siehe Beispiel Bild 5). Hiezu wurden *Beanspruchungsstufen* definiert. Diese waren

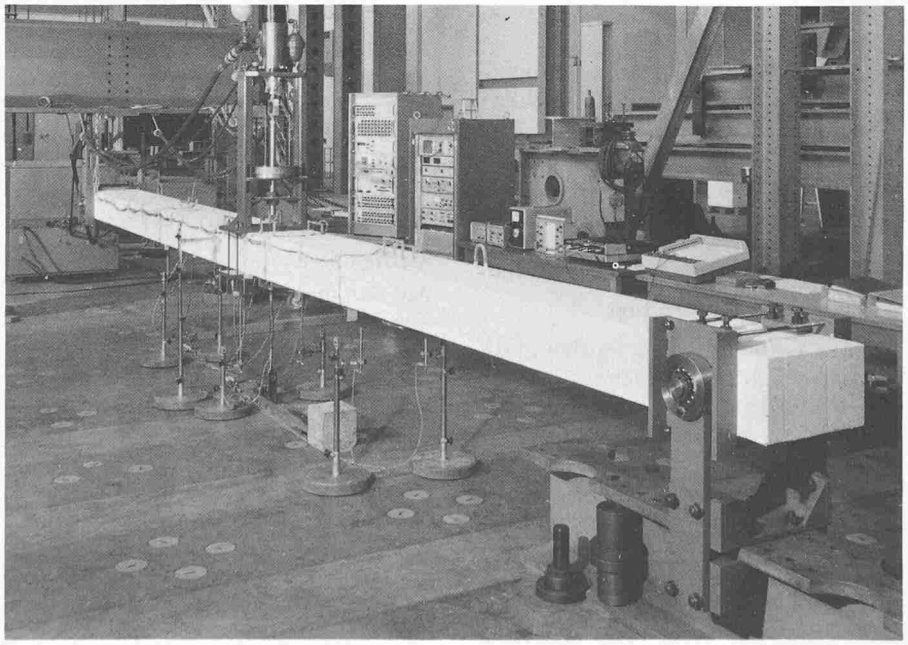


Bild 3. Übersicht über die Versuchsanlage

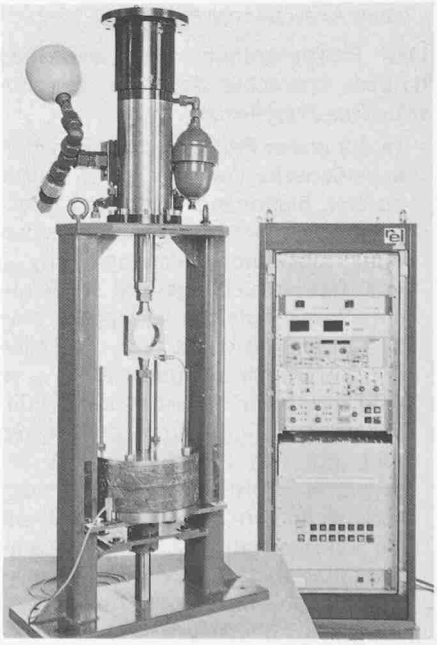


Bild 4. Servohydraulischer Schwingungserreger

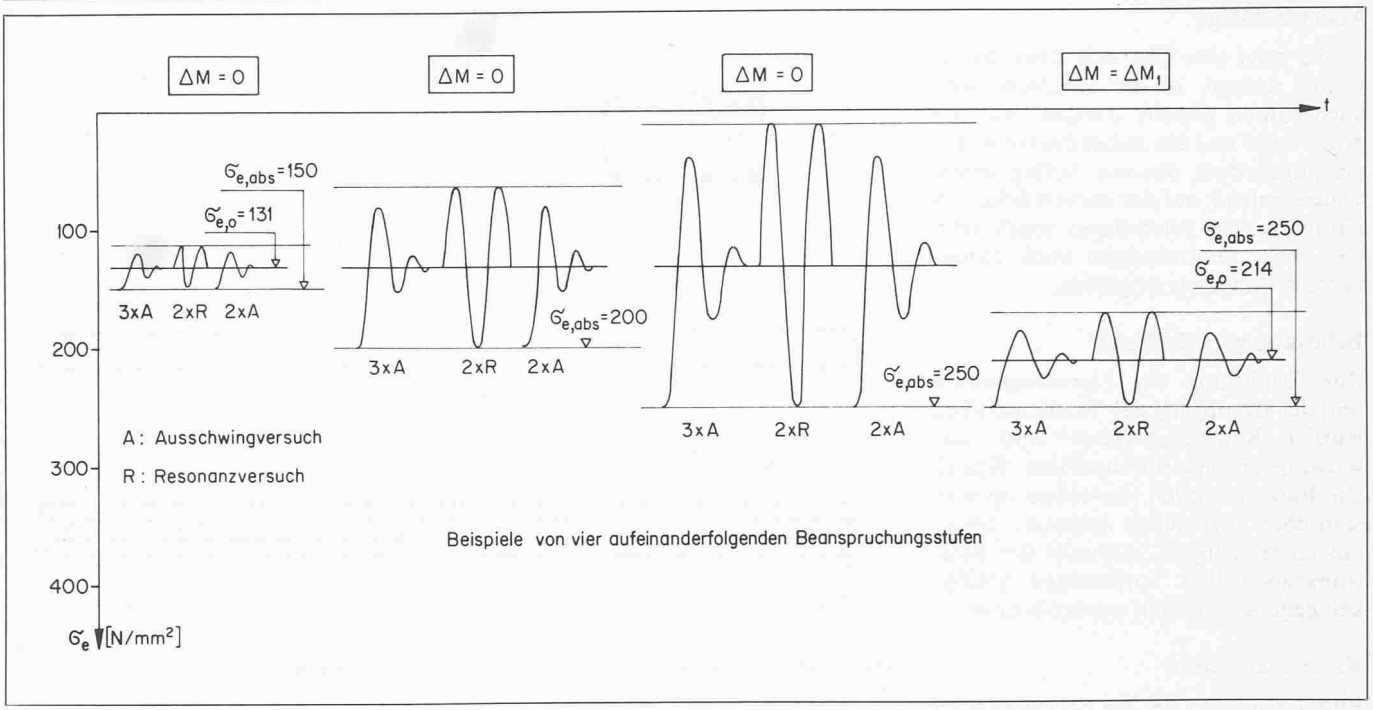


Bild 5. Ausschnitt aus dem Prüfprogramm des Balkens LB2

durch eine ganz bestimmte, maximale absolute Stahlspannung $\sigma_{e,\,abs}$ in der unteren Längsarmierung in Balkenmitte sowie durch eine allfällige Zusatzmasse gekennzeichnet. Die Spannung $\sigma_{e,\,abs}$ ergab sich aus der Summe der Stahlspannungen infolge Eigengewichtes $\sigma_{e,\,o}$ und dynamischer Belastung $\sigma_{e,\,rel}$. Innerhalb jeder Beanspruchungsstufe wurden nacheinander die folgenden Versuche durchgeführt:

- *drei Ausschwingversuche* mit jeweils gleich grosser Auslenkkraft,
- *zwei Resonanzversuche,* wobei die Resonanzkurven bei konstant gehaltener Erregerkraft im ersten Versuch mit steigender und im zweiten Versuch mit abnehmender Erregerfrequenz punktweise bestimmt wurden,
- *zwei Ausschwingversuche* mit gleicher Auslenkkraft wie bei den anfänglichen Ausschwingversuchen.

Das Prüfprogramm jedes einzelnen Balkens erstreckte sich über *drei verschiedene Prüfphasen:*

- In der *ersten Prüfphase* mit einer Balkenstützweite von l = 7,88 m wurde vorerst, beginnend beim noch praktisch ungerissenen Zustand, die maximale absolute Stahlspannung $\sigma_{e,\,abs}$ von Beanspruchungsstufe zu Beanspruchungsstufe in Etappen von 50 N/mm² gesteigert (vgl. die ersten drei Beanspruchungsstufen in Bild 5). Ab einer bestimmten Stahlspannung $\sigma_{e,\,abs}$ wurde der Balken auch mit den Zusatzmassen $\Delta\ M_1$ bzw. $\Delta\ M_2$ geprüft. Dies war dann der Fall, wenn durch die Zusatzmassen die Stahlspannung $\sigma_{e,\,o}$ infolge Eigengewichtes nicht die für die Beanspruchungsstufe festgelegte Stahlspannung $\sigma_{e,\,abs}$ überschritt. Bei einer solchen Beanspruchungsstufe mit Zusatzmasse war somit die zu erreichende Stahlspannung $\sigma_{e,\,abs}$ dieselbe wie bei der vorausgegangenen Beanspruchungsstufe ohne Zusatzmasse, die Spannungsamplitude $\sigma_{e,\,rel}$ hingegen war wegen des erhöhten Eigengewichtes und der zugehörigen Stahlspannung $\sigma_{e,\,o}$ entsprechend kleiner (vgl. die dritte und vierte Beanspruchungsstufe in Bild 5). Die Stahlspannungen wurden bis nahe an die Proportionalitätsgrenze gesteigert, d. h. bis $\sigma_{e,\,abs}$ = 450 N/mm².
- In der *zweiten Prüfphase* wurde bei unveränderter Balkenstützweite von l = 7,88 m dasselbe Prüfprogramm, wie es in der ersten Prüfphase zur Anwendung kam, leicht abgekürzt wiederholt, um den Einfluss der Belastungsgeschichte bzw. der Rissbildung – die Risse waren während der ersten Prüfphase entstanden – genauer zu erfassen.
- In der *dritten Prüfphase* wurde die Stützweite der Balken auf l = 4,84 m verkleinert und ein ähnliches Prüfprogramm wie in der ersten und zweiten Prüfphase durchgeführt, allerdings mit Spannungssteigerungen von 100 N/mm² von Beanspruchungsstufe zu Beanspruchungsstufe.

Messungen und Auswertung

An den Versuchsbalken wurden in drei verschiedenen Querschnitten die Durchbiegungen, die Stahl- und Betondehnungen, die Balkenbeschleunigungen sowie am Schwingungserreger selbst die Erregerkraft gemessen. Die Registrierung erfolgte teils analog in Funktion der Zeit auf Magnetband und teils mittels Spitzenwertmessern auf Lochstreifen. Eine ausführliche Beschreibung der Mess- und Registriereinrichtungen wird in [9] gegeben.

Die Auswertung der Magnetband- und Lochstreifenaufzeichnungen erfolgte zur Hauptsache mit Hilfe eines Prozessrechners. Dabei wurden die auf Magnetband aufgezeichneten Messwerte durch einen Analog-Digital-Wandler mit der gewünschten Abtastfrequenz digitalisiert. Die so erhaltenen diskreten Daten wurden getrennt nach Resonanz- und Ausschwingversuchen weiterverarbeitet. Die verwendeten Auswertungsprogramme ermöglichten das direkte Aufzeichnen der Resonanzkurven sowie die Bestimmung der Eigenfrequenz und der Dämpfung beim Ausschwingversuch.

Versuchsresultate

Im folgenden werden die wichtigsten Versuchsresultate in geraffter Form dargestellt. Dabei wird die Differenz zwischen den im Resonanzversuch bzw. Ausschwingversuch und den unter Eigengewicht gemessenen Werten mit dem Adjektiv «relativ», bzw. dem Index «rel» verdeutlicht. Für ein eingehenderes Studium der interessanten Resultate sei nochmals auf [1] verwiesen.

Steifigkeiten

Aus den in den statischen Versuchen ermittelten Last-Durchbiegungs-Diagrammen konnte die im jeweiligen Zeitpunkt der Belastungsgeschichte vorhandene Balkensteifigkeit bestimmt werden.

Die durch die Rissbildung bewirkte Abminderung der Balkensteifigkeit war bei den schwach armierten Versuchsbalken erwartungsgemäss grösser als bei den stärker armierten Balken. Die maximale Abminderung betrug bei den Leichtbetonbalken 57 bis 71% und bei den Betonbalken 68 bis 84%.

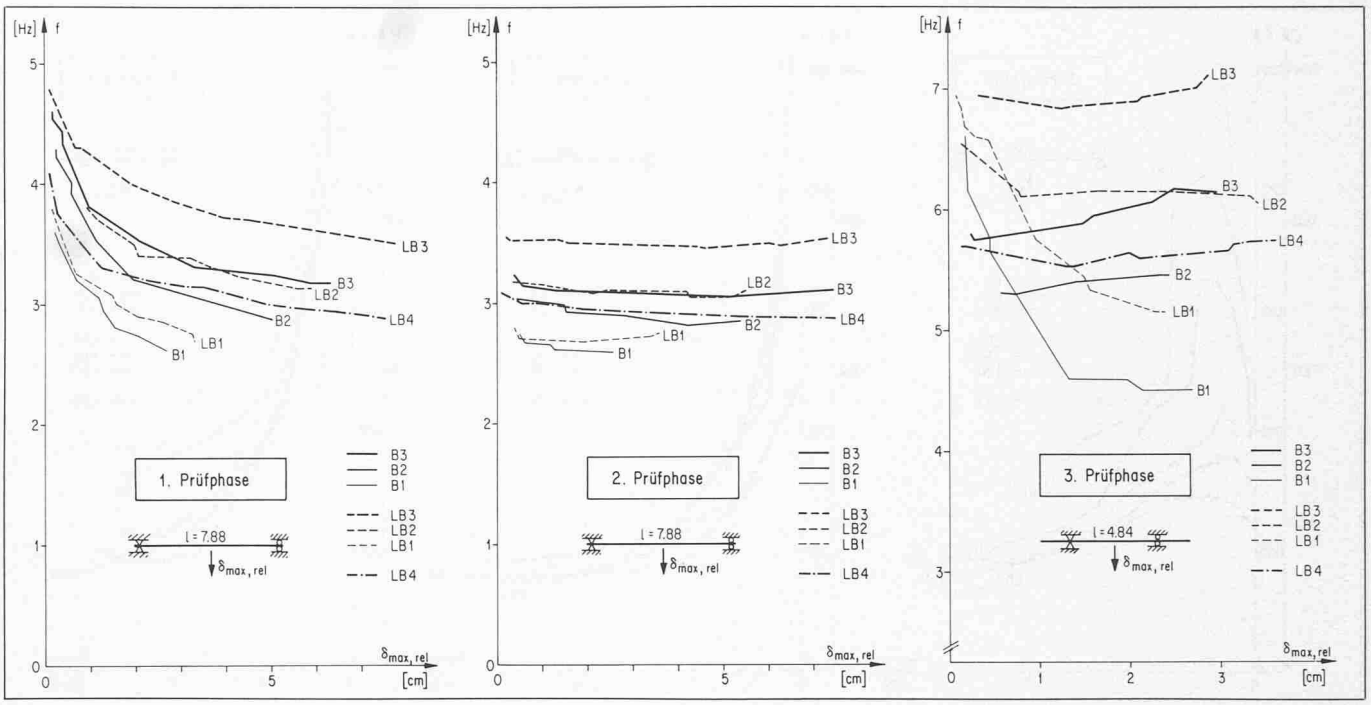


Bild 6. Eigenfrequenzen in Funktion der maximalen relativen Durchbiegung in Balkenmitte

Beschleunigungen

Die stärker armierten Versuchsbalken wiesen bei gleicher relativer Durchbiegung wegen der höheren Eigenfrequenzen (vgl. den Abschnitt «Eigenfrequenzen») stets eine grössere Beschleunigung auf als die schwächer armierten Balken. Ebenso zeigten die Leichtbetonbalken bei gleich grosser relativer Durchbiegung wegen der höheren Eigenfrequenzen (vgl. den Abschnitt «Eigenfrequenzen») stets eine grössere Beschleunigung als die entsprechenden Betonbalken.

Biegemomente und Querkräfte

Die Biegemomente und Querkräfte infolge dynamischer Belastung waren bei den entsprechenden Leichtbeton- und Betonbalken bei gleicher relativer Durchbiegung stets annähernd gleich gross, da sich die Einflüsse der höheren Beschleunigungen und der geringeren Masse der Leichtbetonbalken etwa kompensierten.

Dehnungen

Die relativen Stahldehnungen und Betondehnungen von sich entsprechenden Leichtbeton- und Betonbalken waren bei gleicher relativer Durchbiegung stets ungefähr gleich gross.

Rissverhalten

Die relative Rissöffnung lag bei allen Versuchsbalken in derselben Grössenordnung und überstieg trotz Stahlspannungsamplituden von bis zu 450 N/mm² nie den Wert von 25/100 mm.

Eigenfrequenzen

In Bild 6 ist die Grösse der in den Resonanzversuchen bei den Beanspruchungsstufen ohne Zusatzmassen festgestellten ersten Eigenfrequenzen f der Versuchsbalken in Funktion der maximalen relativen Durchbiegung $\delta_{max,\,rel}$ in Balkenmitte für alle Prüfphasen aufgetragen.

Es können die folgenden Feststellungen gemacht werden:

- In der ersten Prüfphase nahmen die Eigenfrequenzen wegen der fortschreitenden Ausbildung der Risse und des dadurch verursachten Steifigkeitsabfalls mit wachsender Durchbiegung bzw. Beanspruchung ab. Die Abminderung der Eigenfrequenzen gegenüber dem ungerissenen Zustand war bei den schwach armierten Balken grösser als bei den stärker armierten Balken. Sie betrug bei den Leichtbetonbalken 33 bis 44% und bei den Betonbalken 47 bis 54%. Die anfänglich kleineren Eigenfrequenzen der Leichtbetonbalken – trotz geringerer Masse durch den wesentlich kleineren E-Modul bedingt – nahmen also mit zunehmender Beanspruchung und Rissbildung weniger stark ab als die Eigenfrequenzen der entsprechenden Betonbalken. Schliesslich wiesen sämtliche Leichtbetonbalken höhere Eigenfrequenzen auf als die entsprechenden Betonbalken.
- In der zweiten Prüfphase (gleiche Stützweite wie erste Prüfphase) waren die Eigenfrequenzen im ganzen Beanspruchungsbereich praktisch konstant, da sich in der ersten Prüfphase fast sämtliche Risse ausgebildet hatten und sich deshalb die Balkensteifigkeit im allgemeinen nur noch sehr wenig änderte.
- In der dritten Prüfphase (verkürzte Stützweite) nahmen die Eigenfrequenzen bei den stärker armierten Balken mit wachsender Durchbiegung bzw. Beanspruchung wieder etwas zu. Eine mögliche Erklärung hiefür wird in [1] gegeben. Bei den schwach armierten Balken war auch in dieser Prüfphase zuerst noch ein erheblicher Abfall der Eigenfrequenzen zu beobachten, da insbesondere gegen die Balkenenden zu noch weitere Risse auftraten.

Dämpfung

Aus praktischen Gründen und mangels besserer Möglichkeiten wurde bei der Versuchsauswertung als Kenngrösse für die Dämpfung das nur für ein viskoses Dämpfungsgesetz und linear elastisches Verhalten eines Schwingers gültige logarithmische Dekrement ϑ gewählt, unabhängig davon, ob das effektive Dämpfungsverhalten diesem Ansatz genügte oder nicht. Das häufig verwendete Dämpfungsmass ξ (Verhältnis der Dämpfung zur kritischen Dämpfung) kann daraus mit der Beziehung

$$\xi = \frac{\vartheta}{2\pi}$$

berechnet werden.

Die aus den Resonanzversuchen ermittelten Dämpfungswerte entsprechen weitgehend denjenigen aus den Ausschwingversuchen. Deshalb werden hier nur die in den Ausschwingversuchen festgestellten Werte verwendet. Bild 7 zeigt den aus den Versuchen aller Beanspruchungsstufen ohne Zusatzmassen gewonnenen Verlauf des logarithmischen Dekrementes ϑ bzw. des Dämpfungsmasses ξ in Funktion der maximalen relativen Durchbiegung $\delta_{max,\,rel}$ (Anfangsdurchbiegung) in Bal-

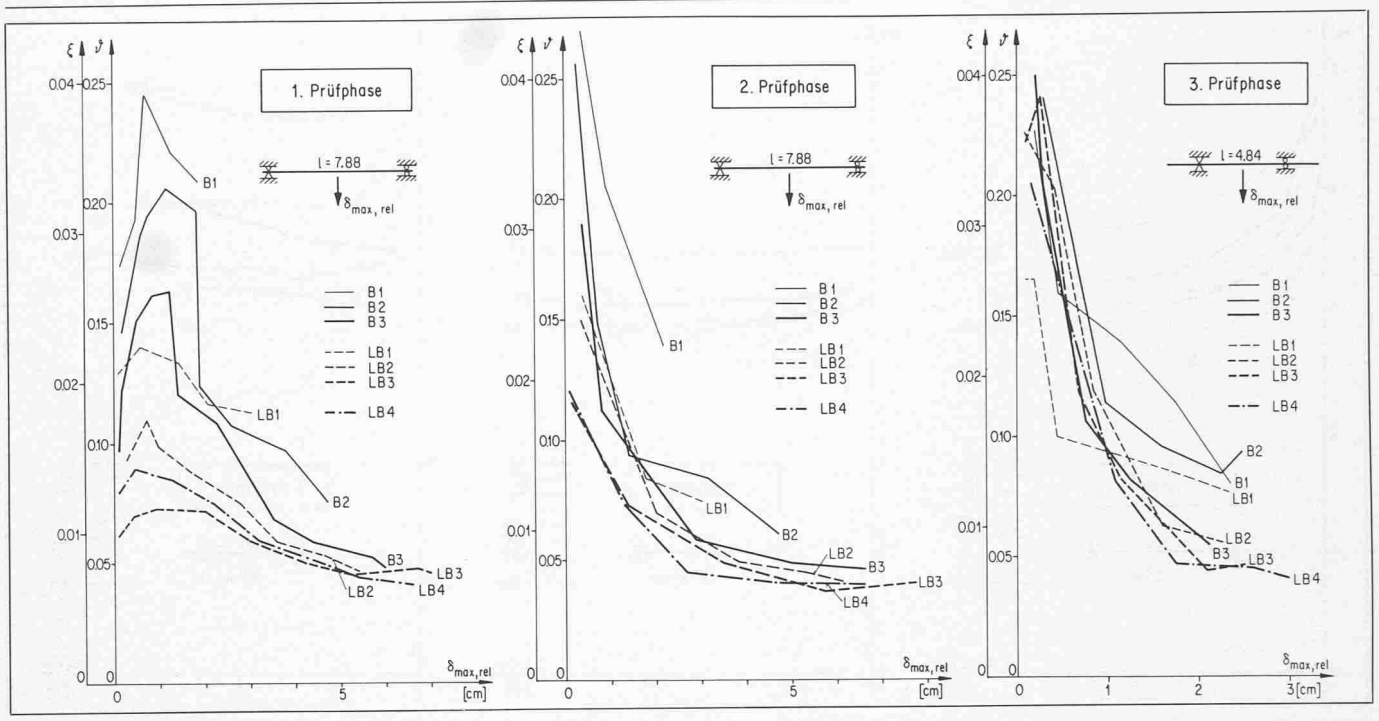


Bild 7. Dämpfung in Funktion der maximalen relativen Durchbiegung in Balkenmitte

kenmitte. Dabei wurden jeweils die Werte aus den ersten zehn Perioden des Ausschwingversuches ermittelt und aufgetragen.

Für die Beanspruchungsstufen mit den Zusatzmassen ΔM_1 und ΔM_2 wurde in allen Prüfphasen ein nahezu analoger Verlauf der Dämpfung festgestellt. Deshalb wird hier auf die Wiedergabe dieser Resultate verzichtet.

Die aus Bild 7 ersichtlichen Resultate sind in Bild 8 schematisch dargestellt. Das Dämpfungsverhalten der geprüften Balken lässt sich mit den folgenden Feststellungen charakterisieren (die Ziffern 1 bis 6 beziehen sich auf die Numerierung in Bild 8):

1. Bei allen Balken nahm in der ersten Prüfphase die Dämpfung mit zunehmender Durchbiegung bzw. fortschreitender Ausbildung der Risse vorerst zu.
2. Während der Phase der Rissbildung wurde ein Zustand erreicht, bei dem die Dämpfung nicht mehr weiter anstieg.
3. Sobald annähernd alle Biegerisse ausgebildet waren, nahm die Dämpfung mit steigender Durchbiegung wieder ab. Bei grossen Durchbiegungen – entsprechend einer Stahlspannung nahe bei der Fliessgrenze – wurden insbesondere an den stärker armierten Balken sehr kleine Dämpfungswerte ($\xi < 1\%$) gemessen.
4. Bei Wiederholung des gesamten Prüfprogramms in der zweiten Prüfphase ergab sich bei allen Balken bei kleinen relativen Durchbiegungen eine im Vergleich zur ersten Prüfphase sehr hohe Dämpfung. Mit zunehmender Durchbiegung nahm dann aber die Dämpfung wiederum stark ab.

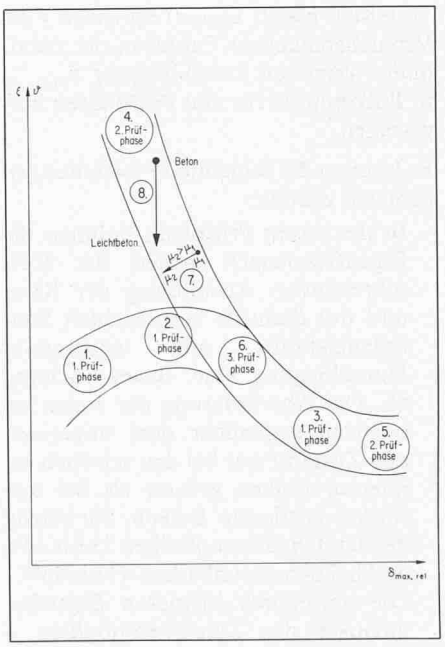


Bild 8. Dämpfung in Funktion der maximalen relativen Durchbiegung (schematisch)

5. Bei grossen Durchbiegungen wurden für die Dämpfung noch etwas kleinere Werte als in der ersten Prüfphase gemessen.
6. Durch Verkleinern der Stützweite in der dritten Prüfphase – die Eigenfrequenz wurde dadurch etwa verdoppelt – wurde ein zur zweiten Prüfphase analoges Verhalten beobachtet. Auch hier nahm die Dämpfung mit zunehmender Durchbiegung stark ab. Es wurde kein signifikanter Einfluss der Eigenfrequenz auf die Dämpfung festgestellt.
7. Mit zunehmendem Armierungsgehalt wurde eine kleinere Dämpfung ermittelt.
8. Die Leichtbetonbalken wiesen im ganzen Beanspruchungsbereich ein geringeres Dämpfungsvermögen als die entsprechenden Betonbalken auf.

Zusammenfassung

Sowohl die Steifigkeit und die Eigenfrequenz als auch die Dämpfung von Stahlleichtbeton- und Stahlbetonbalken hängen sehr stark von der Rissbildung und der Beanspruchungshöhe ab. Demgegenüber hat der Armierungsgehalt einen geringeren Einfluss.

Die *Steifigkeiten* nahmen gegenüber dem ungerissenen Zustand bei den Leichtbetonbalken um 57 bis 71% und bei den Betonbalken um 68 bis 84% ab.

Die *Eigenfrequenzen* der Versuchsbalken verminderten sich ebenfalls mit zunehmender Rissbildung. Die Abnahme gegenüber dem ungerissenen Zustand betrug bei den Leichtbetonbalken 33 bis 44% und bei den Betonbalken 47 bis 54%. Im gerissenen Zustand wiesen alle Leichtbetonbalken eine höhere Eigenfrequenz auf als die entsprechenden Betonbalken, während im ungerissenen Zustand das Gegenteil der Fall gewesen war.

Die *Dämpfung* stieg bei allen Versuchsbalken während der Rissbildung zuerst an. Sobald annähernd alle Biegerisse ausgebildet waren, nahm die Dämpfung mit weiter steigender Beanspruchung wieder ab. Bei hoher Beanspruchung, d.h. bei Stahlspannungen bis nahe an die Proportionalitätsgrenze, wurden für das Dämpfungsmass sehr niedrige Werte von teilweise unter 1% ermittelt. Bei Wiederholung der

Schwingversuche an den nun bereits gerissenen Balken wurden bei kleinen Beanspruchungen für das Dämpfungsmass sehr hohe Werte von bis zu 4% und mehr festgestellt. Bei hohen Beanspruchungen wurden dann aber bei fast allen Balken wiederum Werte von weniger als 1% gemessen. Die Dämpfung der Leichtbetonbalken war im ganzen Beanspruchungsbereich geringer als diejenige der entsprechenden Betonbalken.

Die beschriebenen Versuchsresultate und weitere Untersuchungen zeigen, dass *mit dem Modell der viskosen Dämpfung*, womit üblicherweise die Dämpfung von Stahlbetonkonstruktionen zu erfassen versucht wird, *das tatsächliche Dämpfungsverhalten nicht zutreffend beschrieben* werden kann. Die aufgezeigten Phänomene können jedoch anhand von wirklichkeitsnäheren Modellen erklärt werden. Über diesbezügliche Forschungsergebnisse soll in einer späteren Publikation berichtet werden.

Literatur

[1] *Dieterle, R., Bachmann, H.:* «Versuche über den Einfluss der Rissbildung auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken», Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-1, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, Dez. 1979.

[2] *Bock, E.:* «Über den dynamischen E-Modul und die Dämpfung von Betonbalken verschiedener Bewehrung bei Biegungs- und Längsschwingungen», Universität Berlin, Dissertation, 1939.

[3] *Ehler, G.:* «Das Elastizitätsmass des Betons bei Schwingungen», Beton und Eisen, 40. Jahrgang, 1941, Heft 20, S. 268 bis 272, Heft 21, S. 280 bis 282.

[4] *Lenk, H.:* «Über das Schwingungsverhalten von Spannbeton- und Stahlbetonbalken», Universität Stuttgart, Dissertation, 1963.

[5] *Penzien, S.:* «Damping Characteristics of prestressed Concrete», ACI-Journal Proc., Vo 61, No. 9, Sept. 1964, pp 1125-1148.

[6] *Denkhaus, G.:* «Über das Verhalten von Spannbetonbalken bei Biegeschwingungen», Beton- und Stahlbetonbau, 1952, Heft 3.

[7] *Müller, F.P.:* «Die Ermittlung der Abweichung vom linearen Formänderungsgesetz sowie die Dämpfung von Spannbeton durch Ausschwingversuche», Beton- und Stahlbetonbau, 54. Jahrgang, 1959, Heft 11, S. 276 bis 278.

[8] *Fritz-de-la-Orta, G.D.:* «Über das Verhalten von Spannbeton-Bauteilen bei dynamischen Beanspruchungen, insbesondere bei Erdbeben», München, 1958.

[9] *Baumann, M., Dieterle, R., Bachmann, H.:* «Neuartige Belastungs- und Messeinrichtungen für Schwingversuche an armierten und vorgespannten Betonprüfkörpern», Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 88, 1978, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.

Verdankungen

Die durchgeführten dynamischen Versuche wurden durch Forschungsbeiträge der Firma Hunziker & Cie AG, Zürich, ermöglicht. Die Armierungsstähle wurden von der von Moos Stahl AG, Luzern, kostenlos zur Verfügung gestellt. Für diese Unterstützung danken die Verfasser herzlich.

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

Internationale Energieagentur / Forschungsprogramme V)*

Minimale Lüftungsraten in Wohn- und Arbeitsräumen

Von Hans Urs Wanner, Zürich

Zur Verminderung von Wärmeverlusten in Gebäuden müssen die Isolationen verbessert sowie Fenster und Türen abgedichtet werden. Dadurch wird jedoch die Zufuhr von Frischluft reduziert und es stellt sich die Frage, welches die minimalen Luftmengen sind, um eine einwandfreie Qualität der Raumluft sicherzustellen und um Beeinträchtigungen der Gesundheit und der Leistungsfähigkeit zu vermeiden.

Am *Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie* der ETH Zürich werden zurzeit Untersuchungen zur Erarbeitung von *Empfehlungen* für *minimale Lüftungsraten in Wohn- und Arbeitsräumen* durchgeführt. Dazu notwendig sind in erster Linie *Kriterien zur Beurteilung der Raumluftqualität*. Solche Kriterien basieren auf messbaren Verunreinigungen der Raumluft sowie auf den subjektiven Beurteilungen durch die Rauminsassen.

Verunreinigungen der Raumluft

Die wichtigsten *Verunreinigungen der Raumluft* sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Je nach Ort, Benützung und Belegung sind die Anteile und Konzentrationen verschieden und deshalb für Gesundheit und Wohlbefinden auch von unterschiedlicher Bedeutung.

Bei den geplanten Untersuchungen geht es nun darum, das Ausmass der möglichen Verunreinigungen in der Raumluft besser zu kennen, ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – vor allem bei längeren Einwirkungen – zu beurteilen sowie auch Empfehlungen auszuarbeiten, wie gesundheitsgefährdende Belastungen vermieden werden können.

Im Mittelpunkt der ETH-Studien stehen die *Verunreinigungen durch den Menschen* in Abhängigkeit seiner Tätigkeiten sowie *Verunreinigungen durch Materialien, Baustoffe* und *Verbraucherprodukte*. Geplant sind Messungen bei experimentellen Bedingungen in einer Klimakammer sowie auch Feldversuche. Zur Beurteilung der Luftqualität werden Messungen des Kohlendioxides und des Formaldehydes sowie auch senorische Geruchsbestimmungen durchgeführt.

Als Beispiel einer Verunreinigungsquelle, die bei reduzierter Lüftung zu erheblichen Belastungen der Raumluft führen kann, seien die *Spanplatten* erwähnt, wie sie in Möbeln sowie zur Ausstattung von Räumen verwendet werden. *Rückstände von aldehydhaltigen Produkten*, die bei der Herstellung von Spanplatten verwendet werden, können die Raumluft kontinuierlich verunreinigen und in der Folge Reizungen der Augen und Atemorgane verursachen. In Tabelle 2 sind einige *Formaldehydkonzentrationen* aufgeführt, die bei kürzlich in *Dänemark* in neuen Wohnräumen durchgeführten Messungen festgestellt wurden. Quelle dieser zum Teil beträchtlichen und über dem noch als zumutbaren Wert (0,1 mg/m³)

*) Vgl. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 13, s. 218, Heft 26, S. 506–507, Heft 32/33, S. 594 und Heft 46, S. 940–941, 1979.