Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke

Working Paper**Author(s):**

Baumann, Karl; Bachmann, Hugo

Publication date:

1988

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000492712>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich 7501(3)

**Durch Menschen verursachte
dynamische Lasten und deren
Auswirkungen auf Balkentragwerke**

Karl Baumann
Hugo Bachmann

CIP- Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Baumann, Karl:

Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren
Auswirkungen auf Balkentragwerke / von Karl Baumann;
Hugo Bachmann. Inst. für Baustatik u. Konstruktion,
Eidgenöss. Techn. Hochsch., Zürich.

- Basel ; Boston ; Berlin: Birkhäuser, 1988

(Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich; Nr. 7501-3)

ISBN 3- 7643- 2231-4

NE: Bachmann, Hugo;; Institut für Baustatik und Konstruktion
<Zürich>: Bericht

Nachdruck verboten.

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen und
der Reproduktion auf photostatischem Wege oder durch Mikrofilm,
vorbehalten.

© 1988 Birkhäuser Verlag Basel
ISBN 3- 7643-2231-4

Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke

von

Dipl. Ing. Karl Baumann
Prof. Dr. Hugo Bachmann

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich
Mai 1988

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Theoretische Grundlagen	2
1.3.1 Harmonische Anregung	2
1.3.2 Spezialfall Resonanz	4
1.3.3 Periodische Anregung	4
1.3.4 Rechenmodelle für die dynamischen Lasten	5
1.4 Versuchsprogramm	6
2. VERSUCHSBALKEN	9
2.1 Konzept der Versuchsbalken	9
2.2 Baustoffe	10
2.2.1 Leichtbeton	10
2.2.2 Schlaffer Bewehrungsstahl	11
2.2.3 Spannstahl	11
2.2.4 Rechnerische Kennwerte	11
2.3 Beschreibung der Versuchsbalken	12
2.3.1 Abmessungen, Spannweiten, Spannkkräfte	12
2.3.2 Bewehrung	12
2.3.3 Herstellung	13
2.3.4 Lager und Lagerverschiebungen	13
2.3.5 Variation der Vorspannkraft	14
2.4 Verhinderung einer zu starken Schädigung während der Versuche	14
3. DURCHFUEHRUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHE	15
3.1 Dynamische Lasten	15
3.1.1 Gehen	15
3.1.2 Laufen	15
3.1.3 Hüpfen	16
3.1.4 Gehen und Laufen auf dem Laufbandtrainer	17
3.2 Zeitlicher Verlauf der dynamischen Last	17
3.2.1 Versuchsanlage	17
3.2.2 Versuchsablauf	17
3.2.3 Messungen und Registrierungen	18
3.2.4 Auswertungen	19
3.3 Balkenschwingungen	20
3.3.1 Versuchsanlage	20
3.3.2 Versuchsablauf	20
3.3.3 Messungen und Registrierungen	22
3.3.4 Auswertungen	22
3.4 Statische Belastungsversuche	23
3.4.1 Versuchsanlage	23
3.4.2 Versuchsablauf	24
3.4.3 Messungen, Registrierungen und Auswertungen	24

	Seite
3.5 Ausschwingversuche	25
3.5.1 Versuchsanlage	25
3.5.2 Versuchsablauf	25
3.5.3 Messungen und Registrierungen	25
3.5.4 Auswertungen	25
3.6 Versuche zur Bestimmung des Balkengewichtes und der Vorspannkraft	27
3.6.1 Balkengewicht	27
3.6.2 Vorspannkraft	27
4. VERSUCHSRESULTATE	28
4.1 Zeitlicher Verlauf der dynamischen Lasten	28
4.1.1 Gehen	28
4.1.2 Laufen	31
4.1.3 Hüpfen	33
4.2 Balkenschwingungen	35
4.2.1 Verschiebungen	36
4.2.2 Beschleunigungen	38
4.2.3 Rechnerische Werte	39
4.3 Statische Belastungsversuche	41
4.3.1 Biegesteifigkeiten	41
4.3.2 Rissbreiten	41
4.4 Ausschwingversuche	42
4.4.1 Eigenfrequenz	42
4.4.2 Dämpfung	42
5. KURZFASSUNG DES BERICHTES	44
5.1 Planung und Durchführung der Versuche	44
5.2 Dynamische Lasten	45
5.3 Balkenschwingungen	48
ZUSAMMENFASSUNG	50
RESUME	51
SUMMARY	52
VERDANKUNGEN	53
LITERATURVERZEICHNIS	54
BEZEICHNUNGEN	55
TABELLEN 1 – 11	57
BILDER 1 – 69	62

1. EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Moderne Bauwerke werden heute mit hochwertigen Baustoffen und unter hoher Ausnützung der Materialfestigkeiten erstellt. Dadurch entstehen grössere Spannweiten und immer schlankere Konstruktionen, wobei sich der Anteil des Eigengewichtes an der meist als statisch angenommenen Gesamtbelastung reduziert. Das kleinere Gewicht und die grössere Schlankheit bewirken oft eine erhöhte Schwingungsanfälligkeit der Tragwerke.

In letzter Zeit treten vermehrt Fälle auf, bei denen Bauwerke durch Menschen zu störenden oder sogar schädlichen Schwingungen angeregt werden. Solche Schwingungen betreffen insbesondere Fussgängerbrücken und Turnhallen. Immer wieder kommt es vor, dass die Schwingungen so stark sind, dass eine Sanierung vorgenommen werden muss [1]. Der Mensch besitzt ein sehr gutes Wahrnehmungsvermögen in bezug auf Vibrationen jeder Art. Er kann sich bereits durch verhältnismässig kleine Schwingungen in seinem Wohlbefinden gestört oder sogar verängstigt fühlen. Durch Menschen erregte Schwingungen stellen nur selten ein Tragsicherheitsproblem dar. Es können vielmehr Schäden an sekundären Tragelementen sowie Beeinträchtigungen des Wohlbefindens des Benützers auftreten. Solche Schwingungen stellen daher meist ein ausgesprochenes Gebrauchstauglichkeitsproblem dar.

Am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) wurden im Rahmen des Forschungsprojektes "Schwingungsprobleme bei Bauwerken" Versuche mit Lastmesseinrichtungen sowie an zwei grossen vorgespannten Leichtbetonbalken durchgeführt. Der vorliegende Versuchsbericht behandelt insbesondere die beim Gehen, Laufen und Hüpfen auftretenden dynamischen Lasten. Ferner werden die bei den Balken gemessenen Schwingungen dargestellt und mit den Ergebnissen einfacher Rechenmodelle verglichen.

1.2 Zielsetzung

Die Untersuchungen dienen der Erforschung der durch Menschen verursachten dynamischen Lasten sowie deren Auswirkungen auf schwingfähige Bauteile. Das Hauptgewicht wird auf die Erforschung der dynamischen Lasten, die beim Gehen, Laufen oder Hüpfen entstehen, gelegt. Es interessieren insbesondere der zeit

liche Verlauf dieser Lasten und das entsprechende Fourier-Amplitudenspektrum. Im weiteren werden an zwei einfachen Balken die Auswirkungen der dynamischen Lasten, insbesondere die Schwingwegamplituden und die Beschleunigungen, untersucht. Dabei geht es darum, die Versuchsergebnisse mit den Resultaten aus einfachen Rechenmodellen zu vergleichen. Damit können die Einflüsse der wichtigsten Parameter der Rechenmodelle erkannt und abgeschätzt werden.

1.3 Theoretische Grundlagen

Im Hinblick auf einfache Stabtragwerke wird im folgenden das Modell des gedämpften Einmassenschwingers verwendet.

1.3.1 Harmonische Anregung

Die Differentialgleichung eines gedämpften Einmassenschwingers für eine harmonische Belastung (Bild 1) lautet:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F_0 \sin \omega_0 t$$

mit: x = Verschiebung
 m = Masse
 c = Dämpfungskonstante
 k = Federsteifigkeit
 ω_0 = Eigenkreisfrequenz der Last

Normalerweise wird die Differentialgleichung leicht umgeschrieben:

$$\ddot{x} + 2\xi \dot{x} + \omega^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \omega_0 t$$

mit: $\xi = \frac{c}{2m \omega}$ = Dämpfungsmass

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{Eigenkreisfrequenz}$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung setzt sich aus der homogenen und der partikulären Lösung zusammen:

$$x(t) = x(h) + x(p) = e^{-\xi \omega t} (A \sin \omega t + B \cos \omega t)$$

$$+ \frac{F_0}{k} \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} [(1-\beta^2) \sin \omega_0 t - 2\xi\beta \cos \omega_0 t]$$

mit: $\beta = \omega_0/\omega = \text{Frequenzverhältnis}$

Die homogene Lösung, deren Konstanten A und B von den Anfangsbedingungen abhängen, wird nicht weiter betrachtet, da sie sehr bald ausgedämpft wird (transiente Lösung). In dieser Arbeit interessiert nur die partikuläre oder stationäre Lösung $x(p)$. Die stationäre Lösung schwingt mit der Kreisfrequenz ω_0 der dynamischen Last, ist dieser gegenüber jedoch phasenverschoben. Das Verhalten des Einmassenschwingers im stationären Zustand lässt sich sehr einfach in der komplexen Ebene darstellen (Bild 2).

Die Resultierende ρ der beiden Vektoren stellt die Schwingwegamplitude des stationären Zustandes dar.

$$\rho = \frac{F_0}{k} [(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2}$$

Der Phasenwinkel, mit welchem die stationäre Lösung der aufgebrachten Kraft hinterhereilt, ist gegeben durch:

$$\varphi_0 = \arctan \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \quad \text{für } 0 \leq \varphi_0 \leq 180^\circ$$

Somit kann die stationäre Lösung auch wie folgt geschrieben werden:

$$x(t) = F_0 \sin(\omega_0 t - \varphi_0)$$

Der Quotient, gebildet durch die resultierende Amplitude ρ und die statische Auslenkung infolge der Kraft F_0 , wird dynamischer Vergrößerungsfaktor D genannt.

$$D = \frac{\rho}{F_0/k} = [(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2}$$

D variiert sehr stark mit dem Frequenzverhältnis β und dem Dämpfungsmass ξ (Bild 3).

1.3.2 Spezialfall Resonanz

Für den Fall von Resonanz ($\beta = 1$) ist der dynamische Vergrößerungsfaktor D umgekehrt proportional zum Dämpfungsmass ξ :

$$D_{\beta=1} = \frac{1}{2\xi}$$

Das Resultat dieser Gleichung stellt zwar nicht das absolute Maximum von D dar. Dieses weicht aber für in der Praxis auftretende Dämpfungsmasse $\xi < 5\%$ nur sehr unwesentlich vom Absolutwert ab.

1.3.3 Periodische Anregung

Die Gleichungen, die im Fall harmonischer Anregung gelten, können einfach auf periodische Anregung übertragen werden. Dies geschieht, indem die periodische Last mit Hilfe der Fourier-Zerlegung in einzelne harmonische Komponenten (Fourier-Koeffizienten) aufgeteilt wird. Für jede harmonische Komponente kann mit den Gleichungen für harmonische Anregung die Verschiebung $x_n(t)$ berechnet werden. Indem die einzelnen harmonischen Anteile dann superponiert werden, kann die totale Verschiebung $x(t)$ auf einfache Weise berechnet werden:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \left(n \frac{2\pi}{T} t \right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \left(n \frac{2\pi}{T} t \right)$$

oder
$$F(t) = c_n \left(\sin n \frac{2\pi}{T} t + \phi_n \right)$$

Die Fourier-Koeffizienten können mit folgenden Ausdrücken berechnet werden:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt ; \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos \left(n \frac{2\pi}{T} t \right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin \left(n \frac{2\pi}{T} t \right) dt ; \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$$

Die Superposition der einzelnen harmonischen Anteile führt für den stationären Zustand zu folgendem Resultat:

$$x(t) = \frac{1}{k} \left(a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(1-\beta_n^2)^2 + (2\xi\beta_n)^2} \{ [a_n 2\xi\beta_n + b_n (1-\beta_n^2)] \sin n\omega_0 t + [a_n (1-\beta_n^2) - b_n 2\xi\beta_n] \cos n\omega_0 t \} \right)$$

1.3.4 Rechenmodelle für die dynamischen Lasten

Die hier beschriebenen Rechenmodelle für die dynamischen Lasten sind als Grundlagen für die Dimensionierung von Stabtragwerken zu verstehen. Das Ziel ist, den stationären Zustand (Amplituden, Beschleunigungen), der durch die dynamischen Lasten beim Gehen, Laufen und Hüpfen entsteht, zu berechnen. Die auftretenden dynamischen Lasten werden wie folgt modelliert [1]:

Gehen

Beim Gehen ist stets ein Bodenkontakt vorhanden. Der zeitliche Verlauf der dynamischen Last setzt sich aus harmonischen Lastanteilen zusammen.

$$F_p(t) = G + \Delta G_1(2\pi f_s t) + \Delta G_2(\sin 4\pi f_s t - \varphi_2) + \Delta G_3(6\pi f_s t - \varphi_3)$$

- mit:
- G = Eigengewicht des Fussgängers
 - ΔG_1 = Lastanteil (Amplitude) der 1. Harmonischen
 - ΔG_2 = Lastanteil (Amplitude) der 2. Harmonischen
 - ΔG_3 = Lastanteil (Amplitude) der 3. Harmonischen
 - f_s = Schrittfrequenz (auch Gehfrequenz f_G)
 - φ_2 = Phasenwinkel zwischen der 1. und 2. Harmonischen
 - φ_3 = Phasenwinkel zwischen der 1. und 3. Harmonischen
 - T_p = Periode der Last = $1/f_s$

Laufen, Hüpfen ("Halbsinus-Modell")

Im Gegensatz zum Gehen geht beim Laufen und Hüpfen der Bodenkontakt zeitweise verloren. Deshalb kann der zeitliche Verlauf der dynamischen Last als "Halbsinus-Modell" gemäss Bild 4 idealisiert werden:

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p G \sin(\pi t/t_p) & \text{für } t \leq t_p \\ 0 & \text{für } t_p < t \leq T_p \end{cases}$$

mit: k_p = $F_{p,max}/G$ = dynamischer Stossfaktor
 $F_{p,max}$ = Maximalwert der Last
 G = Eigengewicht des Läufers bzw. des Hüpfenden
 t_p = Kontaktdauer
 T_p = Periode der Last = $1/f_s$

Auch diese "Halbsinus-Last" kann als Fourier-Reihe ausgedrückt werden:

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^{\infty} \Delta G_i \cos[2\pi i f_s (t-t_p/2i)]$$

mit: G = Eigengewicht des Läufers bzw. des Hüpfenden
 ΔG_i = Lastanteil der i -ten Harmonischen
 i = Nummer der i -ten Harmonischen
 f_s = Schrittfrequenz (auch Lauffrequenz f_L und Hüppfrequenz f_H)
 t_p = Kontaktdauer

Bei der Berechnung einer erzwungenen Schwingung ist normalerweise wegen der sehr kleinen Bauwerksdämpfung nur eine einzige Harmonische ΔG_i massgebend. Deshalb kann meist auf die Berücksichtigung der Phasenverschiebung verzichtet werden.

1.4 Versuchsprogramm

Der zeitliche Verlauf der dynamischen Lasten "Gehen", "Laufen" und "Hüpfen" wurde mit einer Kraftmessplatte des Laboratoriums für Biomechanik der ETH Zürich aufgenommen. Die Platte wurde vorerst auf einen schwingungsfähigen einfachen Balken (Balken B1) montiert (Bild 5), damit auch die Interaktion von Last und Balken erfasst werden konnte. Anschliessend wurden die zeitlichen Verläufe derselben Einwirkungen auch mit einer auf starrem Boden montierten Kraftmessplatte gemessen.

Die Auswirkungen der dynamischen Lasten auf zwei einfache Balken (Balken B1 = 19 m lang und Balken B2 = 14 m lang) wurden in der Versuchsanlage (Bild 16) gemessen. Die beiden Balken wurden aus vorgespanntem Leichtbeton (Leca hade) in

der Forschungshalle der ETH-Hönggerberg hergestellt. Die Abmessungen und Bewehrungen gehen aus den Bildern 16 und 17 hervor. Die Lager (Bilder 9, 10 und 18) waren derart gestaltet, dass sie in Längsrichtung verschoben werden konnten. Durch eine Veränderung der Spannweite (und allenfalls der Vorspannkraft) konnte auf einfache Weise eine Änderung der Eigenfrequenz erzielt werden. Für den Balken B1 waren Grundfrequenzen f_1 von 1.7 Hz bis 4 Hz und für den Balken B2 solche von 3.6 Hz bis 7.5 Hz möglich. Zwecks Registrieren der Balkenantworten wurden beide Balken mit je zwei Weg- und Beschleunigungsgebern ausgerüstet (Bild 11). Das Ziel der Messungen war die Ermittlung von Resonanzkurven für Gehen, Laufen und Hüpfen, wobei die Grundfrequenz der Balken f_1 für verschiedene Resonanzkurven variiert wurde.

Die Versuchsprogramme zur Bestimmung der zeitlichen Verläufe der Lasten und zur Messung der Balkenantworten waren grundsätzlich gleich und wurden nach den Anregungsarten Gehen, Laufen und Hüpfen unterteilt:

- Gehen

Die Anregung der Balken erfolgte durch eine Versuchsperson, welche sich mit unterschiedlichen Schrittfrequenzen über den Balken bewegte ($1.6 \text{ Hz} \leq f_G \leq 2.4 \text{ Hz}$). Bei der Bestimmung der zeitlichen Verläufe der Lasten wurden nebst dem Einfluss der Gehfrequenz auch die Einflüsse von unterschiedlichem Schuhwerk und unterschiedlichen Versuchspersonen kurz untersucht. Um den Effekt einer örtlich stationären Last zu simulieren, wurden auch einige Versuche mit einem Laufbandtrainer (Bild 6) durchgeführt.

- Laufen

Die Anregung der Balken beim Laufen erfolgte durch eine Versuchsperson, die mit unterschiedlichen Schrittfrequenzen über den Balken lief ($2 \text{ Hz} \leq f_L \leq 3 \text{ Hz}$). Bei der Bestimmung der zeitlichen Verläufe der Lasten wurden nebst dem Einfluss der Lauffrequenz auch die Einflüsse unterschiedlicher Arten des Aufsetzens des Fusses beim Laufen kurz untersucht (Bilder 21 bis 23).

- Hüpfen

Die Anregung der Balken und die Bestimmung der zeitlichen Verläufe der Lasten erfolgten durch Hüpfen an Ort mit gleichzeitigem Auftreffen beider Füße der Versuchsperson und mit verschiedenen Hüppfrequenzen ($1.6 \text{ Hz} \leq f_H \leq 3.4 \text{ Hz}$).

Die dynamischen Eigenschaften der Balken (Eigenfrequenz, Dämpfung) wurden mit Ausschwingversuchen ermittelt. Die Anregung erfolgte durch eine in Balkenmitte hüpfende Person, die unmittelbar vor Messbeginn den Balken verliess. Mit einer statischen Belastungseinrichtung (Bilder 12, 13, 19) konnten die Biegesteifigkeit und die Rissbreiten in dem jeweils interessierenden Durchbiegungsbereich gemessen werden. Die Vorspannkraft (Bild 7) und die Balkenmasse (Bild 8) wurden mit speziellen Kraftmessdosen möglichst genau ermittelt.

2. VERSUCHSBALKEN

2.1 Konzept der Versuchsbalken

Die wichtigste Anforderung an die beiden Balken war die vorgegebene Grössenordnung der möglichen Grundfrequenz von $f_1 \approx 2$ Hz für den Balken B1 und von $f_1 \approx 4$ Hz für den Balken B2. Diese Anforderungen resultierten aus der Tatsache, dass die mittlere Schrittfrequenz eines Menschen beim Gehen etwa 2 Hz beträgt. Anhand des Balkens B1 wollte man insbesondere die Anregung durch die 1. Harmonische und mit dem Balken B2 diejenige durch die 2. Harmonische des zeitlichen Verlaufs der Last beim Gehen und Hüpfen studieren. Bei beiden Balken sollte zudem entweder durch Veränderung des Lagerabstandes (Spannweite) oder durch Veränderung der Vorspannkraft (und somit der Biegesteifigkeit bei teilweiser Vorspannung) die Möglichkeit bestehen, die Eigenfrequenz in einem vorgegebenen Bereich zu variieren. Der gewünschte Frequenzbereich betrug beim Balken B1 mindestens $1.7 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 2.3 \text{ Hz}$ und beim Balken B2 mindestens $3.6 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 4.5 \text{ Hz}$. Um einen möglichst grossen Spielraum zu gewinnen, wurde vorerst eine Kombination beider Massnahmen vorgesehen. In den Versuchen wurde dann jedoch die Vorspannkraft in der Regel auf dem nominellen Höchstwert belassen. Eine Ausnahme bildeten die Versuche am Balken B1 mit der Eigenfrequenz $f_1 = 1.7 \text{ Hz}$, für welche die Vorspannkraft etwas verringert werden musste.

Wie im Abschnitt 1.3 'Theoretische Grundlagen' erwähnt, setzt sich die allgemeine Lösung der Differentialgleichung des Einmassenschwingers aus der homogenen und der partikulären Lösung zusammen. Die homogene Lösung wird zwar weggedämpft, doch reicht das einmalige Ueberqueren des Balkens beim Gehen und Laufen nicht aus, damit genügend Schwingzyklen für ein vollständiges Wegdämpfen entstehen und somit eine stationäre Schwingung erreicht wird. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer möglichst grossen Spannweite, um einen hohen Anteil der stationären (partikulären) Schwingung an der Gesamtschwingung zu ermöglichen.

Eine andere Lösung hätte darin bestanden, die dynamische Last ausschliesslich mit Hilfe eines Laufbandtrainers örtlich stationär aufzubringen. Diese Lösung hätte jedoch die bei Fussgängerbauwerken vorhandenen tatsächlichen Verhältnisse nicht befriedigend erfasst.

Die Forderung nach möglichst grossen Spannweiten musste wegen der zulässigen Traglast von 100 kN des Krans in der Forschungshalle eingeschränkt werden. In

diesem Zusammenhang hatte die Verwendung von Leichtbeton anstatt von Kiesbeton Vorteile, indem bei einem gleichen Gesamtgewicht ein längerer Träger hergestellt werden konnte. Zudem standen aus früheren Forschungsarbeiten [2], [3] und [4] über das dynamische Verhalten vorgespannter Leichtbetonkonstruktionen bereits wertvolle Erfahrungen zur Verfügung. Mit der Leichtbetonausführung bestand auch eher die Gewähr, beim Balken B1 durch Verringerung der Vorspannkraft eine Eigenfrequenz von $f_1 = 1.7$ Hz zu erreichen.

Im weiteren entschloss man sich, die Balken B1 und B2 gemäss der Belastungsnorm SIA E 160 (1985), Kap. "Fussgängerbauwerke", auf Tragfähigkeit zu bemessen, um ein praxisnahes Bauteil zu erzielen. Zudem wurde wegen des möglichen vollständigen Ablassens der Vorspannkraft die schlaffe Längsbewehrung so stark bemessen, dass sie in der Lage war, die Beanspruchungen aus Eigengewicht plus einer in Balkenmitte wirkenden Einzelkraft $F = 40$ kN mit einer Stahlspannung $\sigma_s = 460$ N/mm² (nominelle Fließspannung) aufzunehmen. Die Einzelkraft $F = 40$ kN berücksichtigt dabei die wie folgt angenommene dynamische Last einer in Balkenmitte hüpfenden Person:

$$F \approx G \frac{1}{2\epsilon} \quad (\text{Resonanzfall})$$

$$F \approx 0.75 \frac{1}{2 \cdot 0.01} \approx 40 \text{ kN}$$

2.2 Baustoffe

2.2.1 Leichtbeton

Der Leichtbeton stammte aus einer Fertigbetonfabrik. Er wurde mit 40 Volumenprozenten Sand und 350 kg/m³ Zement in plastischem Zustand geliefert. Um eine hohe Druckfestigkeit zu erreichen wurde als Zuschlagsmaterial Blähton leca hade verwendet. Das eingebrachte Grösstkorn wies einen Durchmesser von 15 mm auf.

Zur Ermittlung der Betonkennwerte wurden für beiden Balken je drei Würfel mit 150 mm Seitenlänge sowie je ein Zylinder 150 x 300 mm hergestellt. Bei einem Probenalter von 29 bzw. 30 Tagen für den Balken B1 und von 35 Tagen für den Balken B2 wurden an den Würfeln die Druckfestigkeit und an den Zylindern der Elastizitätsmodul und die Prismendruckfestigkeit ermittelt. Die Resultate sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

2.3 Beschreibung der Versuchsbalken

2.3.1 Abmessungen, Spannweiten, Spannkkräfte

Die Abmessungen der Versuchsbalken, die beide als einfache Balken gelagert sind, gehen aus den Bildern 16 und 17 hervor.

Gesamtlänge von B1 $l = 19.0 \text{ m}$

Gesamtlänge von B2 $l = 14.0 \text{ m}$

Betonabmessungen von B1 und B2 sind identisch:

Gesamthöhe $h = 0.48 \text{ m}$

Stegbreite $b_w = 0.40 \text{ m}$

Plattenbreite $b_f = 0.90 \text{ m}$

Plattendicke $h_f = 0.18 \text{ m}$

Die Spannweite des Balkens B1 betrug bei einer Eigenfrequenz von $f_1 = 2 \text{ Hz}$, $l = 18.65 \text{ m}$. Dabei betrug die Vorspannkraft $P \sim 935 \text{ kN}$ (Balkenmitte, Reibungsverlust 2%). Durch Verschieben beider Auflager liess sich bei $l = 11.70 \text{ m}$ eine Eigenfrequenz $f_1 = 3.96 \text{ Hz}$ erzielen. Die Vorspannkraft wurde stets auf $P \approx 935 \text{ kN}$ (Balkenmitte) belassen, ausser beim Versuch mit einer Eigenfrequenz von $f_1 = 1.7 \text{ Hz}$, bei dem sie auf $P \approx 720 \text{ kN}$ (Balkenmitte) abgesenkt wurde und die Spannweite $l = 18.70 \text{ m}$ betrug.

Die Spannweite des Balkens B2 betrug bei einer Eigenfrequenz von $f_1 = 4 \text{ Hz}$ 13.20 m . Dabei betrug die Vorspannkraft $P \sim 610 \text{ kN}$ (Balkenmitte, Reibungsverlust 2%); sie wurde während der Versuche konstant gehalten. Durch Verschieben der Auflager liess sich bei $l = 8.50 \text{ m}$ eine Eigenfrequenz von $f_1 = 7.12 \text{ Hz}$ erzielen.

2.3.2 Bewehrung

Die Querschnitte und Anordnungen der schlaffen Bewehrungen und der Spannbewehrungen gehen aus den Bildern 16 und 17 hervor. Die Spannglieder wurden so gewählt, dass eine volle Vorspannung (rechnerische Zugspannungen am unteren Rand in Feldmitte $= 0 \text{ N/mm}^2$) beim Balken B1 für $\sim 120\%$ des Eigengewichtes bei $l = 18.65 \text{ m}$ ($f_1 \approx 2 \text{ Hz}$) und beim Balken B2 für $\sim 160\%$ des Eigengewichtes bei $l = 13.20 \text{ m}$ ($f_1 \approx 4 \text{ Hz}$) möglich war.

Die Würfeldruckfestigkeit wurde mit einer Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = 0.0022/\text{min}$ ermittelt. Der E-Modul wurde an den Zylindern als Sekantenmodul im Spannungsintervall von 0 bis $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ bestimmt. Die Dehnungen wurden auf einer Messlänge von 100 mm ermittelt. Die Zylinder wurden verformungsgesteuert mit $\dot{\epsilon} = 0.0001/\text{min}$ bis zum Bruch belastet.

2.2.2 Schlaffer Bewehrungsstahl

Die schlaffe Längs- und Bügelbewehrung bestand aus kaltverformtem hochwertigem Bewehrungsstahl (Balken B1: TOPAR 500s; Balken B2: BOX-ULTRA). Die von den Stahl-Lieferanten garantierten Kennwerte können der Tabelle 3 entnommen werden.

2.2.3 Spannstahl

Es wurden Paralleldrahtbündel und Verankerungen Typ BBRV verwendet. Die Drähte mit Durchmesser 7 mm wiesen eine glatte Oberfläche auf. Die vom Spannstahl-Lieferanten garantierten Kennwerte sind in der Tabelle 3 enthalten.

2.2.4 Rechnerische Kennwerte

Für die Bemessung der Balken B1 und B2 wurden folgende Baustoffkennwerte verwendet:

Leichtbeton:

Raumlast	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
Druckfestigkeit	$f_c = 18 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul	$E_{co} = 21'000 \text{ N/mm}^2$
untere Schubspannungsgrenze	$\tau_c = 0.9 \text{ N/mm}^2$

Schlaffer Stahl:

Fliessspannung	$f_{sy} = 460 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul	$E_s = 210'000 \text{ N/mm}^2$

Spannstahl:

Zugfestigkeit	$f_{py} = 1'670 \text{ N/mm}^2$
max. Spannung nach Vorspannen	$\sigma = 1'169 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul	$E_p = 201'000 \text{ N/mm}^2$

Eine Besonderheit betrifft die schlaffe Längsbewehrung. Sie wurde bei beiden Balken so bemessen, dass die Stahlspannung für Eigengewicht plus eine Einzellast $F = 40 \text{ kN}$ in Balkenmitte gerade die Fließspannung $\sigma_s = f_{sy} = 460 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Die Einzelkraft $F = 40 \text{ kN}$ berücksichtigt die dynamische Last einer in Balkenmitte hüpfenden Versuchsperson für den Resonanzfall (vgl. Abschnitt 2.1). Diese Bedingung ergab sich daraus, dass die Vorspannkraft P im Laufe der Versuche eventuell vollständig hätte abgelassen werden konnte.

2.3.3 Herstellung

Die Versuchsbalken B1 und B2 wurden in der Forschungshalle der ETH-Hönggerberg konventionell hergestellt, indem der Leichtbeton direkt ab Trommelmischer in die Holzschalungen eingebracht und mit Nadelvibratoren verdichtet wurde. Um grössere Schwindrisse zu verhindern, wurden die Balkenoberflächen während der beiden ersten Tage nach dem Betonieren nass gehalten. Die beiden Balken wurden nach einer Lagerung von einem Monat ausgeschalt, vorgespannt und in die Versuchsanlage eingebaut. Die Spannglieder wurden nicht injiziert, um die Vorspannkraft nachträglich verändern zu können.

2.3.4 Lager und Lagerverschiebungen

Als festes Lager wurde ein Stahllinienkipplager (Bild 9) verwendet. Das bewegliche Lager (Bild 10) war als Stahlrollenlager ausgebildet. Beide Lager besaßen oben und unten je eine massive Stahlplatte für die saubere Krafteinleitung und entsprachen der Forderung, reibungsarm und spielfrei zu sein.

Die Möglichkeit, durch Aenderung der Spannweite mit demselben Balken verschiedene Grundfrequenzen zu erreichen, hat sich für die beschriebenen Versuche als einfach und zweckmässig erwiesen. Mit Hilfe zweier 100 kN-Pressen konnten die Versuchsbalken zuerst an der einen, dann an der anderen Seite angehoben und somit die Auflager in die gewünschte Position verschoben werden.

Ein Vorteil dieses Konzeptes bestand auch darin, dass praktisch immer die ganze Vorspannkraft auf den Balken belassen werden konnte. Dadurch konnten die Versuche weitgehend bei linearem Tragwerksverhalten (keine oder höchstens beschränkte Rissöffnung) durchgeführt werden. Ein Nachteil der einfachen Verschiebbarkeit der Lager bestand darin, dass keine negativen Auflagerkräfte aufgenommen werden konnten. Dies spielte beim Balken B2 eine Rolle, der bei

Resonanz (Hüpfen einer Versuchsperson) sehr hohe Beschleunigungen aufwies, was zu einem "Abwandern" der Lager aus der Sollposition führte.

2.3.5 Variation der Vorspannkraft

Die zweite Möglichkeit, mit demselben Balken verschiedene Eigenfrequenzen zu erreichen, besteht in der Aenderung der Biegesteifigkeit (gewisse Rissöffnung, abhängig von der Durchbiegung). Mit einem nichtinjizierten Spannglied kann dies durch Aenderung der Vorspannkraft auf einfache Weise erfolgen. In den Versuchen wurde diese Möglichkeit benutzt, um mit dem Balken B1 auf eine Eigenfrequenz $f_1 = 1.7$ Hz zu gelangen, indem die Vorspannkraft von $P \approx 935$ kN auf ≈ 720 kN reduziert wurde (Werte in Balkenmitte). Bei allen anderen Versuchen betrug die Vorspannkraft stets $P \approx 935$ kN.

2.4 Verhinderung einer zu starken Schädigung während der Versuche

Für den Balken B1 wurden Stahlspannungen in der untersten Lage der schlaffen Bewehrung im gerissenen Zustand berechnet und ein zulässiger Grenzwert von $\sigma_s \approx 150$ N/mm² ins Auge gefasst. Für die Spannweite $l = 18.65$ m ergaben sich bei maximaler Vorspannkraft von 935 kN (Balkenmitte) für eine vertikale Relativverschiebung (Durchbiegung) von ± 50 mm in Balkenmitte Stahlspannungen $\sigma_s \approx 85$ N/mm² (Bild 20). Für die reduzierte Vorspannkraft des Balkens B1 von 720 kN (Balkenmitte) für dieselbe Relativverschiebung von ± 50 mm in Balkenmitte wurde eine Stahlspannung $\sigma_s \approx 145$ N/mm² berechnet. Diese beiden Ergebnisse zeigen, dass keine grössere Schädigung während der Versuche zu erwarten war, da die Relativverschiebungen in Balkenmitte nur selten wesentlich mehr als ± 50 mm betrugen.

Für den Balken B2 musste keine besondere Berechnung der Stahlspannungen vorgenommen werden, da bei diesem Balken die Vorspannkraft $P = 610$ kN (Balkenmitte) ausreichte, um in den meisten Versuchsstadien Biegerisse zu vermeiden.

3. DURCHFUEHRUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHE

3.1 Dynamische Lasten

Eine allgemeine Uebersicht über die verwendeten Begriffe und die zugehörigen Schritt- bzw. Hüppfrequenzen beim Gehen, Laufen und Hüpfen gibt Bild 24.

3.1.1 Gehen

In diesem Versuchsbericht umfasst Gehen das Spazieren (niedrige Schrittfrequenz um 1.5 Hz), das normale Gehen (mittlere Schrittfrequenz um 2 Hz) und das rasche Gehen (hohe Schrittfrequenz um 2.3 Hz).

Beim Gehen überschneiden sich die zeitlichen Verläufe der Lasten des linken und des rechten Fusses leicht, wodurch stets Bodenkontakt vorhanden ist. Die Schrittfrequenz f_G beim Gehen variierte in den Versuchen von $f_G = 1.3$ Hz bis zu $f_G = 2.4$ Hz und wurde durch ein geeichtes Metronom vorgegeben.

3.1.2 Laufen

Laufen umfasst in diesem Versuchsbericht das Traben (niedrige Schrittfrequenz um 2 Hz), das normale Laufen (Dauerlaufen, mittlere Schrittfrequenz um 2.6 Hz) und das rasche Laufen (hohe Schrittfrequenz um 3 Hz).

Im Gegensatz zum Gehen geht beim Laufen der Bodenkontakt zeitweise verloren. Das Verhältnis Kontaktdauer t_p /Periodendauer T_p (Bild 35) nimmt mit zunehmender Schrittfrequenz leicht ab.

Die Schrittfrequenz beim Laufen variierte in den Versuchen von $f_L = 2$ Hz bis zu $f_L = 3.0$ Hz. Sie wurde ebenfalls durch ein Metronom vorgegeben.

Beim Laufen wurde der Laufstil, im speziellen die Art des Aufsetzens des Fusses auf den Boden, bewusst berücksichtigt, da sie auf den zeitlichen Verlauf der Last einen grossen Einfluss hat. Im wesentlichen kann zwischen drei verschiedenen Laufstilen unterschieden werden (Bilder 21, 22, 23):

Bild 21 zeigt eine Person, die mit der Ferse aufsetzt, um anschliessend wie beim Gehen den Fuss abzurollen und mit den Zehen wieder abzustossen. Dieser Laufstil wird von den meisten Hobby-Läufern angewendet.

Bild 22 zeigt eine andere Person, die nun nicht mehr nur mit der Ferse, sondern fast mit der ganzen Fusssohle aufsetzt. Dabei ist zu beachten, dass die Aussenristpartien des Fusses weit mehr belastet werden als die Innenristpartien. Der weitere Bewegungsablauf erfolgt ähnlich wie beim ersten Laufstil mit einem Abrollen und einem Abstossen. Die Kontaktaufer t_p dieses Bewegungsablaufs ist deutlich kürzer als jene der ersten Lauftechnik. Der Laufstil gemäss Bild 22 wird von sportlich erfahrenen Läufern angewendet.

Bild 23 schliesslich zeigt den Laufstil eines sehr guten Läufers oder Sprinters. Dabei wird nur noch auf den Aussenpartien des Fussballens aufgesetzt (Ferse hat keinen Bodenkontakt) und sofort wieder abgestossen. Die Kontaktdauer t_p ist dabei wiederum kürzer als diejenige der zweiten Lauftechnik.

3.1.3 Hüpfen

In den Versuchen wurde beim Hüpfen stets mit beiden Beinen gleichzeitig aufgesetzt ("beidbeiniges Hüpfen"). Die mit dem Metronom vorgegebene Hüpffrequenz variierte von $f_H = 1.4 \text{ Hz}$ bis $f_H = 3.4 \text{ Hz}$. In diesem Versuchsbericht wird "langames Hüpfen" für Hüpffrequenzen $f_H < 2 \text{ Hz}$, "normales Hüpfen" für $2 \text{ Hz} < f_H < 3 \text{ Hz}$ und "rasches Hüpfen" für $f_H > 3 \text{ Hz}$ verwendet.

Es wird zwischen einem intensiven und einem natürlichen Hüpfen unterschieden. Beim intensiven Hüpfen wird versucht, so hoch als möglich zu springen. Als natürliches Hüpfen wird ein kraftsparendes Hüpfen, das ohne grosse Anstrengung über längere Zeit durchgeführt werden kann, bezeichnet. Das natürliche Hüpfen beschränkt sich aus physiologischen Gründen auf Hüpffrequenzen zwischen $\sim 2.0 \text{ Hz}$ und 3.2 Hz . Intensives Hüpfen ist auch für kleinere Frequenzen (Frequenzbereich ~ 1.2 bis 3 Hz) möglich. Hüpffrequenzen, die über etwa $f_H = 3 \text{ Hz}$ liegen, sind beim Hüpfen mit gleichzeitigem Aufsetzen beider Beine kaum mehr möglich.

3.1.4 Gehen und Laufen auf dem Laufbandtrainer

Mit Hilfe eines Laufbandtrainers (Bild 16) konnte auch für Gehen und Laufen eine örtlich stationäre dynamische Last wie beim Hüpfen erzielt und die zeitlich stationäre Balkenantwort gemessen werden.

Für Gehen hat der Laufbandtrainer relativ gut funktioniert, beim Laufen mit mittleren und hohen Schrittfrequenzen traten jedoch Probleme auf. Bedingt durch das Gerät war das Einhalten einer konstanten Schrittfrequenz kaum möglich.

3.2 Zeitlicher Verlauf der dynamischen Lasten

3.2.1 Versuchsanlage

Das Laboratorium für Biomechanik der ETH Zürich stellte eine Kraftmessplatte zur Verfügung, die in der Mitte des in Resonanz mit der Geh-, Lauf- oder Hüppfrequenz stark schwingenden Balkens montiert wurde (Bild 5). Sie ist 45 cm lang und 37 cm breit. Die Oberfläche ist mit einem dünnen, rutschfesten Sportbelag versehen. Ausser mit Hilfe der auf dem Balken B1 montierten Kraftmessplatte wurde am Laboratorium für Biomechanik mit einer zweiten, auf dem Boden, d.h. auf starrer Unterlage montierten Kraftmessplatte der zeitliche Verlauf der dynamischen Lasten gemessen. Die zweite Platte, 90 cm lang und 60 cm breit und mit einem Sportbelag auf der Oberfläche wie bei der ersten Platte auf dem Balken B1, ist in einer Aussparung im Kellerboden des Laborgebäudes fest installiert.

3.2.2 Versuchsablauf

Das Hauptgewicht wurde auf die Messungen mit der Kraftmessplatte auf dem Balken B1 gelegt. Die Messungen, die mit Hilfe der Kraftmessplatte auf starrer Unterlage durchgeführt wurden, waren von zweitrangiger Beutung und sollten Hinweise auf die Unterschiede zwischen schwingender und starrer Unterlage geben.

Mit der Kraftmessplatte auf dem Balken B1 wurde für die dynamischen Lasten Gehen, Laufen und Hüpfen ein systematisches Messprogramm durchgeführt (Tabellen 4 und 5). Die Messungen wurden für die drei verschiedenen dynamischen Einwirkungen getrennt durchgeführt:

- Gehen:

Im Frequenzband von $1.6 \text{ Hz} \leq f_G \leq 2.4 \text{ Hz}$ wurden für Frequenzstufen von $\sim 0.1 \text{ Hz}$ je mindestens drei Versuche zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Last durchgeführt. Die Last wurde stets durch die gleiche Versuchsperson aufgebracht. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlichen Schuhwerks (Halbschuhe, Turnschuhe) auf den zeitlichen Verlauf der Last untersucht. Schliesslich wurde auch mit verschiedenen Versuchspersonen bei einer bestimmten Schrittfrequenz ($f_G = 2 \text{ Hz}, 2.4 \text{ Hz}$) die individuell unterschiedliche Gehart berücksichtigt (Tabelle 5).

- Laufen

Im Frequenzband von $2 \text{ Hz} \leq f_L \leq 3 \text{ Hz}$ wurden durch eine Versuchsperson für Frequenzstufen von 0.1 bis 0.2 Hz je mindestens drei Versuche zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Last durchgeführt. Der von der Versuchsperson ausgeübte Laufstil war eine Mischung der in den Bildern 22 und 23 beschriebenen Techniken (Abschnitt 3.1.2). Zusätzlich wurde der Einfluss anderer Laufstile (Bilder 21, 22, 23) sowie verschiedener Versuchspersonen (Tabelle 5) auf den zeitlichen Verlauf der Last studiert.

- Hüpfen

Im Frequenzband von $1.4 \text{ Hz} \leq f_H \leq 3.4 \text{ Hz}$ wurden durch eine Versuchsperson für Frequenzstufen von 0.1 Hz bis 0.2 Hz systematisch Versuche zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Last durchgeführt.

Die ergänzenden Messungen mit der Kraftmessplatte auf starrer Unterlage wurden in geringerem Umfang, jedoch mit ähnlicher Systematik wie beim Balken B1 durchgeführt (Tabelle 4).

3.2.3 Messungen und Registrierungen

Die Kraft wurde bei beiden Kraftmessplatten mit Hilfe von Piezokristallen, die sich an den vier Eckpunkten der Platten befinden, gemessen. Das Messprinzip basiert auf der Eigenschaft der Piezokristalle, unter Druck eine elektrische Spannung zu erzeugen.

In den Versuchen wurde jeweils nur die Vertikalkomponente der dynamischen Last gemessen.

Die Spannungssignale der auf dem Balken B1 montierten Kraftmessplatte wurden über einen Verstärker auf einem Magnetband aufgezeichnet. Die Messsignale der auf starrer Unterlage installierten Kraftmessplatte wurden verstärkt und von einem direkt angeschlossenen Computer aufbereitet und ausgedruckt.

3.2.4 Auswertungen

Die auf Magnetband gespeicherten Messsignale der Kraftmessplatte des Balkens B1 wurden mit einem Funktionsanalyser (Schlumberger 1200 Signal-Processor) in der gewünschten Art aufbereitet und mit dem über den Funktionsanalyser gesteuerten Plotter aufgezeichnet. Der Funktionsanalyser und der Plotter sind im Bild 14 dargestellt.

Die Fourier-Analyse der erhaltenen zeitlichen Verläufe der Lasten aus beiden Kraftmessplatten konnte nicht mit dem Funktionsanalyser durchgeführt werden.

Infolge der geringen Abmessungen der Kraftmessplatte (nur einmaliges Auftreten eines Fusses) konnte beim Gehen und Laufen pro Versuch nur ein einziger Zeitverlauf der Last aufgenommen werden. Um mit dem Funktionsanalyser das Fourier-Amplitudenspektrum für eine periodische Last zu ermitteln, müssen jedoch mindestens zehn Zeitverläufe der Last vorhanden sein.

Beim Hüpfen, das örtlich stationär durchgeführt werden konnte, war es möglich, beliebig viele Zeitverläufe aufzuzeichnen. Das Fourier-Amplitudenspektrum, das aus einer Serie von Zeitverläufen mit dem Funktionsanalyser berechnet wurde, konnte jedoch für eine weitere Auswertung nicht verwendet werden. Es enthielt nicht die für eine Fourier-Reihe erforderlichen Fourier-Koeffizienten, die nur bei den ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz auftreten, sondern jeweils auch Amplitudenwerte nahe bei den ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz. Das Resultat war somit eine Kurve für die Amplitudendichte wie sie typischerweise bei der Berechnung des Fourier-Integrals entsteht.

Die Fourier-Analyse wurde deshalb mit einem vorhandenen Programm "Fourier-Analyse" auf einem Taschenrechner HP 41C durchgeführt. Als Grundlage für die Analyse diente jeweils ein einziger zeitlicher Verlauf der Last (1 Periode). Dabei wurde angenommen, beim Gehen, Laufen und Hüpfen handle es sich um periodische Vorgänge, von denen eine Fourier-Reihe berechnet werden kann. Jeder zeit-

liche Verlauf der Last (Kraftimpuls) wurde mit 15 bis 30 Stützstellen ausgewertet. Bei der Auswahl eines Kraftimpulses für die Analyse wurde vor allem beim Hüpfen darauf geachtet, aus einer Serie von ca. zehn Zeitverläufen einen repräsentativen Kraftimpuls zu wählen. Durch leicht ungleichmässiges Hüpfen entstehen in einer solchen Serie nämlich automatisch Variationen im zeitlichen Verlauf der dynamischen Last. Als repräsentativer Kraftimpuls wurde jeweils ein solcher mit hohem Stossfaktor k_p ausgewählt, um bei der Fourier-Analyse eher hohe Werte für die Fourier-Amplitudenkoeffizienten zu erhalten.

3.3 Balkenschwingungen

3.3.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage auf dem Aufspannboden der Forschungshalle der ETH-Hönggerberg ist im Bild 15 schematisch dargestellt. Die Versuchsbalken B1 und B2 sind im Kapitel 2 eingehend beschrieben.

3.3.2 Versuchsablauf

Balken B1

Für die Versuchsarten Gehen, Laufen und Hüpfen auf dem Balken B1 wurde pro Balkeneigenfrequenz ein systematisches Programm ähnlich demjenigen für die Kraftmessplatte auf B1 (Tabelle 4) durchgeführt. Die Versuche mit dem Ziel, Resonanzkurven zu ermitteln, wurden jedoch nur mit einer einzigen Versuchsperson und ohne spezielle Variationen des Geh- oder Laufstils durchgeführt. Um verschiedene Resonanzkurven zu erhalten, wurde das gleiche Versuchsprogramm bei verschiedenen Balkeneigenfrequenzen durchgeführt. Vor allem wurde bei Eigenfrequenzen $f_1 = 2 \text{ Hz}$, 2.3 Hz und 1.7 Hz gemessen. Einige wenige zusätzliche Versuche wurden bei höheren Eigenfrequenzen, d.h. bis zu $f_1 = 4 \text{ Hz}$, durchgeführt. Die Balkeneigenfrequenzen, bei denen gemessen wurde, sind zusammen mit der zugehörigen Spannweite in Tabelle 6 aufgeführt. Für Gehen und Laufen wurde zusätzlich ein Laufbandtrainer (Bild 6) eingesetzt. Für die getrennt nach Anregungsart durchgeführten Versuche diente jeweils ein Metronom als Taktgeber.

- Gehen

Die Versuchsperson startete an einem Ende des sich in Ruhe befindenden Balkens B1, bewegte sich bis zum anderen Balkenende, kehrte um und ging auf dem Balken

zur Ausgangsposition zurück, usw. Für die Auswertungen wurde aber nur der erste Durchgang (Balkenanfang bis -ende) berücksichtigt (Abschnitt 3.3.4).

- Laufen

Die Versuchsperson startete an einem Ende des sich in Ruhe befindenden Balkens B1, überquerte laufend den Balken und verliess ihn am anderen Ende. Die relativ kurze Balkenlänge verhinderte ein ideal gleichmässiges Laufen, da auf der vorgegebenen Länge am Balkenanfang die Beschleunigung auf die gewünschte Schrittfrequenz und vor dem Balkenende die Verzögerung zu erfolgen hatten.

- Hüpfen

Die Versuchsperson hüpfte auf dem Balken B1 in 2 m Entfernung von der Balkenmitte während ca. 20 Sekunden in der vorgegebenen Hüpf Frequenz.

- Laufbandtrainer

Dieser wurde in Balkenmitte aufgestellt. Die einzelnen Messperioden für Gehen und Laufen betrugen 20 bis 30 Sekunden, so dass genügend Zeit vorhanden war, um eine stationäre Schwingung zu erreichen, d.h. die homogene Lösung vollständig wegzudämpfen (vgl. Abschn. 2.1).

Balken B2

Auf dem Balken B2 wurden nur Hüpfversuche durchgeführt, da für Gehen der Fourier-Amplitudenkoeffizient $\Delta G_2/G$ und für Laufen die Laufstrecke zu klein war, um wesentliche Schwingungen zu erzeugen. Beim Balken B2 galt das Interesse ausschliesslich der Anregung durch die 2. und die 3. Harmonische, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$, des zeitlichen Verlaufs der Last beim Hüpfen. Die Versuchsperson hüpfte in Balkenmitte während ca. 20 Sekunden in der vorgegebenen Hüpf Frequenz. Das Frequenzband dieser Versuche umfasste $1.6 \text{ Hz} \leq f_H \leq 3.2 \text{ Hz}$. Die Frequenzstufen waren in Resonanznähe jeweils gleich oder kleiner als 0.1 Hz und weiter entfernt von der Resonanzstelle ca. 0.3 Hz. Bei Resonanz wurden jeweils mindestens drei Versuche, ausserhalb Resonanz nur ein bis zwei Versuche durchgeführt. Um wie beim Balken B1 verschiedene Resonanzkurven zu erhalten, wurde bei Balkeneigenfrequenzen von $f_1 = 4.02 \text{ Hz}$, $f_1 = 5.2 \text{ Hz}$ und $f_1 = 7.12 \text{ Hz}$ gemessen. Sie sind zusammen mit der zugehörigen Spannweite ebenfalls in der Tabelle 6 aufgeführt.

3.3.3 Messungen und Registrierungen

Bild 15 zeigt den Messstellenplan. Als Messgeber wurden für beide Balken verwendet:

- induktive Wegaufnehmer zur Messung der Relativverschiebungen in Balkenmitte und in einem Viertelpunkt (Bild 11);
- induktive Beschleunigungsgeber zur Messung der Balkenbeschleunigungen in Balkenmitte und in einem Viertelpunkt (Bild 11).

Die Platzierung aller vier Messgeräte auf einer Balkenseite erfolgte aus praktischen Gründen. Weil die Torsionseigenfrequenz viel höher liegt als die Biege-eigenfrequenz, konnte dies ohne weiteres so gemacht werden. Ein vorgängig durchgeführter Versuch mit Messgeräten beidseits des Balkens ergab identische Resultate.

Die Registrierung der Messsignale erfolgte über einen Verstärker zum Funktions-analyser, mit welchem diese in der gewünschten Art aufbereitet und mit dem nachgeschalteten Plotter aufgezeichnet werden konnten. Bild 14 zeigt die ganze Registriereinheit, bestehend aus Verstärker, Funktionsanalyser und Plotter.

Der Funktionsanalyser konnte nur zwei Kanäle gleichzeitig aufzeichnen und auswerten. Da vier Messgeräte eingesetzt wurden, mussten die Versuche jeweils zweimal durchgeführt werden, was jedoch von untergeordneter Bedeutung war, weil die Messungen in den Balkenviertelpunkten lediglich für Kontrollen dienten (siehe auch Abschn. 4.4).

3.3.4 Auswertungen

Die gemessenen Relativverschiebungen und Beschleunigungen wurden im Funktions-analyser gespeichert, aufbereitet und anschliessend mit dem Plotter aufgezeichnet. Für die Auswertung der Balkenschwingungen interessierten nur die Maximalwerte der Relativverschiebung und der Beschleunigung der einzelnen Messzyklen. Zur Kontrolle, ob die durch das Metronom vorgegebene Anregungsfrequenz jeweils eingehalten worden war, wurde mit dem Funktionsanalyser für jeden Versuch ein Fourier-Amplitudenspektrum der Verschiebung und Beschleunigung ermittelt. Die Maximalwerte der Balkenantwort wurden von Hand aus den Plots bestimmt und in Form von Resonanzkurven (Bilder 43 bis 58) dargestellt. Für die Bestimmung der

Maximalwerte der Relativverschiebungen resp. der Beschleunigungen wurden folgende Konventionen getroffen:

- Gehen

Der Maximalwert ist der grösste aufgetretene Wert eines Messsignals, wenn sich die Versuchsperson im ersten Durchgang (erstes Hingehen) über den Balken bewegte, wobei sich der Balken bei Messbeginn in Ruhelage befand. Beim Zurückgehen und Hin- und Hergehen auf dem Balken, d.h. nach zwei resp. drei Mittendurchgängen, wurden höhere Werte gemessen, die aber in den Resonanzkurven nicht berücksichtigt wurden.

- Laufen

Der Maximalwert ist der grösste aufgetretene Wert eines Messsignals während eines Durchgangs, wobei sich der Balken bei Messbeginn in Ruhelage befand. Die Versuchsperson verliess den Balken nach einem einzigen Durchgang.

- Hüpfen

Beim Hüpfen stellte sich ein mehr oder weniger stationärer Schwingungszustand ein, da während längerer Zeit eine örtlich etwa stationäre Last wirkte. Deshalb wurde beim Hüpfen der innerhalb der registrierten Zeitspanne (15 bis 20 Sekunden) aufgetretene Maximalwert der Messsignale ausgewertet.

3.4 Statische Belastungsversuche

Zur Ermittlung der Biegesteifigkeit und zur Messung der Rissbreiten wurden statische Belastungsversuche durchgeführt.

3.4.1 Versuchsanlage

Bild 19 zeigt die Belastungseinrichtung. Der Angriffspunkt der als Einzellast aufgebrachten statischen Last befand sich bei beiden Balken jeweils in der Nähe der Balkenmitte.

Für Relativverschiebungen nach unten (Bild 12) wurde die Last mit zwei Hohlkolbenpressen erzeugt und mit zwei Zugstangen, die unten im Aufspannboden verankert waren, über einen Stahlquerträger in den Balken eingeleitet. Die Kraft wurde mit zwei im Mittelbereich der Zugstangen eingebauten Kraftmessdosen bestimmt.

Für Relativverschiebungen nach oben (Bild 13) wurde die Last durch einen zwischen dem Aufspannboden und der Balkenunterseite platzierten Hydraulikzylinder aufgebracht. Die Krafteinleitung in den Balken erfolgte über eine Stahlplatte mit eingefräster Kalotte, in die der Stempel des Hydraulikzylinders eingefahren werden konnte. Die Kraftmessung wurde mit einem Oeldruckmanometer, das direkt an der Pumpe befestigt war, durchgeführt.

3.4.2 Versuchsablauf

Die beiden Balken, B1 und B2, wurden vorgängig der dynamischen Versuche statisch geprüft. Der Balken B1 wurde in verschiedenen Stufen mit einer Maximallast $F = 80 \text{ kN}$ (nach unten) und einer Minimallast von $F = - 67 \text{ kN}$ (nach oben) belastet. Der Balken wurde vorerst in Stufen belastet, anschliessend zweimal entlastet und dann wiederbelastet. Die maximale und die minimale Last entsprachen leicht höheren Beanspruchungen als für die dynamischen Versuche erwartet wurde. Bei jeder Laststufe wurden zusätzlich Rissbreitenmessungen durchgeführt.

Das Prüfprogramm für den Balken B2 war grundsätzlich gleich; er wurde mit einer Maximallast $F = 46 \text{ kN}$ (nach unten) und einer Minimallast $F = - 47 \text{ kN}$ (nach oben) belastet.

3.4.3 Messungen, Registrierungen und Auswertungen

Die Relativverschiebungen nach unten bzw. oben wurden in Balkenmitte mit einem induktiven Weggeber mit Nennweg $\pm 100 \text{ mm}$ gemessen.

Die Rissbreiten wurden mit einem Rissmikroskop (8-fache Vergrößerung) gemessen.

Die Registrierung und Auswertung der Messsignale erfolgten mit Hilfe einer elektronischen Datenerfassungsanlage bei den festverdrahteten Instrumenten (Kraftmessdosen, induktiver Weggeber, Oeldruckmanometer) nach einer Signalverstärkung als automatische Ablesung. Die Rissbreitenmessungen wurden protokolliert.

3.5 Ausschwingversuche

Zur Ermittlung der Eigenfrequenz (Grundfrequenz) und der Dämpfung der beiden Balken wurden Ausschwingversuche durchgeführt.

3.5.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage ist im Bild 15 abgebildet (siehe auch Abschnitt 3.3.1).

3.5.2 Versuchsablauf

Die beiden Balken wurden durch eine in Balkenmitte mit der Balkeneigenfrequenz hüpfenden Versuchsperson in Schwingungen gebracht. Die Versuchsperson verliess den Balken unmittelbar vor Messbeginn, so dass ein störungsfreies Ausschwingen stattfinden konnte. Für jede Balkeneigenfrequenz wurden mindestens drei Ausschwingversuche durchgeführt.

3.5.3 Messungen und Registrierungen

Es wurden die im Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Einrichtungen und Verfahren verwendet.

3.5.4 Auswertungen

Die verstärkten Messsignale wurden im Funktionsanalyser zwischengespeichert. Nach entsprechender Aufbereitung wurden sie vom Plotter in Form zeitlicher Schwingungsverläufe und Fourier-Amplitudenspektren ausgedruckt. Durch die Auswertung konnten folgende Werte ermittelt werden:

- Eigenfrequenz
- Dämpfung (logarithmisches Dekrement δ)

Die Balkeneigenfrequenz f_1 wurde aus den Fourier-Amplitudenspektren für die Verschiebung und die Beschleunigung in Balkenmitte herausgelesen. Damit konnte die amplitudenabhängige Eigenfrequenz sehr einfach bestimmt werden.

Bei der Angabe einer Eigenfrequenz f_1 in diesem Versuchsbericht handelt es sich jeweils um eine nominelle Grösse. Für den Beanspruchungsbereich ohne Rissöffnung

nahm die Eigenfrequenz mit abnehmender Schwingwegamplitude über Erwarten jeweils bis 5% zu (Bild 69). Die physikalische Ursache dieser Erscheinung ist nicht vollständig geklärt. Das gleiche Phänomen wurde jedoch auch schon in [3] erwähnt. Im Fall einer Rissöffnung wurde wie erwartet die Balkeneigenfrequenz entsprechend der Abnahme der Biegesteifigkeit etwas kleiner.

Als nominelle Eigenfrequenz f_1 wurde diejenige Frequenz gewählt, bei welcher die grösste Fourier-Amplitudendichte auftrat.

Als Kenngrösse für die Dämpfung wurde das streng genommen nur für ein viskoses Dämpfungsgesetz und für lineares Verhalten eines Schwingers gültige logarithmische Dekrement δ gewählt. Dieser Ansatz ist gerechtfertigt, da bei beiden Balken darauf geachtet wurde, dass keine oder nur schmale Risse auftraten (vgl. [2]). Das logarithmische Dekrement δ ergibt sich aus der Beziehung

$$\delta = \frac{1}{n} \log \frac{w_{\text{rel},m}}{w_{\text{rel},m+n}}$$

mit: n = Anzahl Schwingungszyklen im betrachteten Intervall (10)
 $w_{\text{rel},m}$ = Relativverschiebung am Anfang des Intervalls
 $w_{\text{rel},m+n}$ = Relativverschiebung am Ende des Intervalls

Das logarithmische Dekrement δ lässt sich auf einfache Weise in das oft verwendete Dämpfungsmaß ξ umrechnen. ξ entspricht dem Verhältnis c/c_{cr} , d.h. vorhandene Dämpfung/kritische Dämpfung:

$$\xi = \frac{c}{c_{\text{cr}}} \approx \frac{\delta}{2\pi}$$

Bei ξ handelt es sich somit um ein zur wirklichen Dämpfung äquivalentes viskoses Dämpfungsmaß.

3.6 Versuche zur Bestimmung des Balkengewichtes und der Vorspannkraft

3.6.1 Balkengewicht

Die Bestimmung des Gewichtes (bzw. der Masse) der beiden Balken erfolgte mit Hilfe einer Kraftmessdose (Bild 8). Die Balken wurden an einem für den Transport verwendeten Bewehrungshaken (Bild 8) mit dem Kran angehoben (Bild 25). Die Kraftmessdose befand sich dabei unmittelbar unter dem Kranhaken (Bild 8). Beide Balken wurden anfänglich am linken und anschliessend in analoger Weise am rechten Transporthaken angehoben. Dadurch konnte eine Mittelung der beiden Messungen vorgenommen werden. Die Registrierung erfolgte direkt mit einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage. Die Auswertung wurde mit Hilfe der relevanten Gleichgewichtsbedingungen und unter Annahme eines konstanten Laufmetergewichtes durchgeführt. Die Resultate sind in der Tabelle 7 dargestellt.

3.6.2 Vorspannkraft

Die Vorspannkraft am beweglichen Anker wurde mit einem 1000 kN Dynamometer der Stahlton AG gemessen (Bild 7). Die Resultate sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.

4. VERSUCHSRESULTATE

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse wurde für die Definition der Eigenfrequenz (Grundfrequenz) der Balken folgende Konvention getroffen:

Die Eigenfrequenz f_1 sollte im Zustand ohne Rissöffnung grundsätzlich unabhängig von der Schwingwegamplitude sein (vgl. Abschn. 3.5.4), nimmt jedoch mit fortschreitender Rissbildung bzw. Rissöffnung durch den damit verursachten Steifigkeitsabfall gegenüber dem Zustand ohne Rissöffnung ab (Bild 69) [4].

Eine mit dem Funktionsanalyser durchgeführte Fourier-Analyse der Relativverschiebungen bei einem Ausschwingversuch ergab deshalb ein Amplitudendichtespektrum. Als Eigenfrequenz f_1 wurde der Wert der Frequenz [Hz] bei der grössten Fourier-Amplitudendichte im Spektrum definiert. Bei der Balkenfrequenz f_1 in der Darstellung der Versuchsergebnisse handelt es sich somit um diese nominelle Grösse.

4.1 Zeitlicher Verlauf der dynamischen Lasten

In den folgenden Abschnitten werden für Gehen, Laufen und Hüpfen jeweils zuerst die Resultate der Kraftmessplatte auf dem in Resonanz mit der Geh-, Lauf- oder Hüppfrequenz stark schwingenden Balken B1 und anschliessend diejenigen der Kraftmessplatte auf starrer Unterlage beschrieben. Es wird jeweils eine repräsentative Auswahl aus einer grösseren Anzahl Messungen wiedergegeben.

4.1.1 Gehen

Im Bild 27 sind repräsentative zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Gehen auf Balken B1 dargestellt. Bei den fünf Teilbildern handelt es sich um die Resultate von zeitlichen Verläufen der Last einer einzigen Versuchsperson in Turnschuhen mit von oben nach unten steigender Schrittfrequenz f_G .

Beim Gehen ist die Kontaktdauer t_p eines Fusses mit dem Boden grösser als die Periode T_p , d.h. die zeitlichen Verläufe der Lasten des linken und des rechten Fusses überlappen sich teilweise. Die Überlappung wurde im Bild 27 allerdings nur aufgrund der Periode eingetragen, da sie auf der Kraftmessplatte nicht direkt bestimmbar war.

Die einzelnen zeitlichen Verläufe weisen stets zwei Maximalwerte auf, von denen der erste dem Auftreffen des Fusses auf dem Balken und der zweite dem neuerlichen Abstossen entspricht. Zwischen den beiden Maximalwerten weisen die zeitlichen Verläufe einen sattelförmigen Verlauf auf, der dem Abrollen des Fusses entspricht. Der tiefste Punkt kann als Sattelwert bezeichnet werden. Bei allen fünf Teilbildern liegt der erste Maximalwert stets ein wenig höher als der zweite. Weiter nehmen mit steigender Schrittfrequenz f_G beide Maximalwerte verglichen mit dem Eigengewicht G leicht ab. Hingegen wird die Differenz zwischen dem Sattelwert und den beiden Maximalwerten mit steigender Schrittfrequenz grösser.

Bild 28 zeigt den zeitlichen Verlauf der dynamischen Last verschiedener Versuchspersonen, die mit der gleichen Schrittfrequenz $f_G = 2$ Hz gehen. Ausser der Person 7, die in Halbschuhen mit harten Absätzen ging, trugen alle anderen Versuchspersonen Turnschuhe. Wiederum fällt auf, dass bei allen Teilbildern der erste Maximalwert des zeitlichen Verlaufs etwas höher ist als der zweite. Alle sieben Zeitverläufe sehen sich mit Ausnahme der ersten 50 ms sehr ähnlich. Unterschiede treten hauptsächlich in diesem Anfangsbereich auf und sind meist dem unterschiedlichen Schuhwerk zuzuschreiben. Bei Versuchspersonen mit Turnschuhen steigt die Last mehr oder weniger monoton an. Im Falle von hartem Schuhwerk lässt sich aber eine ausgeprägte Kraftspitze feststellen, die beim Auftreffen der Ferse auf dem Boden entsteht. Bei dieser stossartigen Kraftspitze handelt es sich gemäss Untersuchungen am Laboratorium für Biomechanik der ETH um sog. passive Kraftspitzen [5]. Passive Kraftspitzen treten auf, wenn die Muskulatur noch nicht Zeit hatte, für das Auffangen von Schlägen aktiviert zu werden. Sobald die Muskulatur aber aktiviert werden kann, tritt ein mehr oder weniger glatter zeitlicher Verlauf der Last auf.

Im Bild 29 sind die zeitlichen Verläufe der Last bei $f_G = 2$ Hz derselben Versuchsperson, die einmal harte Schuhe (Bild links) und einmal weiche Schuhe (Bild rechts) trug, aufgetragen. Das Bild verdeutlicht die obigen Feststellungen. Die ausgeprägt stossartigen Kraftspitzen von wenigen ms Dauer interessieren jedoch bei der vorliegenden Fragestellung (Auswirkungen auf Fussgängertragwerke) kaum, da sie wegen des geringen Impulses ein Tragwerk nicht in wesentliche Schwingungen versetzen können.

Bild 30 zeigt den zeitlichen Verlauf der Last beim Gehen auf starrer Unterlage. Die drei Teilbilder stellen Versuchsergebnisse einer einzigen Versuchsperson in Turnschuhen bei unterschiedlicher Schrittfrequenz f_G dar.

Im Gegensatz zu den Messungen auf dem schwingenden Balken ist dabei der zweite Maximalwert des zeitlichen Verlaufs der Last normalerweise leicht höher als der erste. Es wurden aber auch Messungen gemacht, bei denen beide Maximalwerte etwa gleich gross waren oder der erste gar leicht überwog. Solche Variationen treten sogar bei ein und derselben Versuchsperson auf, da der genaue Wert der ersten Maximalstelle sehr stark davon abhängt, ob mit der Ferse etwas härter oder weicher auf dem Boden aufgetroffen wird.

Die Tatsache, dass der zweite Maximalwert der Messungen auf Balken B1 kleiner war als der erste gibt demzufolge den Einfluss der schwingenden Unterlage wieder. Man kann sich leicht vorstellen, dass der schwingende Balken jeweils das Abstossen unterstützt und somit die aktive Muskelarbeit kleiner wird.

Bei der Berechnung der Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$ und der Phasenwinkel φ_1 wurde der zeitliche Verlauf der Last beider Füße zugrunde gelegt (teilweise Überlagerung). In den Bildern 31 und 32 wurden die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ des zeitlichen Verlaufs der Last in Funktion der Schrittfrequenz f_G aufgetragen (Mittelwerte von 1-3 Zeitverläufen pro Frequenz f_G). Bild 31 bezieht sich auf die Messungen der Kraftmessplatte auf dem schwingenden Balken B1 und Bild 32 auf diejenigen auf der starren Unterlage. Die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$ auf starrer Unterlage sind leicht höher als auf Balken B1. Für die Koeffizienten $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ konnte kein signifikanter Unterschied zwischen schwingender und starrer Unterlage festgestellt werden. Im Gegensatz zu den kleinen Streuungen von $\Delta G_1/G$ verschiedener zeitlicher Verläufe der Last variieren die Koeffizienten $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ sehr stark (z.T. über 100%).

In den Bildern 33 und 34 sind die Phasenwinkel φ_2 zwischen der zweiten und der ersten Harmonischen sowie φ_3 zwischen der dritten und der ersten Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der Last für die Messungen auf dem schwingenden Balken B1, resp. auf starrer Unterlage bei verschiedenen Schrittfrequenzen dargestellt. Wie aus diesen Bildern ersichtlich ist, weisen die Phasenwinkel φ_2 und φ_3 aus unterschiedlichen Zeitverläufen erhebliche Streuungen auf. Als Mittelwerte können angegeben werden: für φ_2 auf dem schwingenden Balken etwa $7/8\pi$ ($\approx 155^\circ$)

und auf starrer Unterlage etwa $\pi/2$ ($= 90^\circ$). Die entsprechenden Phasenwinkel φ_3 betragen ungefähr $2/3\pi$ ($= 120^\circ$) auf dem schwingenden Balken B1 bzw. $\pi/2$ ($= 90^\circ$) auf starrer Unterlage.

4.1.2 Laufen

Im Bild 35 sind repräsentative zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Laufen auf dem schwingenden Balken B1 dargestellt. Bei sämtlichen Teilbildern handelt es sich um Resultate der zeitlichen Verläufe der Last einer einzigen Versuchsperson mit Turnschuhen bei verschiedenen Schrittfrequenzen f_L . Im Gegensatz zum Gehen entsteht zwischen den Zeitverläufen des linken und des rechten Fusses eine Zeitspanne, während der beide Füße keinen Bodenkontakt haben. Die Idee zum Ansatz einer Halbsinusfunktion für den zeitlichen Verlauf der Last ist naheliegend [1].

Mit steigender Schrittfrequenz f_L , was gleichbedeutend mit einer grösseren Laufgeschwindigkeit ist, steigt das Lastmaximum $F_{p,max} = k_p \cdot G$ bei gleichzeitiger Verringerung der Kontaktdauer t_p kontinuierlich an.

Bild 36 zeigt analoge Versuchsergebnisse wie Bild 35, wobei es sich um verschiedene Versuchspersonen handelt (Versuchsergebnisse der Person von Bild 35 nicht mehr dargestellt), die mit der gleichen Schrittfrequenz $f_L = 2.4$ Hz über den schwingenden Balken B1 liefen. Dabei trugen die Personen 1 bis 6 Turnschuhe, die Person 7 trug Halbschuhe mit harten Absätzen. Aus den sieben Teilbildern ist der grosse Einfluss des Laufstils auf den zeitlichen Verlauf der Last ersichtlich. Die Kraftspitzen, die während der ersten 25 ms bei den Personen 1 und 3 bis 7 auftraten, zeigen, dass diese Personen mit der Ferse auf dem Boden auftrafen (gemäss Bild 21). Der Einfluss des harten Schuhwerks geht aus dem Teilbild der Versuchsperson 7 hervor. Es handelt sich dabei um das gleiche Phänomen, welches im Abschnitt 3.1.1 Gehen dargestellt wurde.

Bedingt durch den unterschiedlichen Laufstil der Versuchspersonen ergeben sich für die Kontaktdauern t_p und die Lastmaxima $F_{p,max} = k_p \cdot G$ erhebliche Unterschiede. Der Vergleich zwischen den gemessenen und den aus dem Halbsinusmodell berechneten Stossfaktoren k_p ergibt demgegenüber keine signifikanten Unterschiede. Das Halbsinusmodell liefert in dieser Beziehung für alle untersuchten Lauffrequenzen sehr gute Werte.

Im Bild 37 sind die zeitlichen Verläufe der Last für eine einzige Versuchsperson in Turnschuhen bei einer Schrittfrequenz $f_L = 2.53$ Hz für verschiedene Laufstile dargestellt. Die drei Teilbilder entstanden bei unterschiedlichem Auftreffen des Fusses auf dem Boden. Sie entsprechen von links nach rechts den Laufstilen gemäss den Bildern 21, 22 und 23 "Auftreffen der Ferse, des ganzen Fusses, nur der Fussballen". Die Kontaktdauer t_p beträgt im Lastverlauf links etwa 140% derjenigen des Lastverlaufs rechts. Gerade umgekehrt verhält es sich mit dem Stossfaktor k_p , der für den Zeitverlauf links noch $2/3$ desjenigen rechts beträgt. Die Teilbilder von Bild 35 entsprechen einem Laufstil gemäss Bild 23 (und somit einen Verlauf wie Bild 37 rechts). Im Bild 36 hingegen sind zeitliche Verläufe, die eher dem Laufstil gemäss Bild 21 oder 22 (und somit dem Verlauf von Bild 37 links oder Mitte) entsprechen, wiedergegeben. Während eines Konditionstrainings in einer Turnhalle sind grösstenteils ähnliche zeitliche Verläufe der Last wie die im Bild 36 angegebenen zu erwarten. Die Zeitverläufe gemäss Bild 35 treten dabei viel seltener auf.

Die zeitlichen Verläufe der Last beim Laufen auf starrer Unterlage wurden nicht dargestellt, da keine wesentlichen Unterschiede zu den Zeitverläufen auf dem schwingenden Balken B1 festgestellt wurden.

Die Resultate der Berechnungen der ersten drei Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ repräsentativer zeitlicher Verläufe der Lasten beim Laufen auf dem schwingenden Balken B1 sind im Bild 38 dargestellt (Mittelwerte von 1 bis 3 Zeitverläufen pro Verhältnis t_p/T_p). Die drei Koeffizienten wurden in Funktion des Verhältnisses t_p/T_p aufgetragen. Beim Laufen liegt das Verhältnis t_p/T_p etwa zwischen 0.55 und 0.70. Es wird hauptsächlich durch die Art des Auftreffens des Fusses auf dem Boden bestimmt. So schwankt das Verhältnis t_p/T_p im Bild 36 bei einheitlicher Schrittfrequenz $f_L = 2.4$ Hz zwischen den sieben Testpersonen von 0.56 bis 0.74. Im allgemeinen wird t_p/T_p mit zunehmender Schrittfrequenz leicht kleiner, was im Bild 35 bestätigt wird. Für $f_L = 2$ Hz wurde ein durchschnittliches Verhältnis t_p/T_p von 0.6 und für $f_L = 2.8$ Hz von 0.56 berechnet.

Als Ergänzung wurden im Bild 38 für das Verhältnis $t_p/T_p = 0.62$ die Fourier-Amplitudenkoeffizienten ΔG_1 , ΔG_2 und ΔG_3 eines zeitlichen Verlaufs der Last beim Laufen auf starrer Unterlage angegeben. Es zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede zu den entsprechenden auf dem schwingenden Balken B1 gemessenen Werten.

Ferner sind im Bild 38 die Verläufe der drei ersten Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ des Halbsinusmodells eingetragen. Es ist ersichtlich, dass das Modell zum Teil deutlich niedrigere Werte liefert als die Versuche. Die Unterschiede liegen bei ΔG_1 in der Grössenordnung von 15% und bei ΔG_2 betragen sie sogar 40%. Für ΔG_3 resultieren mit dem Halbsinusmodell wohl eher zufälligerweise etwa die gleichen Resultate wie bei den Versuchen.

4.1.3 Hüpfen

Schwingende Unterlage

Im Bild 39 sind sechs repräsentative zeitliche Verläufe der Last beim Hüpfen auf dem schwingenden Balken B1 dargestellt. Bei allen Teilbildern handelt es sich um Messresultate von Zeitverläufen der Last einer Versuchsperson mit Turnschuhen beim intensiven Hüpfen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Mit zunehmender Hüppfrequenz f_H nimmt die Kontaktdauer t_p vorerst kontinuierlich ab. Bei $f_H = 2.4$ Hz wird mit $t_p = 0.15$ Sekunden ein Grenzwert erreicht, der auch bei höheren Hüppfrequenzen aus physiologischen Gründen nicht mehr wesentlich unterschritten werden kann (Tabelle 9).

Das Lastmaximum $F_{p,max} = k_p \cdot G$ ist beim intensiven Hüpfen für Hüppfrequenzen von $f_H = 1.6$ bis 2 Hz etwa konstant. Der Stossfaktor k_p beträgt ungefähr 5.5. Bei Hüppfrequenzen $f_H > 2$ Hz nimmt der Stossfaktor k_p gleichmässig ab und beträgt für $f_H = 3$ Hz noch ca. 4 (Bild 41).

Im Vergleich zu den Stossfaktoren k_p aus dem Halbsinusmodell (Bild 4) liegen für bestimmte Werte t_p/T_p die gemessenen Stossfaktoren k_p für intensives Hüpfen durchwegs 10 bis 15% höher. Für natürliches Hüpfen kann zwischen den gemessenen und den aus dem Halbsinusmodell berechneten Werten von k_p eine sehr gute Uebereinstimmung festgestellt werden.

Die Unterschiede von Kontaktdauer t_p und Stossfaktor k_p beim intensiven und beim natürlichen Hüpfen auf dem schwingenden Balken B1 gehen aus der Tabelle 9 und aus Bild 41 hervor. Bei hohen Hüppfrequenzen $f_H > 2.8$ bis 3 Hz kann zwischen intensivem und natürlichem Hüpfen kein wesentlicher Unterschied mehr festgestellt werden.

Die Resultate der Berechnung der ersten drei Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ der zeitlichen Verläufe der Last sowohl beim intensiven als auch beim natürlichen Hüpfen auf dem schwingenden Balken B1 sind im Bild 42 dargestellt. Wie beim Laufen sind die Koeffizienten $\Delta G_i/G$ in Funktion des Verhältnisses t_p/T_p angegeben. Das Verhältnis t_p/T_p ist deutlich kleiner als beim Laufen. Es schwankt zwischen etwa 0.3 und 0.5, wobei die niedrigen Werte auch niedrigen Hüpf Frequenzen entsprechen und umgekehrt. Zur Abschätzung eines Mindestwertes von t_p/T_p und somit eines Höchstwertes des Stossfaktors k_p mit Hilfe eines praktischen Mindestwertes für t_p von 0.15 s kann nach [1] der Ansatz

$$t_p/T_p = 0.15 \text{ s} \cdot f_H$$

verwendet werden. Dieser ergibt aufgrund der hier vorliegenden Versuchsergebnisse für $f_H \geq 2 \text{ Hz}$ rund 10% zu niedrige Werte t_p/T_p . Für $f_H \leq 1.6 \text{ Hz}$ resultieren für schwingende Unterlage jedoch erheblich zu niedrige Werte t_p/T_p und somit entsprechend zu hohe Werte k_p , da bei kleinen Hüpf Frequenzen die Kontaktdauer zunimmt.

Zum Vergleich sind im Bild 42 auch die aus dem Halbsinusmodell berechneten Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ eingezeichnet. Ähnlich wie beim Laufen ergibt das Halbsinusmodell zu niedrige Werte $\Delta G_i/G$. Bei $\Delta G_1/G$ beträgt die Differenz zu den Versuchswerten 5 bis 15%, bei $\Delta G_2/G$ 15 bis 35% und bei $\Delta G_3/G$ 30 bis 45%. Bei den eher ungünstigen niedrigen Werten t_p/T_p ist allerdings die Differenz zwischen dem Halbsinusmodell und den Versuchswerten deutlich kleiner als bei höheren Werten t_p/T_p .

Starre Unterlage

Der Unterschied in den zeitlichen Verläufen der Last auf starrer bzw. schwingender Unterlage kann durch die beiden Parameter t_p und k_p beschrieben werden. Die Kontaktdauern t_p sind auf starrer Unterlage stets kleiner als auf schwingender Unterlage (Tabelle 9). Da jedoch der vom Menschen ausgeübte Impuls unabhängig von der Unterlage sein muss ist es plausibel, dass der Stossfaktor k_p auf starrer Unterlage grösser sein muss als auf schwingender (Bilder 40, 41). Die Kontaktdauern t_p sind in der Tabelle 9 getrennt nach intensivem und natürlichem Hüpfen auf starrer Unterlage zusammengestellt. Beim intensiven Hüpfen nimmt t_p bei steigender Hüpf Frequenz $f_H = 1.6$ bis 2 Hz von ca. 0.17 Sekunden bis auf 0.14 Sekunden ab. Für Hüpf Frequenzen $f_H > 2 \text{ Hz}$ kann die Kontaktdauer t_p aus

physiologischen Gründen nicht mehr wesentlich kleiner als 0.135 bis 0.14 Sekunden werden.

Aus diesen Werten für t_p muss der mögliche Bereich für das Verhältnis t_p/T_p beim Hüpfen auf starrer Unterlage gegenüber den Werten von Hüpfen auf dem Balken etwas korrigiert werden. Er kann demgemäss etwa zwischen 0.25 und 0.45 liegen.

Die Stossfaktoren für intensives und für natürliches Hüpfen auf starrer Unterlage gehen aus Bild 40 hervor. Es ergeben sich die gleichen Zusammenhänge wie für das Hüpfen auf dem Balken B1, wobei die Stossfaktoren bei intensivem Hüpfen und $f_H < 2$ Hz bis gegen 7 ansteigen können.

Im Vergleich zu den Stossfaktoren k_p aus dem Halbsinusmodell (Bild 4) liegen für bestimmte Werte t_p/T_p die gemessenen Werte k_p für intensives Hüpfen durchwegs ca. 5% höher. Für natürliches Hüpfen hingegen liegen die Werte k_p aus dem Halbsinusmodell zum Teil bis 15% höher als die entsprechenden gemessenen Stossfaktoren.

Der Ansatz $t_p/T_p = 0.15 \cdot f_H$ stimmt bei intensivem Hüpfen sowohl für hohe ($f_H = 3.6$ Hz) als auch für niedrige Hüppfrequenzen ($f_H = 1.6$ Hz) gut mit den gemessenen Werten überein. Für natürliches Hüpfen wird das Verhältnis t_p/T_p mit dem obigen Ansatz für Hüppfrequenzen kleiner als ca. 2 Hz leicht unterschätzt. Für höhere Hüppfrequenzen kann eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden.

4.2 Balkenschwingungen

Allgemeines

Die Messresultate der Balkenschwingungen sind in diesem Versuchsbericht in Form von Resonanzkurven für die Verschiebung und die Beschleunigung in Balkenmitte dargestellt. Es wurden, ausgehend von der Balkenruhelage, die Relativverschiebung nach unten w^+ und die Beschleunigung a aufgetragen. Die Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2 sind nach den Anregungsarten Gehen, Laufen und Hüpfen gegliedert. Der Balken B1 wurde durch Gehen, Laufen und Hüpfen, der Balken B2 jedoch nur durch Hüpfen angeregt (vgl. Abschnitt 3.3).

Die Verschiebungen und Beschleunigungen im Balkenviertelpunkt sind in diesem Bericht nicht dargestellt. Sie dienten vor allem dazu, allfällige Balkenschwingungen in der zweiten Eigenform nachzuweisen. Solche Schwingungen wurden nur beim Hüpfen mit Hüpf Frequenzen, welche von der Balkengrundfrequenz genügend weit entfernt waren, festgestellt. Sie waren jedoch so klein, dass sie nicht näher untersucht wurden.

Nach den Resonanzkurven (Bilder 43 bis 58) sind der Vollständigkeit halber einige ausgewählte zeitliche Schwingungsverläufe zusammen mit den jeweiligen Fourier-Amplitudenspektren ohne weiteren Kommentar wiedergegeben (Bild 59 bis 64).

4.2.1 Verschiebungen

Gehen

In den Bildern 43, 45, 46 sind die Resonanzkurven des Balkens B1 infolge Gehen bei den Eigenfrequenzen $f_1 = 2.0$ Hz, 2.3 Hz bzw. 1.7 Hz dargestellt.

Die grösste gemessene Relativverschiebung trat im Resonanzfall bei der Eigenfrequenz $f_1 = 2$ Hz auf und betrug rund 15 mm (Bild 43). Bei $f_1 = 2.3$ Hz wurde eine Grösstverschiebung von nur noch 10 mm gemessen (Bild 45). Trotz des höheren Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$ bei $f_G = 2.3$ Hz gegenüber $f_G = 2$ Hz (vgl. Bilder 31, 32), fällt die Relativverschiebung im Bild 45 wegen des steiferen Tragwerks (kleinere Spannweite) kleiner aus als im Bild 43. Bei $f_1 = 1.7$ Hz wurde als grösste Verschiebung 8 mm gemessen. Die Aenderung des Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$ muss demzufolge zwischen $f_G = 1.7$ und 2.0 Hz grösser sein als zwischen $f_G = 2$ und 2.3 Hz, womit die Resultate aus Bild 31 bestätigt werden.

Im Bild 44 ist die Resonanzkurve für Gehen auf einem Laufbandtrainer, der in Balkenmitte von B1 plaziert war, angegeben. Dabei wurden maximale Verschiebungen von 16 mm im Resonanzfall gemessen. Vergleicht man die gemittelten Resultate mit und ohne Laufbandtrainer, stellt man im Fall mit Laufbandtrainer lediglich etwa 20% höhere Verschiebungen als im Fall ohne Laufbandtrainer fest. Rechnerisch sollten mindestens 30 bis 40% höhere Verschiebungen resultieren. Aus diesem Vergleich muss gefolgert werden, dass die Gehart durch den Laufbandtrainer relativ stark beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 3.1.4) und die Resultate mit und ohne Laufbandtrainer demzufolge nicht ohne weiteres verglichen werden können.

Im Bild 47 ist die Verschiebung w beim Gehen mit der Schrittfrequenz $f_G = 2$ Hz bei unterschiedlicher Balkeneigenfrequenz f_1 dargestellt. Das Bild zeigt sehr schön die Tatsache, dass nur in einem schmalen Frequenzbereich um die Schrittfrequenz f_G herum starke Schwingungen auftreten.

Laufen

Bei den durch Laufen hervorgerufenen Schwingungen wird prozentual weniger von der stationären Balkenantwort gemessen als bei den Schwingungen infolge Gehen, da beim Laufen über den Balken B1 die Last weniger lange auf den Balken einwirkt und nur etwa zehn Schritte in der vorgegebenen Frequenz möglich sind. In den Bildern 48, 50 und 51 sind die Resonanzkurven des Balkens B1 infolge Laufen bei den Eigenfrequenzen $f_1 = 2.0$ Hz, 2.3 Hz und 1.7 Hz dargestellt. Die zuverlässigsten Resultate gehen aus Bild 50 mit der Eigenfrequenz $f_1 = 2.3$ Hz hervor. Die gemessene maximale Verschiebung beträgt dabei etwa 25 mm. Trotz der oben erwähnten Einschränkungen misst man eine mehr als doppelt so hohe Verschiebung wie beim Gehen, was bestätigt, dass die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$ beim Laufen drei- bis viermal höher sein müssen als beim Gehen (vgl. Bilder 31 und 32 mit Bild 38).

Die Bilder 48 und 51 mit Balkeneigenfrequenzen $f_1 = 2.0$ Hz bzw. 1.7 Hz zeigen deshalb weniger zuverlässige Resultate, weil es sehr schwierig ist, mit niedrigen Schrittfrequenzen $f_L < 2.3$ Hz zu laufen. Im Bild 49 ist die Resonanzkurve beim Laufen auf einem Laufbandtrainer, der in Balkenmitte auf B1 gestellt wurde, angegeben. Der Vergleich mit Bild 48 (kein Laufbandtrainer vorhanden) zeigt keine wesentlichen Unterschiede. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass erstens die Art des Laufens auf dem Laufbandtrainer eine ganz andere ist (die Rolle des Laufbandtrainers muss vom Läufer selbst angetrieben werden, wodurch er gezwungen wird, mit grösserer Vorlage zu laufen), und dass zweitens das Einhalten einer genau vorgegebenen Lauffrequenz gerätebedingt kaum möglich war.

Hüpfen

In den Bildern 52, 53 und 54 sind die Resonanzkurven des Balkens B1 infolge Hüpfen bei den Eigenfrequenzen $f_1 = 2$ Hz, 2.3 Hz und 1.7 Hz dargestellt.

Die grösste Verschiebung wurde bei den Versuchen gemäss Bild 54 bei $f_1 = 1.7$ Hz gemessen. Sie beträgt rund 75 mm. Bei den höheren Balkeneigenfrequenzen $f_1 = 2.0$ (Bild 52) und 2.3 Hz (Bild 53) erreicht sie demgegenüber nur noch etwa 65 mm resp. 50 mm. Die Unterschiede erklären sich hauptsächlich aus der Versteifung

des Tragwerks infolge Verringerung der Spannweite und Erhöhung der Vorspannkraft, da die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$ gemäss Bild 42 für $f_H = 1.7 \text{ Hz}$, 2 Hz und 2.3 Hz in derselben Grössenordnung liegen. Im Bild 55 wurde die Verschiebung w beim Hüpfen mit $f_H = 1.8 \text{ Hz}$ in Funktion der Eigenfrequenz f_1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass auch die Anregung durch die 2. Harmonische des zeitlichen Verlaufs der Last zu Resonanzzuständen führt.

Die Resonanzkurven beim Hüpfen auf dem Balken B2 gehen aus den Bildern 56, 57 und 58 für die Eigenfrequenzen $f_1 = 4.02 \text{ Hz}$, 5.20 Hz und 7.12 Hz hervor.

Im Bild 56 beträgt die grösste gemessene Verschiebung 22 mm . Für Frequenzen $f_H = 1.4 \text{ Hz}$ treten nochmals Resonanzzustände auf, die durch die 3. Harmonische des zeitlichen Verlaufs der Last hervorgerufen werden.

Gemäss Bild 57 wird der Balken B2 bei $f_H = 1.73 \text{ Hz}$ durch die 3. Harmonische und bei $f_H = 2.53 \text{ Hz}$ durch die 2. Harmonische des zeitlichen Verlauf der Last in Resonanzschwingungen versetzt. Die Verschiebungen durch die 2. Harmonische sind dabei leicht grösser als diejenigen, die durch die 3. Harmonische verursacht werden. Daraus folgt, dass der Fourier-Amplitudenkoeffizient $\Delta G_2/G$ (2.53 Hz) grösser sein muss als $\Delta G_3/G$ (1.73 Hz) (vgl. dazu Bild 42 und Tabelle 9).

Bild 58 schliesslich zeigt die Resonanzverschiebungen bei Anregung durch die 3. Harmonische des Hüpfens bei $f_1 = 7.12 \text{ Hz}$. Es ist zu beachten, dass bei $f_1 = 7.12 \text{ Hz}$ die Dämpfung infolge Rissbildung auf der Balkenoberseite (negatives Moment über den Auflagern) rund doppelt so hoch war wie bei $f_1 = 4.02$ und 5.20 Hz .

4.2.2 Beschleunigungen

Für die Beschleunigungen wurden die gleichen Resonanzkurven, wie sie im Abschnitt 4.2.1 eingehend erläutert wurden, aufgezeichnet.

Im Fall einer harmonischen Schwingung kann die Beschleunigung mit der Beziehung $a = (2\pi \cdot f)^2 \cdot w$ aus der Verschiebung errechnet werden. Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen ergibt sich, dass die Anwendung dieser Beziehung zulässig ist, indem sich Verschiebungen und Beschleunigungen bis auf den frequenzabhängigen Faktor $(2\pi \cdot f)^2$ tatsächlich entsprechen, was darauf hinweist, dass kaum

höhere Eigenformen angeregt werden. Deshalb wird in diesem Abschnitt nur kurz auf einige spezielle Beschleunigungswerte hingewiesen.

Gehen

Die maximal aufgetretenen Beschleunigungen in Balkenmitte betrugen 0.15 bis 0.18 g bei $f_1 = 2.0$ Hz und 2.3 Hz (Bilder 43, 45). Bei Verwendung des Laufbandtrainers wurden Maximalwerte von etwa 0.25 g gemessen (Bild 44).

Laufen

Beim Laufen betrug die grösste gemessene Beschleunigung bei $f_1 = 2.3$ Hz $a = 0.6$ g (Bild 50).

Hüpfen

Die maximalen Beschleunigungen betrugen für den Balken B1 etwa 1.0 g (Bilder 52, 53).

Beim wesentlich steiferen Balken B2 traten sogar Beschleunigungen bis zu 1.5 g in Balkenmitte auf (Bilder 56, 57, 58). Bei steiferen Tragwerken spielt also weniger die Verschiebung als vielmehr die Beschleunigung die entscheidende Rolle.

4.2.3 Rechnerische Werte

In den Bildern 43 und 45 sind zusätzlich zu den gemessenen auch die berechneten Resonanzkurven für die Verschiebungen und die Beschleunigungen in Balkenmitte beim Gehen dargestellt. Die entsprechende Darstellung für Hüpfen sowohl auf dem Balken B1 als auch auf dem Balken B2 ist in den Bildern 52, 53, 56 und 57 gegeben. Für Laufen wurden aufgrund der Einwendungen im Abschnitt 4.2.1 über Laufen keine Resonanzkurven berechnet.

Die Berechnungen wurden mit den Formeln aus Abschnitt 1.3 durchgeführt, wobei jeweils nur eine einzige Harmonische des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Last berücksichtigt wurde. Beim Gehen wurde zudem angenommen, dass durch einen einzigen Durchgang nur 60% der stationären Balkenschwingungen angeregt werden können (zu kleine Balkenlänge). Als Biegesteifigkeit B wurden die aus den statischen Versuchen ermittelten Werte nach Tabelle 10 für die jeweils entsprechenden Relativverschiebungen eingesetzt.

Die Rechenresultate stimmen im allgemeinen gut mit den Versuchsergebnissen überein. Unterschiede zwischen gemessenen und gerechneten Amplituden in der Resonanzstelle sind darauf zurückzuführen, dass es bei kleinen Dämpfungen erfahrungsgemäss schwierig ist, mit der Lasteinwirkung die (leicht variable) Eigenfrequenz des Tragwerks genau zu treffen und eine vollkommene Resonanz zu erzeugen. Für Unterschiede neben der Resonanzstelle (die gemessenen Resonanzbereiche sind erheblich breiter als die gerechneten) dürfte vor allem die Tatsache verantwortlich sein, dass die Versuchsperson beim Gehen und Hüpfen in Resonanznähe den Balken nicht genau in der vorgeschriebenen Erregerfrequenz, sondern eher in der Balkeneigenfrequenz (bzw. einem ganzzahligen Teil derselben) anregte. Dieser auch in [1] erwähnte Rückkoppelungseffekt besteht darin, dass einwirkende Personen sich mehr oder weniger zwangsläufig der Schwingung der Unterlage anpassen.

Ein weiterer Unterschied zwischen den berechneten und den gemessenen Resonanzkurven besteht darin, dass die beiden Resonanzspitzen in horizontaler Richtung teilweise leicht verschoben sind. Dieser Effekt entsteht dadurch, dass die Balkeneigenfrequenz in Wirklichkeit amplitudenabhängig ist (siehe dazu Abschnitt 3.5). Diese kleine horizontale Verschiebung der Resonanzspitzen ist jedoch für eine Tragwerksbemessung unwesentlich, da dabei hauptsächlich die Maximalwerte der Verschiebung und der Beschleunigung interessieren.

Als weitaus wichtigster Einflussparameter in der Berechnung muss das Dämpfungsmass Ξ betrachtet werden. Die in der Nachrechnung der Maximalwerte entstehenden Differenzen zu den Versuchsergebnissen sind hauptsächlich auf die Abweichung der wirklichen von den angenommenen Dämpfungseigenschaften zurückzuführen. Die tatsächliche Bedeutung des Dämpfungsmasses Ξ wird ersichtlich, wenn man sich die Aufgabe, ein Tragwerk gegen unzulässige Schwingungen zu bemessen, vor Augen führt. In solchen Fällen ist das Dämpfungsverhalten des Tragwerks, insbesondere im Fall von Stahlbeton, meist nicht sehr genau bekannt. Es können demzufolge bei einer Schwingungsberechnung erhebliche Differenzen zur Wirklichkeit entstehen.

Als weiterer bedeutender Einflussparameter muss auch die Biegesteifigkeit bezeichnet werden. Sie beeinflusst das Resultat einer Schwingungsberechnung ebenfalls stark, insbesondere, wenn sie wegen der oft nicht genauer bekannten Mitwirkung von Belägen, Geländern oder nichttragenden Elementen oder wie im Fall von Stahlbeton wegen der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen nur in bestimmten Grenzen vorausberechnet werden kann.

4.3 Statische Belastungsversuche

Die statischen Belastungsversuche wurden bei beiden Balken vor den Schwingungsversuchen durchgeführt.

4.3.1 Biegesteifigkeiten

Die Bilder 65 und 66 zeigen die Last-Verschiebungs-Kurven der beiden Balken je für Relativverschiebungen nach unten und nach oben. Die Querschnittsbiegesteifigkeit B wurde nach den Regeln der linear elastischen Stabstatik aus den Last-Verschiebungs-Kurven unter Annahme einer konstanten Biegesteifigkeit längs der Balkenaxe berechnet. Sie wurde gemäss Bild 67 als Sekantensteifigkeit bestimmt. Die Sekantensteifigkeit ist ein Mass für die Steigung der Sekante durch zwei Punkte $+F(w^+)$ und $-F(w^-)$ der Last-Verschiebungs-Kurve, wobei $|w^+| = |w^-|$.

Die aus den Versuchsergebnissen ermittelten Biegesteifigkeiten sind in der Tabelle 10 in Funktion der zugehörigen Relativverschiebungen dargestellt. Die kleine Abnahme der Biegesteifigkeiten beider Balken mit zunehmender Relativverschiebung bestätigt, dass beide Balken während der Versuche lediglich im elastischen Bereich beansprucht wurden.

4.3.2 Rissbreiten

Die gemessenen, gemittelten Rissbreiten im Mittelbereich beider Balken sind in der Tabelle 11 in Funktion der zugehörigen Relativverschiebungen angegeben. Während der Schwingungsversuche sind beim Balken B1 (Vorspannkraft = 935 kN) Risse aufgetreten, wobei die Rissbreiten bei einer Relativverschiebung von ± 50 mm rund 0.15 bis 0.20 mm betrugen.

Beim Balken B2 trat nur bei den Schwingungsversuchen, bei denen die Hüpf Frequenz f_H ein ganzzahliges Vielfaches der Balkeneigenfrequenz f_1 betrug, Rissöffnung auf (Rissbreite max. 0.1 mm). Ansonsten war die Vorspannkraft zu gross, als dass eine Rissöffnung aufgetreten wäre. Eine Ausnahme bildete der Versuch mit $f_1 = 7.12$ Hz, bei dem Risse über den Auflagern auftraten (grosse Kragarme).

4.4 Ausschwingversuche

4.4.1 Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenzen beider Balken mit den zugehörigen Spannweiten sind in der Tabelle 6 zusammengestellt. Auf eine detaillierte schwingwegabhängige Darstellung der Eigenfrequenz für eine bestimmte Spannweite wurde verzichtet, da beide Balken während der Schwingungsversuche im elastischen Bereich arbeiteten. Aus [4] geht hervor, dass die Eigenfrequenz im Zustand ohne Rissöffnung konstant ist und mit fortschreitender Ausbildung der Risse bzw. fortschreitender Rissöffnung durch den dadurch verursachten Steifigkeitsabfall gegenüber dem Zustand ohne Rissöffnung abgemindert wird.

Die mögliche Grössenordnung der Variation der Eigenfrequenz bei den Schwingungsversuchen ist aus Bild 69 ersichtlich. In diesem Bild ist die Eigenfrequenz des Balkens B1 in Abhängigkeit der Relativverschiebung nach unten für die nominelle Eigenfrequenz $f_1 = 2.3 \text{ Hz}$ ($P = 935 \text{ kN}$) dargestellt. Die Variation der Eigenfrequenz im dargestellten Verschiebungsbereich beträgt rund 7%. Sie kann auch für die anderen in Tabelle 6 aufgeführten Eigenfrequenzen des Balkens B1 als repräsentativ betrachtet werden. Beim Balken B2 war die Eigenfrequenz bei den Schwingungsversuchen praktisch unabhängig von der Schwingwegamplitude, da sich Risse nur bei wenigen Versuchen ein wenig öffneten.

Im Zustand ohne Rissöffnung war die Eigenfrequenz nicht wie erwartet konstant, sondern nahm mit abnehmender Schwingungsamplitude ($w \approx 5 \text{ mm}$) leicht zu (vgl. S. 25).

4.4.2 Dämpfung

In der Tabelle 6 sind die aus den Ausschwingversuchen ermittelten Dämpfungsmasse ξ zusammengestellt. Insbesondere beim Balken B1 war das Dämpfungsmass ξ abhängig von der Relativverschiebung. Der mögliche Streubereich für das Dämpfungsmass beträgt etwa 0.15% (Bild 26). Bild 26 zeigt das schwingwegabhängige Dämpfungsmass ξ beim Balken B1 und einer Eigenfrequenz von 2.3 Hz. Mit beginnender Rissbildung erhöhte sich das Dämpfungsmass leicht gegenüber dem ungerissenen Zustand. Für grössere Rissbreiten hingegen ($f_1 = 1.7 \text{ Hz}$ für B1 mit Rissen im Feldbereich und $f_1 = 7.12 \text{ Hz}$ für B2 mit Rissen oben im Auflagerbereich) konnte das Dämpfungsmass bis gegen den doppelten Wert des Zustandes ohne Rissöffnung

ansteigen. Solche grosse Aenderungen der Dämpfungseigenschaften wurden auch in früheren Arbeiten [2, 3] des Institutes für Baustatik und Konstruktion festgestellt. Gemäss [4] setzt sich die Dämpfung aus einem viskosen Anteil in der Biegedruckzone und einem Anteil infolge Reibungsdämpfung in der Biegezugzone zusammen. Letzterer entsteht im Bereich der Oberfläche der Längsbewehrung durch deren zyklische Relativverschiebung gegenüber dem Beton. Der Anteil der viskosen Dämpfung ist schwingwegunabhängig, wogegen der Reibungsanteil stark schwingwegabhängig ist.

Auf eine genaue schwingwegabhängige Darstellung des Dämpfungsmasses für die verschiedenen Spannweiten wurde verzichtet, da beide Balken während der Schwingungsversuche keine oder höchstens kleine Rissöffnungen aufwiesen.

5. KURZFASSUNG DES BERICHTES

Moderne Bauwerke werden heute mit hochwertigen Baustoffen unter hoher Ausnützung der Materialfestigkeiten gebaut. Damit lassen sich immer schlankere Tragwerke erstellen, die aber eine erhebliche Schwingungsanfälligkeit aufweisen können. Insbesondere bei Fussgängerbrücken und Turnhallen sind in letzter Zeit vermehrt Fälle aufgetreten, wo solche Bauwerke durch Menschen zu störenden oder schädlichen Schwingungen angeregt wurden.

5.1 Planung und Durchführung der Versuche

Das Hauptziel der hier beschriebenen Forschungsarbeiten bestand in der Quantifizierung der dynamischen Lasten, die beim Gehen, Laufen und Hüpfen einer Einzelperson entstehen. Zusätzlich wurden die Auswirkungen dieser Lasten auf zwei als einfache Balken gelagerte Versuchsträger ermittelt und mit den Resultaten aus einfachen Rechenmodellen verglichen.

Zur Erfassung der zeitlichen Verläufe der Lasten beim Gehen, Laufen und Hüpfen standen zwei Kraftmessplatten, deren Messprinzip auf der Erzeugung elektrischer Spannungen der eingebauten Piezokristalle unter Druckbelastung beruht, zur Verfügung. Dabei wurde die eine Kraftmessplatte auf einen der beiden schwingfähigen Versuchsbalken montiert; die andere befand sich auf einer starren Unterlage.

Die beiden Versuchsbalken B1 und B2 wurden aus vorgespanntem Leichtbeton hergestellt. Die Balken waren so konzipiert, dass B1 bei der Spannweite $l = 18.65 \text{ m}$ eine Grundfrequenz $f_1 = 2 \text{ Hz}$ und B2 bei $l = 13.20 \text{ m}$ eine solche von 4 Hz aufwiesen. Durch Veränderung der Spannweite und/oder der Vorspannkraft konnten mit beiden Balken auch andere Eigenfrequenzen erzielt werden. Die dynamischen Lasten durch Gehen, Laufen und Hüpfen wurden jeweils von einer einzelnen Versuchsperson aufgebracht, wobei die Schritt- bzw. Hüppfrequenz mit einem Metronom vorgegeben wurde.

Auf der Kraftmessplatte auf dem schwingenden Balken B1 wurde ein systematisches Versuchsprogramm mit variablen Geh-, Lauf- und Hüppfrequenzen durchgeführt. Die Messungen auf starrer Unterlage dienten als Ergänzung. In den Versuchen wurden folgende Frequenzen angewendet:

Gehen	$1.3 \text{ Hz} \leq f_G \leq 2.4 \text{ Hz}$
Laufen	$2.0 \text{ Hz} \leq f_L \leq 3.0 \text{ Hz}$
Hüpfen	$1.4 \text{ Hz} \leq f_H \leq 3.4 \text{ Hz}$

Bei den Schwingungsversuchen mit den Balken B1 und B2 wurde für jede Balkeneigenfrequenz das grundsätzlich gleiche Versuchsprogramm wie für die Kraftmessplatte auf Balken B1 durchgeführt, wobei jedoch der Balken B2 nur durch Hüpfen angeregt wurde. Die Eigenfrequenzen der Balken betrugen:

Balken B1: $f_1 = 2.0 \text{ Hz}$
 $f_1 = 2.3 \text{ Hz}$
 $f_1 = 1.7 \text{ Hz}$

Balken B2: $f_1 = 4.02 \text{ Hz}$
 $f_1 = 5.20 \text{ Hz}$
 $f_1 = 7.12 \text{ Hz}$

Während der Schwingungsversuche wurde darauf geachtet, im elastischen Tragwerksbereich mit möglichst kleiner Rissöffnung zu bleiben. Beim Balken B2 konnte diese Bedingung vollkommen eingehalten werden. Beim Balken B1 hingegen mussten Risse in Kauf genommen werden, wobei die Beanspruchungen während der Versuche stets auf den linear elastischen Bereich beschränkt blieben.

Im folgenden werden die Resultate zusammengefasst:

5.2 Dynamische Lasten

Gehen

Der zeitliche Verlauf der Last eines Fusses beim Gehen weist zwei Maximalwerte auf, von denen der erste dem Auftreffen auf dem Boden und der zweite dem Abstoßen vom Boden entspricht. Grössere Unterschiede zwischen einzelnen Zeitverläufen treten hauptsächlich in den ersten 50 ms auf, wobei im Falle von hartem Schuhwerk eine Kraftspitze entsteht, die bei weichem Schuhwerk nicht oder nur teilweise festgestellt werden kann. Bei den Zeitverläufen verschiedener Versuchspersonen mit analogem Schuhwerk konnte demgegenüber kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden.

Die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ sind hauptsächlich von der Schrittfrequenz f_G abhängig. Aus den Zeitverläufen, die mit der Kraftmessplatte auf dem schwingenden Balken B1 bestimmt wurden, konnten folgende mittlere Koeffizienten ermittelt werden:

f_G	1.7 Hz	2.0 Hz	2.3 Hz
$\Delta G_1/G$	0.2	0.4	0.48
$\Delta G_2/G$	0.05	0.06	0.08
$\Delta G_3/G$	0.03	0.04	0.06

Die entsprechenden Koeffizienten $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ auf starrer Unterlage stimmen ungefähr mit den obigen Werten überein. Bei $\Delta G_1/G$ resultiert eine Erhöhung von 5 bis 10% gegenüber dem Wert auf dem schwingenden Balken B1.

Laufen

Im Gegensatz zum Gehen geht beim Laufen der Bodenkontakt zeitweise verloren. Es entsteht ein Zeitverlauf mit nur noch einem Maximalwert. Mit steigender Schritt-
frequenz steigt dieses Lastmaximum $F_{p,max} = k_p \cdot G$ bei gleichzeitiger Verringerung
der Kontaktdauer t_p kontinuierlich an. Ferner spielt vor allem der Laufstil,
d.h. die Art des Auftreffens des Fusses auf dem Boden, eine wichtige Rolle in
bezug auf die Kontaktdauer t_p und den Stossfaktor k_p . Die grössten gemessenen
Stossfaktoren und die entsprechenden Kontaktdauern betrugen auf dem schwingenden
Balken B1 bei verschiedenen Schrittfrequenzen:

f_L	2.0 Hz	2.6 Hz	3.0 Hz
t_p	0.3 s	0.24 s	0.22 s
k_p	2.4	3.0	3.2

Auf starrer Unterlage wurden keine wesentlichen Unterschiede festgestellt. Es bestand lediglich eine Tendenz zu leicht höheren Stossfaktoren und zu entsprechend niedrigeren Kontaktdauern, wobei die Differenzen kleiner als 5% waren.

Die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ sind etwa linear abhängig vom Verhältnis t_p/T_p , das beim Laufen Werte zwischen 0.55 und 0.7 annimmt. Die ermittelten Koeffizienten für die Zeitverläufe auf dem schwingenden Balken B1 mit den Stossfaktoren gemäss der obigen Tabelle betragen (in Klammern Werte nach dem Halbsinus-Modell):

t_p/T_p	0.6	0.65
$\Delta G_1/G$	1.6 (1.5)	1.55 (1.4)
$\Delta G_2/G$	0.7 (0.4)	0.55 (0.25)
$\Delta G_3/G$	0.12 (-)	0.09 (-)

Die entsprechenden Koeffizienten auf starrer Unterlage sind nur unwesentlich höher.

Als Beziehung zwischen der Lauffrequenz und dem für die Fourier-Amplituden massgebenden Verhältnis t_p/T_p gilt der Ausdruck $t_p/T_p = t_p \cdot f_L$.

Hüpfen

Der zeitliche Verlauf der Last beim Hüpfen ist grundsätzlich ähnlich wie derjenige beim Laufen. Die Stossfaktoren k_p sind jedoch rund doppelt so hoch wie beim Laufen, und die Kontaktdauer t_p beträgt beim Hüpfen nur etwa 2/3 derjenigen beim Laufen. Auf dem schwingenden Balken B1 erreicht die Kontaktdauer t_p bei $f_H > 2.4$ Hz mit ~ 0.15 s einen Grenzwert, der aus physiologischen Gründen nicht wesentlich unterschritten werden kann. Auf starrer Unterlage liegt die Grenze der Kontaktdauer bei 0.135 s und wird für Frequenzen $f_H \geq 2$ Hz erreicht. Das Lastmaximum $F_{p,max} = k_p \cdot G$ ist sowohl auf dem schwingenden Balken als auch auf starrer Unterlage für Hüpf Frequenzen $f_H = 1.6$ bis 2 Hz etwa konstant und nimmt mit höheren Frequenzen linear ab. Dabei wurden die folgenden maximalen Stossfaktoren gemessen:

f_H	2.0 Hz	3.0 Hz
k_p mit Kraftmessplatte auf B1	5.5	4.0
k_p auf starrer Unterlage	7.0	4.7

Die Fourier-Amplitudenkoeffizienten $\Delta G_1/G$, $\Delta G_2/G$ und $\Delta G_3/G$ sind wie beim Laufen etwa linear abhängig vom Verhältnis t_p/T_p . Auf dem schwingenden Balken B1 treten für t_p/T_p Werte zwischen 0.3 und 0.5 und auf starrer Unterlage solche zwischen 0.25 und 0.45 auf. Die ermittelten Koeffizienten auf dem schwingenden Balken B1 betragen (in Klammern Werte nach dem Halbsinus-Modell):

t_p/T_p	0.3	0.4	0.5
$\Delta G_1/G$	1.85 (1.8)	1.80 (1.7)	1.75 (1.6)
$\Delta G_2/G$	1.52 (1.4)	1.31 (1.05)	1.10 (0.7)
$\Delta G_3/G$	1.05 (0.8)	0.75 (0.3)	0.45 (-)

Die Koeffizienten auf starrer Unterlage sind nur unwesentlich höher.

Zur Ermittlung eines praktischen Mindestwertes für das für die Fourier-Amplitudenkoeffizienten massgebende Verhältnis t_p/T_p kann folgende Beziehung verwendet werden: $t_p/T_p = t_{p,min} \cdot f_H$ mit $t_{p,min} \approx 0.15$ s.

5.3 Balkenschwingungen

Die in den Schwingungsversuchen aufgetretenen maximalen Verschiebungen und Beschleunigungen sind in der folgenden Zusammenstellung enthalten (Schwingwegamplitude ausgehend von Ruhelage gegen unten):

<u>Balken B1:</u>	Gehen	Laufen	Hüpfen
f_1	2.0 Hz	2.3 Hz	1.7 Hz
w_{max}	15 mm	25 mm	75 mm

f_1	2.0 Hz	2.3 Hz	2.0 Hz
a_{max}	0.18 g	0.6 g	1.0 g

<u>Balken B2:</u>	Hüpfen
f_1	4.02 Hz
w_{max}	23 mm

f_1	4.02 Hz
a_{max}	1.5 g

Das äquivalente viskose Dämpfungsmass ξ betrug beim Balken B1 rund 0.9% und beim Balken B2 0.7%.

Die Rechenergebnisse, die mit dem Modell "Einmassenschwinger" erzielt wurden, stimmen im allgemeinen gut mit den Versuchswerten überein. Nur die Breite des Resonanzbereichs in einer Resonanzkurve war in den Versuchen zum Teil mehr als doppelt so gross wie in der Berechnung. Dieser Unterschied wird darauf zurückgeführt, dass die Einwirkungsfrequenz durch die Balkenschwingung beeinflusst wird (Rückkoppelungseffekt).

Das Dämpfungsmass ξ ist der weitaus wichtigste Parameter in einer Berechnung. Insbesondere bei Resonanz treten bei Unterschieden zwischen dem angenommenen und dem tatsächlichen Dämpfungsmass des Tragwerks erhebliche Differenzen auf. Die Dämpfung spielt ganz besonders bei der Bemessung eines Stahlbetontragwerks gegen unzulässige Schwingungen eine Rolle, da wegen der oft nicht genauer bekannten Mitwirkung von Belägen, Geländern oder nichttragenden Elementen das Dämpfungsmass nur schwer quantifizierbar ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Planung, der Durchführung und den Resultaten von Versuchen zur Ermittlung der dynamischen Lasten aus Gehen, Laufen und Hüpfen sowie mit den Auswirkungen dieser Lasten auf grosse vorgespannte Betonbalken. Die Lasten wurden sowohl auf den schwingenden Trägern als auch auf starrer Unterlage ermittelt. Sie wurden insbesondere in Form von Fourier-Amplitudenkoeffizienten festgehalten, die von der Frequenz (Gehen, laufen) und/oder vom Verhältnis Kontaktdauer mit Unterlage/Periode der Last (Laufen, Hüpfen) abhängen. Beim Hüpfen kann ein Stossfaktor (Verhältnis Maximallast/Eigengewicht) von bis zu 7 erreicht werden.

Durch eine einzige Versuchsperson wurden beim 19 m langen Balken bei einer Grundfrequenz von 2.3 Hz mit Laufen eine Beschleunigung von 0.6 g und bei einer Grundfrequenz von 2.0 Hz mit Hüpfen eine solche von 1.0 g erzeugt. Beim 14 m langen Balken wurden bei einer Grundfrequenz von 4.0 Hz mit Hüpfen eine Beschleunigung von 1.5 g und bei einer Grundfrequenz von 5.2 Hz eine solche von 1.4 g erzeugt, während bei einer Grundfrequenz von 7.1 Hz noch Beschleunigungen bis zu 0.45 auftraten. Dabei bestätigte es sich, dass bei Tragwerken mit Grundfrequenzen höher als etwa 3.5 Hz Resonanzzustände in den Frequenzen der 2. und 3. Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Last massgebend sind.

RESUME

Le présent rapport décrit la conception, l'exécution et les résultats d'une série d'essais pour déterminer les charges dynamiques provoquées par des gens marchant, courant et sautillant ainsi que les répercussions de ses charges sur des poutres en béton précontraint à grande portée. Les charges ont été mesurées non seulement sur les poutres oscillantes mais aussi sur un support rigide. En particulier on a déterminé les coefficients d'amplitude de Fourier des charges. Ces coefficients dépendent de la fréquence (marcher, courir) et du rapport entre la durée de contact avec le support et la période de la charge (courir, sautiller). Pour le sautillemeent le facteur dynamique rapport de la charge maximale au poids propre peut atteindre une valeur 7.

Une personne d'expériences seule pouvait provoquer en courant une accélération de 0.6 g de la poutre de 19 m et pour une fréquence de base de 2.3 Hz. En sautillant on provoquait une accélération de 1.0 g pour une fréquence de base de 2.0 Hz.

Une accélération de 1.5 g était atteinte en sautillant pour la poutre de 14 m et une fréquence de base de 4.0 Hz ainsi qu'une accélération de 1.4 g pour une fréquence de base de 5.2 Hz. Même pour une fréquence de base de 7.1 Hz on observait encore des accélérations jusqu'à 0.45 Hz.

Pour les structures avec une fréquence de base plus élevée qu'approximativement 3.5 Hz on a constaté que les états de résonance déterminants sont ceux dans les fréquences de la 2e et la 3e oscillation régulière de la variation temporelle de la charge dynamique.

SUMMARY

The report deals with the planning, execution and analysis of tests in order to find the dynamic loads resulting from walking, running and jumping. It also shows the influence these loads have on large prestressed concrete beams. These loads have been ascertained on swinging beams as well as on rigid supports. They have been recorded mainly as Fourier-amplitude coefficients which depend on the frequency (walking, running) and/or on the ratio of contact duration with the supports to the periodic loads (running, jumping). In jumping, an impact factor as high as 7 can be obtained (ratio of the maximum load to the weight of the person).

A single person running caused accelerations of 0.6 g in a beam measuring 19 m in length with a fundamental frequency of 2.3 Hz, and 1.0 g with a fundamental frequency of 2.0 Hz when jumping.

Tests carried out on a beam measuring 14 m in length showed accelerations of 1.5 g caused by a person jumping with a fundamental frequency of 4.0 Hz. Jumping with a fundamental frequency of 5.2 Hz caused accelerations of 1.4 g. On a fundamental frequency of 7.1 Hz accelerations of up to 0.45 g were measured.

The tests show that for resonance in structures with a fundamental frequency higher than approximately 3.5 Hz, the frequencies of the 2nd and the 3rd harmonic of the load-time function are decisive.

VERDANKUNGEN

Die Versuchsanlage für die Messung der zeitlichen Verläufe der dynamischen Lasten wurde vom Laboratorium für Biomechanik der ETH Zürich zur Verfügung gestellt. Die Verfasser danken dem Leiter, Herrn Dr. E. Stüssi, und seinen Mitarbeitern, Herren Dr. J. Denoth und H. Gerber, für die wertvolle Zusammenarbeit. Für die kostenlose Zurverfügungstellung eines Laufbandtrainers wird Herrn Gujan, Verkaufsleiter der Firma GTSM, Magglingen, bestens gedankt.

Bei der Versuchsdurchführung hat Herr K. Bucher mitgearbeitet. Herr M. Baumann, dipl. Bauing. ETH, hat die messtechnischen Belange betreut. Herr G. Göseli zeichnete die Bilder und betreute die Drucklegung des Berichtes. Für die tatkräftige Unterstützung und die gute Zusammenarbeit danken die Verfasser allen genannten Mitarbeitern sowie allen anderen, die zum Entstehen dieses Versuchsberichtes beigetragen haben.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bachmann H., Ammann W.: "Schwingungsprobleme bei Bauwerken – Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen." Structural Engineering Documents No. 3. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH), Zürich, 1987.
- [2] Dieterle R.: "Modelle für das Dämpfungsverhalten von schwingenden Stahlbetonträgern im ungerissenen und gerissenen Zustand", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 111, April 1981, Birkhäuser Verlag Basel.
- [3] Gisin W., Bachmann H.: "Versuche zum dynamischen Verhalten teilweise vorgespannter Leichtbeton- und Betonbalken", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-2, September 1985, Birkhäuser Verlag Basel.
- [4] Bachmann H.: "Schwingungsverhalten teilweise vorgespannter Konstruktionen aus Leichtbeton und Normalbeton", Beton- und Stahlbetonbau, Heft 7/1986. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 151, Juli 1986, Birkhäuser Verlag Basel.
- [5] Nigg Benno M.: "Biomechanics of running shoes", Institut für Biomechanik, ETH Zürich.
- [6] Clough R.W., Penzien J.: "Dynamics of Structures", Mc Graw-Hill Book Company.

BEZEICHNUNGENGeometrische Grössen

A_c	Betonquerschnittsfläche
A_s	Fläche der unteren schlaffen Balkenlängsbewehrung
A'_s	Fläche der oberen schlaffen Balkenlängsbewehrung
A_p	Fläche der Spanndrähte im Spannglied
A_i	ideelle Querschnittsfläche
I_c	Trägheitsmoment des reinen Betonquerschnittes im ungerissenen Zustand
I_i	Trägheitsmoment des ideellen Betonquerschnittes im ungerissenen Zustand
l	Balkenspannweite
y	Abstand der Schweraxe vom unteren Rand
W_c^o	Trägheitsmoment des Betonquerschnittes bzw. des oberen Randes
W_c''	Trägheitsmoment des Betonquerschnittes bzw. des unteren Randes
$\emptyset$	Durchmesser
s	Bügelabstand

Kraftgrössen

F	Einzelkraft beim statischen Belastungsversuch
$F(t)$	dynamische Anregungskraft
F_p	dynamische Last einer Person beim Gehen, Laufen oder Hüpfen
P	Vorspannkraft

Massen und Gewichte

m	Masse
G	Eigengewicht
σ	Raumlast

Festigkeiten, Spannungen

f_c	rechnerische Druckfestigkeit des Betons
f_{cw}	Würfeldruckfestigkeit des Betons
f_{cp}	Prismendruckfestigkeit des Betons
σ_s	Spannungen im schlaffen Stahl
f_{sy}	Streckgrenze des schlaffen Stahls

f_{st}	Zugfestigkeit des schlaffen Stahls
f_{pt}	Zugfestigkeit des Spannstahls
E_c	Elastizitätsmodul des Betons
E_s	Elastizitätsmodul des schlaffen Stahls
E_p	Elastizitätsmodul des Spannstahls
B	Biegesteifigkeit des Balkens ($B = EI$)
τ_c	untere Schubspannungsgrenze des Betons

Verformungen

w	Relativverschiebung
Δw	totale Relativverschiebung $\Delta w = w^+ + w^- $ (+ = nach unten, - = nach oben)
k	Federsteifigkeit eines Einmassenschwingers
λ_{G1}	Gleichmassdehnung des Stahls

Dynamische Grössen

ω	Eigenfrequenz
ω_0	Erregerkreisfrequenz
f_1	Eigenfrequenz des Balkens
f_G	Gehfrequenz
f_L	Lauffrequenz
f_H	Hüppfrequenz
δ	logarithmisches Dekrement
ξ	Dämpfungsmaß
a	Beschleunigung
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)
$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit
t_p	Kontaktdauer
T_p	Periode
k_p	Stossfaktor

Querschnitts- werte	A [mm ²]	A _s (Feldmitte) [mm ²]	A' _s [mm ²]	A _p [mm ²]	A _i (Feldmitte) [mm ²]	y [mm]	I _c [mm ⁴]	W _c ^o [mm ³]	W _c ^u [mm ³]	B [Nmm ²]	I _i [mm ⁴]
Balken B1	282'000	2281	879	847	322'000	288	5,31 · 10 ⁹	27,6 · 10 ⁶	18,4 · 10 ⁶	1,14 · 10 ¹⁴	6,97 · 10 ⁹
Balken B2	282'000	1527	879	539	311'450	288	5,31 · 10 ⁹	27,6 · 10 ⁶	18,4 · 10 ⁶	1,14 · 10 ¹⁴	6,18 · 10 ⁹

Tabelle 1 : Rechnerische Querschnittswerte im ungerissenen Zustand für reine Biegung (n = 10)

Prüfkörper : Würfel 0.15 x 0.15 x 0.15 m → f _{cw} Prisma 0.15 x 0.30 m → f _{cp} , E					
	Anzahl Proben	Proben- alter	f _{cw} [N/mm ²]	f _{cp} [N/mm ²]	E [N/mm ²]
Balken B1	3 1	29 30	39.4	37.2	21'500
Balken B2	3 1	35 35	36.4 *	29.9 *	17'600 *

* schlecht vibrierte Proben

Tabelle 2 : Eigenschaften des Leichtbetons

Stahlsorte	f _y [N/mm ²]	f _t [N/mm ²]	E [N/mm ²]	λ _{GL} [%]
S500(topar,box-ultra)	500	600	210'000	14
Spannstahl (BBRV) Drähte ϕ 7mm	1520	1670	201'000	2

Tabelle 3 : Eigenschaften der Stähle (garantierte Nennwerte der Stahl-lieferanten)

Tätigkeit	Kraftmessplatte auf Balken B1		Kraftmessplatte auf starrem Boden	
	Frequenz [Hz]	Anzahl Versuche	Frequenz [Hz]	Anzahl Versuche
Gehen	1.33	3	1.8	2
	1.6	3	2.0	5
	1.73	3	2.1	2
	1.80	3	2.2	2
	1.93	3	2.3	2
	2.0	7	2.4	2
	2.1	3		
	2.2	3		
	2.3	3		
	2.4	3		
Laufen	2.0	6	2.8	4
	2.1	3		
	2.2	6		
	2.3	3		
	2.4	6		
	2.53	5		
	2.67	8		
	2.8	5		
	2.93	8		
Hüpfen	1.4	1	1.6	2
	1.6	1	1.73	3
	1.8	2	1.87	2
	1.93	1	2.0	2
	2.0	7	2.1	2
	2.1	2	2.2	2
	2.2	2	2.4	2
	2.3	1	2.67	2
	2.4	2	3.07	2
	2.53	1		
	2.67	4		
	2.93	1		
	3.2	2		
	3.47	1		

Tabelle 4 : Messprogramm für die zeitlichen Verläufe der dynamischen Lasten von einer einzigen Versuchsperson

Tätigkeit	Kraftmessplatte auf Balken B1	
	Frequenz [Hz]	Anzahl Versuchspersonen
Gehen	2.0	8
	2.4	8
Laufen	2.4	8

Tabelle 5: Messprogramm für die zeitlichen Verläufe der dynamischen Lasten von verschiedenen Versuchspersonen

	Spannweite [m]	Eigenfrequenz [Hz]	Dämpfung [%]
Balken B1	18.75*)	1.7	0.9 ÷ 1.6
	18.65	2.0	0.75 ÷ 1.0
	17.25	2.3	0.85 ÷ 1.0
	15.90	2.68	0.85 ÷ 1.0
	14.50	3.16	0.95 ÷ 1.0
	13.10	3.70	0.95 ÷ 1.0
	11.70	3.96	~ 1.1
Balken B2	13.20	4.02	0.7
	11.40	5.20	0.7
	8.50	7.12	1.5 ÷ 1.8

*) Geringere Vorspannkraft, vgl. Abschnitt 2.4.5

Tabelle 6: Spannweiten, Eigenfrequenzen und Dämpfung

	Balken B1	Balken B2
Totalmasse [t]	11.14	7.88
Masse pro Laufmeter [kg/m']	586	563

Tabelle 7: Balkenmasse (Messwerte)

	Versuche Bemerkungen	Ankerkraft [kN]	nominelle Vorspannkraft ($0.7f_{pt}$) [kN]
Balken B1	$f_1 = 1.70\text{Hz}; l = 18.70$	736	990
	alle übrigen Versuche	954	990
Balken B2	alle Versuche	623	630

Tabelle 8: Vorspannkraft

Kraftmessplatte auf starrer Unterlage			Kraftmessplatte auf dem Balken B1		
f_H Hz	t_p [s] natürliches Hüpfen	t_p [s] intensives Hüpfen	f_H [Hz]	t_p [s] natürliches Hüpfen	t_p [s] intensives Hüpfen
1.6	$0.21 \div 0.22$	$0.165 \div 0.17$	1.6		~ 0.20
1.73	$0.20 \div 0.22$	$0.145 \div 0.155$	1.8		~ 0.18
1.87	$0.20 \div 0.22$	~ 0.145	2.0	~ 0.22	~ 0.16
2.0	$0.18 \div 0.19$	$0.135 \div 0.14$	2.1	~ 0.18	$\sim 0.15 \div 0.16$
2.1	$0.165 \div 0.19$	$0.135 \div 0.14$	2.2	$0.16 \div 0.18$	$\sim 0.15 \div 0.16$
2.2	$0.165 \div 0.19$	$0.135 \div 0.14$	2.4	$0.16 \div 0.18$	$\sim 0.15 \div 0.16$
2.4	$0.165 \div 0.18$	$0.135 \div 0.14$	2.8	$0.16 \div 0.17$	~ 0.15
2.67	$0.165 \div 0.17$	0.135	3.2	$0.15 \div 0.17$	~ 0.15
3.07	$0.155 \div 0.165$	0.135			

Tabelle 9: Kontaktdauer beim Hüpfen

Balken B1		Balken B2	
Relativverschiebung Δw [mm] $\Delta w = w^+ + w^- $	Biegesteifigkeit B [10^3 kNm^2]	Relativverschiebung Δw [mm]	Biegesteifigkeit B 10^3 kNm^2
10	117	5	115
30	113	16.5	115
45	110	20	114
60	107	25	112
75	105	30	110
90	103	35	108
110	100	42.5	102

Tabelle 10: Biegesteifigkeiten

Balken B1, Vorspannkraft P = 935 kN		Balken B2, Vorspannkraft P = 610 kN	
Relativverschiebung [mm]	Rissbreite [mm]	Relativverschiebung [mm]	Rissbreite [mm]
22.4	0.05 ÷ 0.1	2.2	} ungerissen
28.0	0.075 ÷ 0.125	3.6	
37.8	÷ 0.15	5.9	
48.0	÷ 0.175	8.1	
57.6	÷ 0.175	10.2	
68.6	÷ 0.2	12.6	÷ 0.06
82.0	0.2 ÷ 0.25	14.9	0.05 ÷ 0.1
95.6	÷ 0.275	17.5	0.08 ÷ 0.1
107.8	÷ 0.3	20.5	÷ 0.1
121.9	÷ 0.35		
135.5	÷ 0.35		
147.2	÷ 0.375		
- 6.7	÷ 0.25	- 2.3	÷ 0.05
- 14.2	÷ 0.25	- 4.0	÷ 0.08
- 23.1	÷ 0.25	- 6.4	0.08 ÷ 0.09
- 30.2	÷ 0.05	- 8.4	÷ 0.1
- 36.9	÷ 0.05	- 10.4	÷ 0.1
- 45.2	0.05 ÷ 0.06	- 12.6	÷ 0.1
- 51.3	0.05 ÷ 0.075	- 15.0	÷ 0.11
- 54.5	÷ 0.075	- 17.7	0.12 ÷ 0.12
- 75.4	÷ 0.1	- 22.2	0.15 ÷ 0.25
- 87.3	÷ 0.25		
- 98.1	÷ 0.30		

Tabelle 11: Rissbreiten während den statischen Belastungsversuchen

Bild 1 : Gedämpfter Einmassenschwinger unter harmonischer Anregung

Bild 2 : Stationäre Antwort der Verschiebungen

Bild 3: Vergrößerungsfaktor D

Bild 4: "Halbsinus - Modell"

Bild 5: Kraftmessplatte auf Balken B1

Bild 6: Laufbandtrainer

Bild 7: Dynamometer

Bild 8: Kraftmessdose zur Bestimmung der Masse

Bild 9: Linienkipplager

Bild 10: Rollenlager

Bild 11: Wegaufnehmer und Beschleunigungsgeber

Bild 12: Statische Belastungseinrichtung für Relativverschiebungen nach unten

Bild 13: Statische Belastungseinrichtung für Relativverschiebungen nach oben

Bild 14: Funktionsanalyser mit Plotter, links Verstärker

Bild 15: Versuchsanlage

Balken B1

Schnitt C-C (siehe Bild 8)

Balken B2

Schnitt C-C (siehe Bild 8)

Bild 16 Querschnitte und Bewehrungen

Bild 17: Längsschnitt, Bewehrungen und Kabellage

Mögliche Lagerstellungen

Bild 18: Mögliche Lagerstellungen für beide Balken

Bild 19 : Statische Belastungseinrichtung

Bild 20: Rechnerische Stahlspannung des Balkens B1
in Funktion der Verschiebung in Balkenmitte

Bild 21

Bild 22

Bild 23

Arten des Aufsetzens des Fusses beim Laufen (Laufstil)

Bild 24: Begriffe und zugehörige Frequenzen

Bild 25: Schematische Darstellung der Bestimmung der Masse

Bild 27: Zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Gehen einer Versuchsperson auf dem schwingenden Balken B1 (Gewicht der Versuchsperson 0.72 kN)

Bild 28: Zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Gehen verschiedener Versuchspersonen mit $f_G = 2 \text{ Hz}$ auf dem schwingenden Balken B1.

Bild 29: Einfluss des Schuhwerks auf den zeitlichen Verlauf der dynamischen Last beim Gehen mit $f_G = 2 \text{ Hz}$ auf dem schwingenden Balken B1 (Gewicht der Versuchsperson 0.72 kN)

Bild 30: Zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Gehen einer Versuchsperson auf starrer Unterlage (Gewicht der Versuchsperson 0.72 kN)

Bild 31 : Fourieramplitudenkoeffizienten beim Gehen auf dem schwingenden Balken B1

Bild 32 : Fourieramplitudenkoeffizienten beim Gehen auf starrer Unterlage

Bild 33: Phasenwinkel aus Messungen beim Gehen auf dem schwingenden Balken B1

Bild 34: Phasenwinkel aus Messungen beim Gehen auf starrer Unterlage

Bild 35: Zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Laufen einer Versuchsperson auf dem schwingenden Balken B1 (Gewicht der Versuchsperson 0.72 kN)

Bild 36: Zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Laufen verschiedener Versuchspersonen mit $f_L = 2.4 \text{ Hz}$ auf dem schwingenden Balken B1

Bild 37: Einfluss des Laufstils auf den zeitlichen Verlauf der dynamischen Last beim Laufen mit $f_L = 2.53 \text{ Hz}$ auf schwingendem Balken B1 (Gewicht der Versuchsperson 0.72 kN)

Bild 38: Fourieramplitudenkoeffizienten beim Laufen auf dem schwingenden Balken B1

Bild 39: Zeitliche Verläufe der dynamischen Last beim Hüpfen einer Versuchsperson auf dem schwingenden Balken B1 (Gewicht der Versuchsperson 0.72 kN)

Bild 40: Stossfaktoren beim Hüpfen auf starrer Unterlage

Bild 41: Stossfaktoren beim Hüpfen auf Balken B1

Bild 42: Fourieramplitudenkoeffizienten beim Hüpfen auf dem schwingenden Balken B1

Balken B1
Eigenfrequenz 2Hz
Anregung: Gehen

Legende:

- Messwert
- 2 2 identische Messwerte
- Δ Rechenwert

Bild 43

Balken B1
Eigenfrequenz 2Hz
Anregung: Gehen auf Laufbandtrainer

Legende:

- Messwert
- 2 2 identische Messwerte

Bild 44

Balken B1

Eigenfrequenz 2.3 Hz

Anregung : Gehen

Legende:

- Messwert
- 2 2 identische Messwerte
- Δ Rechenwert

Bild 45

Balken B1

Eigenfrequenz 1.7 Hz

Anregung : Gehen

Legende:

- Messwert

Bild 46

Balken B1
Eigenfrequenz: variabel
Anregung: Gehen mit 2Hz

Bild 47

Balken B1
Eigenfrequenz 2 Hz
Anregung : Laufen

Legende:

• Messwert

Bild 48

Balken B1
Eigenfrequenz 2 Hz
Anregung : Laufen auf Laufbandtrainer

Legende:

• Messwert

•2 2 identische Messwerte

Bild 49

Balken B1
Eigenfrequenz 2.3Hz
Anregung: Laufen

Legende:

◦ Messwert

Bild 50

Balken B1
Eigenfrequenz 1.7 Hz
Anregung Laufen

Legende:

◦ Messwert

Bild 51

Bild 52

Balken B1
Eigenfrequenz 2.3 Hz
Anregung: Hüpfen 2m von Balkenmitte

Legende :

- Messwert
- △ Rechenwert

Bild 53

Balken B1

Eigenfrequenz 1.7 Hz

Anregung: Hüpfen 2m von Balkenmitte

Legende:

• Messwert

Bild 54

Balken B1

Eigenfrequenz : variabel

Anregung : Hüpfen 2m von Balkenmitte mit 1.8 Hz

Legende :

• Messwert

Bild 55

Balken B2
 Eigenfrequenz 4.02 Hz
 Anregung: Hüpfen in Balkenmitte

Legende:

- Messwert
- △ Rechenwert

Bild 56

Balken B2

Eigenfrequenz 5.20 Hz

Anregung : Hüpfen in Balkenmitte

Legende:

- Messwert
- 2 2 identische Messwerte
- △ Rechenwert

Bild 57

Balken B2

Eigenfrequenz 7.12 Hz

Anregung: Hüpfen in Balkenmitte

Legende:

- Messwert
- 2 2 identische Messwerte

Bild 58

Bild 59: Verschiebung in Balkenmitte beim Gehen mit $f_G = 2$ Hz

Bild 60: Beschleunigung in Balkenmitte beim Gehen mit 2.1 Hz

Balken B1
Eigenfrequenz 2 Hz
Anregung: Laufen mit 2 Hz

Bild 61: Verschiebung in Balkenmitte beim Laufen mit $f_L = 2 \text{ Hz}$

Balken B1
Eigenfrequenz 2 Hz
Anregung: Laufen mit 2.2 Hz

Bild 62: Verschiebung in Balkenmitte beim Laufen mit $f_L = 2.2 \text{ Hz}$

Bild 63: Verschiebung in Balkenmitte beim Hüpfen mit $f_H = 2$ Hz Bild 64: Beschleunigung im Viertelpunkt beim Hüpfen mit $f_H = 2.67$ Hz

Balken B1

Verschiebungen nach unten

$P = 935 \text{ kN}$

Verschiebungen nach oben

$P = 935 \text{ kN}$

Bild 65: Statische Last - Verschiebungskurven für Balken B1

Bild 66: Statische Last-Verschiebungskurven für Balken B2

Bild 67: Definition der Sekantensteifigkeit

Bild 68: Dämpfung in Funktion der Relativverschiebung

Bild 69: Eigenfrequenz in Funktion der Relativverschiebung in Balkenmitte