

LUZA, G.

Menscheninduzierte Einwirkungen für dynamische Berechnungen

Menschen verursachen durch Körperbewegungen Einwirkungen auf Tragsysteme. Wichtige Kenngrößen dieser Einwirkungen sind die Last, die zugeführte Energie und die Leistung. Bisherige Betrachtungen stellen bei den Einwirkungen ausschließlich die Last als Funktion der Zeit und bei der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken nur die Eigenfrequenzen dar.

Da der Mensch mit der Lastübertragung dem System auch Energie zuführt, ist nicht nur die Last, sondern auch die zugeführte Energie und die notwendige Leistung miteinzubeziehen. Die Energiebereitstellung (Leistung) des menschlichen Körpers ist nicht konstant, sondern stark von der Ausübungsdauer und dem Trainingszustand eines Menschen abhängig. Somit erscheint es sinnvoll außer der Lastfunktion auch die zugehörige maximale Ausübungsdauer anzugeben.

1. Einleitung, Leistungsabgabe (Energiebereitstellung) des Menschen

Als Grundlage der Leistungsbetrachtungen dient der Zusammenhang der maximalen Ausübungsdauer und der zugehörigen maximalen Leistungsabgabe, wie er z.B. in [1] und [2] angeführt ist. Dieser Zusammenhang ist für Radsport versuchsmäßig bestimmt worden und läßt sich wie folgt angeben:

$$P = k(P_d + b t^c) \quad \text{für } t > 12 \text{ s}, \quad (1)$$

$$P = k(P_{max} + d t + e t^2) \quad \text{für } t < 12 \text{ s}, \quad (2)$$

mit den Werten	$P_d = 132.5$	[W]	$P_{max} = 1450.0$	[W],
	$b = 3290.0$	[W/s]	$d = 2.16$	[W/s],
	$c = -0.445$	[-]	$e = -1.77$	[W/s ²].

Der Trainingsfaktor k ist 1.0 für Spitzensportler. Für durchschnittlich trainierte Menschen ist k rund 0.75. Man erhält daraus eine Dauerleistung P_d von rund 100 Watt. Für Personen, die keinen Sport betreiben, kann man mit einem k von rund 0.5 rechnen.

Der Energieverbrauch des Menschen bei den Bewegungsformen Wippen, Laufen, Springen und Gehen ist hauptsächlich durch deren Schwerpunktsverschiebung gekennzeichnet. Das System Körper besitzt nur in sehr geringem Umfang die Fähigkeit potentielle Energie zu speichern. Für das Abfangen der Körpermasse wird sogar noch weitere Energie benötigt, die in der Größenordnung eines Drittels der zur Aufwärtsbewegung notwendigen Energie ist.

Weitere Einschränkungen hat der Mensch durch seine Beinlänge von rund 90 cm und den Muskelaufbau um das Kniegelenk. Ab einer Oberschenkelneigung von rund 42° zur Lotrechten steigt der Kraftaufwand überproportional stark an. Dadurch entsteht eine maximale Schwerpunktabsenkung $h_{max} \simeq 50 \text{ cm}$ und eine Grenzabsenkung $h_{max} \simeq 23 \text{ cm}$ bei der bei mehrmaliger Ausführung noch ein vertretbarer Kraftaufwand entsteht.

Der Kraftverlauf wird in der Literatur üblicherweise als Fourierreihe in der folgenden Form angeschrieben:

$$F(t) = m g \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \sin \frac{2n\pi t}{T} - \phi_n \right). \quad (3)$$

2. Wippen als Sonderfall dynamischer Belastungen durch Fußgänger

Wippen ist eine Bewegungsform, bei der eine sinusförmige Belastung auf den Untergrund ausgeübt wird. Bei Gleichung (3) werden alle Fourierkoeffizienten außer dem ersten gleich null.

$$F(t) = mg \left(1 + \frac{a_1}{g} \sin \frac{2\pi t}{T} \right) \quad \text{mit} \quad a_1 \leq g. \quad (4)$$

Aus der maximalen Absenkung des Körperschwerpunktes erhält man das Beschleunigungsverhältnis $\alpha_1 = a_1/g$ bezo-

gen auf die Fallbeschleunigung g mit:

$$\frac{a_1}{g} = \frac{2\pi^2 f^2 h}{g} \tag{5}$$

Der Energieaufwand für eine Periode ist die Summe aus der potentiellen Energie, die zum Heben der Körpermasse notwendig ist plus einem Drittel dieser Energie, die der Mensch benötigt, um die Masse beim Absenken wieder abzubremsen. Die Leistung erhält man durch Multiplikation mit der Frequenz. Umformung von Gleichung (1) führt schließlich auf die maximale Ausübungsdauer. Abb. 1 zeigt die maximale Ausübungsdauer als Funktion der Wippfrequenz für einen durchschnittlich trainierten Menschen mit einer Körpermasse m von 65 kg.

3. Belastung durch Springen am Stand und Laufen

Laufen und Springen haben dieselbe Form des Kraftverlaufes in vertikaler Richtung. Der Lastverlauf kann mit guter Näherung als halbsinusförmig während der Kontaktzeit T_K und gleich null während der Flugzeit angenommen werden. Eine Fourieranalyse dieser Halbsinusbelastung mit der Amplitude 1 bringt die Fourierkoeffizienten $\alpha_n = \frac{a_n}{g}$ in Abhängigkeit des Kontaktverhältnisses $\rho = \frac{T_K}{T}$ bezogen auf die Periodendauer T und den zugehörigen Phasenwinkeln ϕ_n zu:

$$\alpha_n = \frac{4\rho}{\pi((2\rho n)^2 - 1)} \cos \pi \rho n, \quad \phi_n = (n + 1)\pi/2. \tag{6}$$

Aus der Bedingung, daß das Mittel der Beschleunigung über eine Periode gleich der Fallbeschleunigung g sein muß, erhält man den Stoßbeiwert $k_P = \frac{\pi}{2\rho}$.

Die Bedingungen, daß das Kontaktverhältnis $\rho = 0.3$ kaum unterschritten werden kann, sowie einer maximalen Schwerpunktabsenkung $h_{max} \approx 25$ cm führen zu Einschränkungen der benötigten Leistung P :

$$P = \frac{mg^2 T}{8} \left(1 + 2\rho \left(\frac{2}{\pi} - 1\right)\right). \tag{7}$$

Durch Umformung von Gleichung (1) erhält man abermals die maximale Ausübungsdauer als Funktion der Frequenz und des Kontaktverhältnisses ρ für das Springen am Stand und für Laufen. Abb. 2 zeigt wieder das Beispiel eines durchschnittlich trainierten Menschen mit einer Körpermasse m von 65 kg.

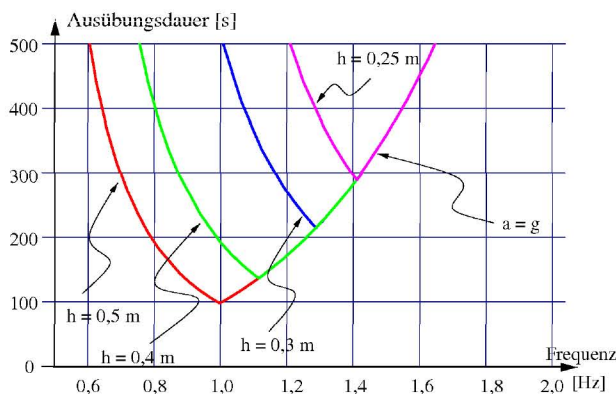


Abbildung 1

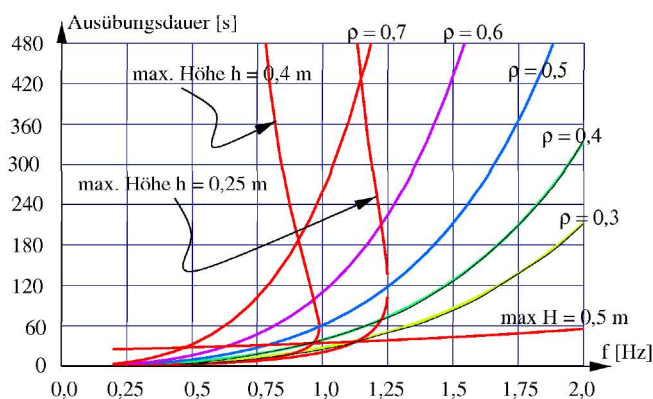


Abbildung 2

4. Literatur

- 1 SAZIORSKI W.M., ALJESCHINSKI S.J., JAKUNIN N.A.: Biomechanische Grundlagen der Ausdauer, Sportverlag Berlin (1987)
- 2 BROOKS A.N., ABBOTT A.V., WILSON D.G.: Das muskelgetriebene Tragflügelboot, Spektrum der Wissenschaft, (1987/2, S 92 ff)
- 3 BACHMANN H., AMMAN W.: Schwingungsprobleme bei Bauwerken - Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen, IABSE Structural Engineering Documents 3d Zürich (1987)

Adresse: DIPL.-ING. GERALD LUZA, Institut für Stahlbau, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien, Österreich