

Bestimmung der Fußimpedanz während des Gehvorgangs

Wieland Weise, Christian Bethke, Werner Scholl
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Ausgangssituation

Werden Decken zur Bestimmung der Trittschalldämmung mit dem Normhammerwerk nach ISO 140 angeregt, so weichen die Geräuscentwicklungen auf vielen Decken stark von denen bei Anregung durch gehende Personen ab. Ursache hierfür ist, dass die mechanischen Quellimpedanzen von Gehern und Hammerwerk völlig verschieden sind. Um Ersatzquellen für die Trittschallanregung weiterentwickeln zu können und die Übereinstimmung solcher Ersatzquellen mit realen Gehern auf verschiedenen Decken vorhersagen zu können, ist es notwendig, die Quellimpedanz von Gehern zu bestimmen. Da diese Impedanz jedoch starke Nichtlinearitäten aufweist, liefert die einfache Messung mit einem Impedanzmesskopf keine hinreichend sicheren Ergebnisse. Deshalb wird zur Zeit ein Messverfahren entwickelt, mit dem die Fußimpedanz unter den dynamischen Verhältnissen des Auftrittvorgangs ermittelt werden kann (s. Abb 1). Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse vorgestellt.



Abbildung 1: Der Aufbau ermöglicht Laufen auf gleichbleibendem Niveau.

Messmethode

Der Aufbau zur Messung der Impedanz des Fußes ist in Abb. 2 dargestellt. Der Fuß tritt auf eine 30 kg schwere Betonbank, die elastisch gelagert ist (Resonanzfrequenz 32 Hz). Die Auftreffgeschwindigkeit v_0 des Fußes wird mit Hilfe des Laservibrometers erfasst, dessen Strahl durch eine Bohrung in der Bank geführt wird. Der Fuß tritt auf ein über die Bohrung gespanntes Band, das den Laserstrahl reflektiert, so dass dessen Geschwindigkeit detektiert wird. Durch einen Beschleunigungsaufnehmer an der Unterseite der Bank wird deren Reaktion gemessen. Entscheidend ist nun, dass der Fuß während des Ausschwingvorgangs auf der Bank verbleibt und somit die gleiche Bewegung wie diese ausführt. Da vor dem Tritt bei $t = 0$ keine Kräfte wirken, müssen die Geschwindigkeitsverläufe $v_F(t)$ und $v_B(t)$ von Fuß bzw. Bank für diese Zeiten konstant angesetzt werden:

$$\text{für } t < 0: v_F = v_0, v_B = 0; \quad \text{für } t > 0: v_F = v_B \quad (1)$$

Für die Berechnung des Fourierspektrums $\text{FT}[v_F]$ wird der Verlauf von $v_F(t)$ aus $v_B(t)$ und einer Heavyside-Stufenfunktion H zusammengesetzt:

$$\text{FT}[v_F] = \text{FT}[v_0 H(-t) + v_B(t)] = \frac{jv_0}{2\pi\omega} + \text{FT}[v_B] \quad (2)$$

Der Faktor 2π ist von der genauen Definition der gewählten Fouriertransformation abhängig, bei diskreter Transformation ist er üblicherweise durch die Aufnahmedauer T zu ersetzen. Die Admittanz Y_F des Fußes ergibt sich aus $\text{FT}[v_F]$ und dem Spektrum der beim Tritt wirkenden Kraft. Die Kraft ist gleich dem negativen der auf die Bank wirkenden Kraft F_B .

$$Y_F(\omega) = -\frac{\text{FT}[v_F]}{\text{FT}[F_B]} = -Y_B(\omega) \frac{\text{FT}[v_F]}{\text{FT}[v_B]} \quad (3)$$

Im letzten Schritt wurde $Y_B(\omega)$, die Admittanz der unbelasteten Bank, eingesetzt. Sie wird vorab bestimmt mit Hilfe eines Shakers, der über einen Kraftmesskopf an der Stelle über der Bohrung für den Laserstrahl angreift, und dem Laservibrometer, das die Bewegung der Bank erfasst. Einsetzen von Gl. (2) in (3) liefert:

$$Y_F(\omega) = Y_B \left(\frac{-jv_0}{2\pi\omega \text{FT}[v_B]} - 1 \right) = Y_B \left(\frac{v_0}{2\pi \text{FT}[a_B]} - 1 \right) \quad (4)$$

hierbei ist $a_B(t)$ die Beschleunigung der Bank. Bei großer Masse der Bank und starker Dämpfung der Resonanz kann der Term -1 vernachlässigt werden.

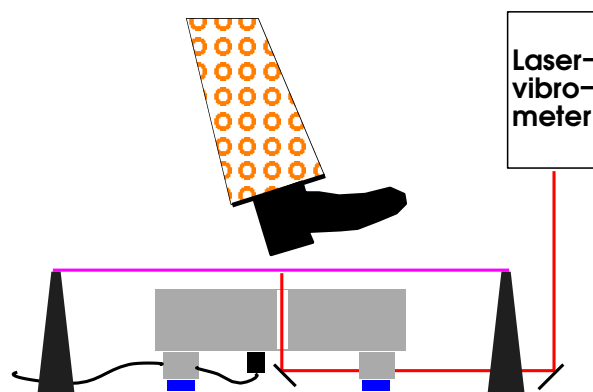


Abbildung 2: Aufbau mit Laservibrometer und Beschleunigungsaufnehmer.

Der Aufbau wird durch die Bestimmung der Admittanz $Y_m = -j/(\omega m_+)$ einer Testmasse geprüft. Die Masse von $m = 309\text{g}$ springt allerdings nach dem Kontakt mit der Bank zurück und wird aufgefangen. Der übertragene Impuls liegt zwischen dem Impuls der ankommenden Masse mv_0 und $2mv_0$. Die Bank reagiert, da ihre Masse sehr viel größer als die der Testmasse ist, in guter Näherung so, als würde die Testmasse nach dem Auftreffen liegenbleiben. Es muss lediglich ein um die Abprallgeschwindigkeit erhöhtes v_0 angenommen werden. Es gilt dann: $m < m_+ < 2m$. Aus Abb. 3 ist ersichtlich, dass auch unterhalb der Resonanzfrequenz der Bank das Verfahren die Admittanz korrekt wiedergibt.

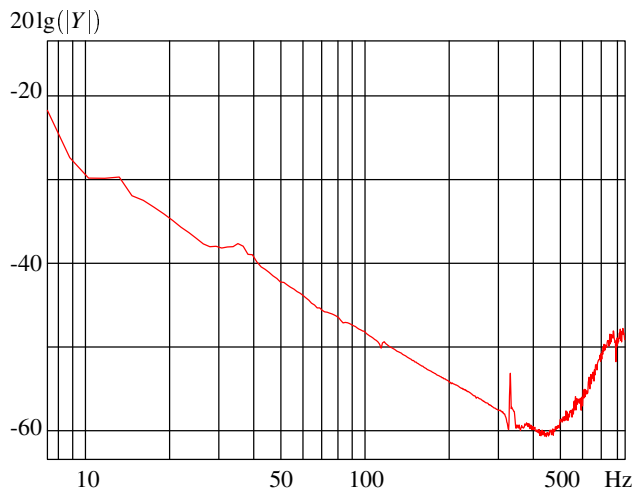


Abbildung 3: Admittanz einer Testmasse.

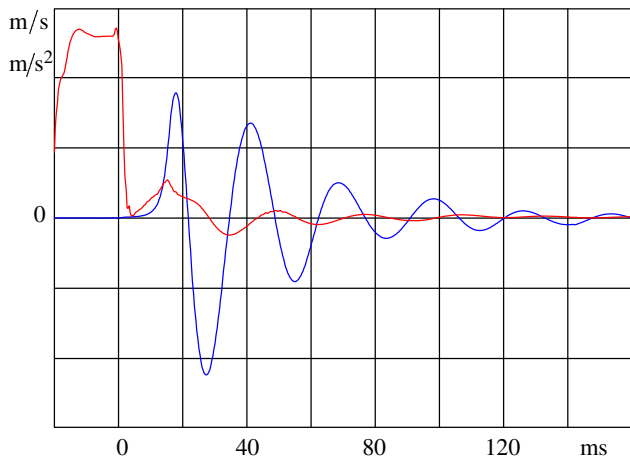


Abbildung 4: $v_F(t)$ und $a_B(t)$ für Auftreten mit Socken.

Fußmessungen

Abb. 4 zeigt einen typische Zeitverlauf von Fußgeschwindigkeit und Beschleunigung der Bank bei Auftritt. Eine steile Änderung der Geschwindigkeit bei gleichzeitigem Einsatz der Beschleunigung lässt auf genaues Auftreffen über der Bohrung schließen.

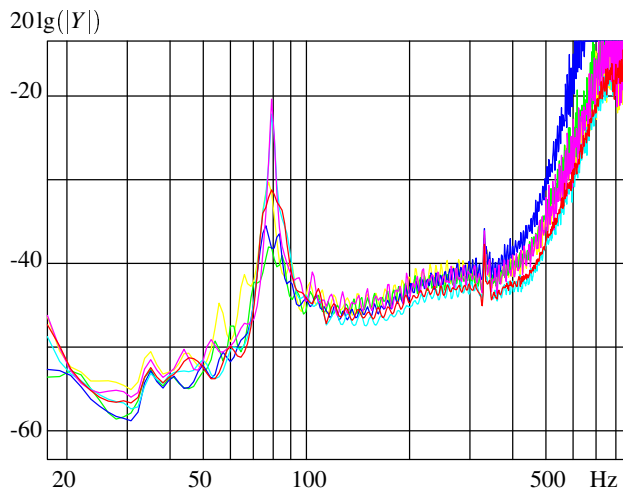


Abbildung 5: Admittanz Y_F für Halbschuh.

Abb. 5 zeigt den Betrag der gemessenen Admittanz für das Gehen mit einem festen Halbschuh. Bei tiefen Frequenzen steigt die Admittanz federartig proportional zur Frequenz, bis zu einer Resonanz bei 80 Hz. Oberhalb von 400 Hz steigt die Admittanz ungefähr mit ω^4 , wird also extrem nachgiebig.

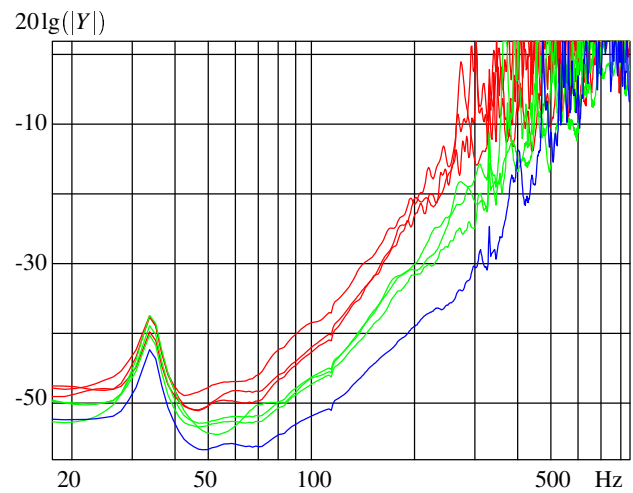


Abbildung 6: Admittanz Y_F für Gehen auf Socken.

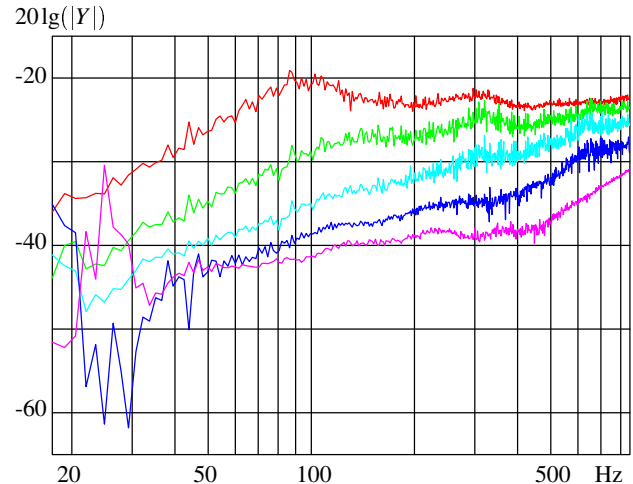


Abbildung 7: Admittanz Y_F statisch, sitzend mit Socken.

Abb. 6 zeigt wiederholte Messungen der Admittanz für das Gehen mit Socken. Die Admittanz ist bei hohen Frequenzen größer als in Abb. 5, da die Fußsohle die Bank beim Auftreten kaum anregen kann. Die Resonanz der Bank ist sichtbar, was auf die Nichtlinearität der Fußsteife zurückzuführen ist. Es wurden Kurvenscharen zu den Anfangsgeschwindigkeiten $v_0 \approx 0.53 \text{ m/s}$, 0.69 m/s , 0.9 m/s ausgewählt. Die Admittanz nimmt aufgrund der Nichtlinearität mit steigendem v_0 stark ab.

Abb. 7 zeigt die Admittanz des gleichen Fußes wie Abb. 6 mit einem Impedanzmesskopf stationär bestimmt. Der statische Anpressdruck wurde von 60 kPa bis 210 kPa erhöht, was zu einer starken Abnahme der Admittanz führt. Bei diesem Messverfahren ist Vorsicht geboten, da sich zwischen Fuß und Messkopf zwangsläufig eine kleine Masse befindet. Es hat sich gezeigt, dass bereits 10 g den mit Socken gemessene Wert ab einigen 100 Hz dominieren. In Abb. 7 beträgt die Masse unter 2 g und ist nicht relevant. Für tiefe Frequenzen verhält sich der Fuß hier wie eine hooke'sche Feder. Allerdings weichen die Werte deutlich von denjenigen in Abb. 6 ab. Ursache hierfür ist, dass beim Gehen der Anpressdruck stetig variiert und sogar höhere Werte als in Abb. 7 erreicht.

Zusammengefasst zeigt sich, dass der Fuß ein stark nicht-lineares Verhalten aufweist. Somit liefert die Messung das Verhältnis zwischen anregender Kraft und Bewegungsreaktion, dass unter speziellen Bedingungen, d.h. dem Gehen auf einem bestimmten Untergrund, vorliegt. Es bleibt zu überprüfen, in wie weit die ermittelten Werte deckenunabhängig sind.