

# In-Situ-Charakterisierung menschlicher Geher als Körperschallquelle mit dem Zwei-Platten-Verfahren

Heinrich Bietz, Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, heinrich.bietz@ptb.de

## Einführung

Der menschliche Geher ist eine zentrale Körperschallquelle im Bereich der Bauakustik. Es hat in der Vergangenheit zahlreiche Versuche gegeben, ihn als Körperschallquelle zu charakterisieren, wobei die bisherigen Ergebnisse sowohl quantitativ als auch qualitativ eine erhebliche Streuung aufweisen [1]. Weiterhin beschränkten sich die bisherigen Ansätze darauf, die Mobilität zu bestimmen, nicht aber die weiteren Quellgrößen wie Querkraft oder freie Schnelle. Mit Hilfe des von Gibbs et al. formulierten Zwei-Platten-Verfahrens [2] wurde nun ein erster Versuch unternommen, den menschlichen Geher *in situ* hinsichtlich seiner Quelleigenschaften vollständig zu untersuchen. Über die durchgeführten Messungen sowie erste Ergebnisse wird im Folgenden berichtet.

## Messprinzip

Um die Quelleigenschaften zu bestimmen, wird die Körperschallquelle auf zwei Empfangsplatten betrieben, wobei die Mobilität  $Y$  der Platten deutlich höher bzw. deutlich niedriger sein muss als die der zu charakterisierenden Quelle. Dies kann analog zur Elektrotechnik gesehen werden, wo man eine Spannungsquelle im Kurzschluss und im Leerlauf betreibt, um die Quellparameter zu bestimmen.

## Verwendete Empfangsplatten

Über die Mobilität hinaus müssen die Empfangsplatten noch weitere Kriterien erfüllen, um für die vorgesehenen Untersuchungen geeignet zu sein. Erforderlich ist ein diffuses Körperschallfeld bei Anregung durch den Geher. Hierzu muss insbesondere bei tiefen Frequenzen eine ausreichende Modendichte und -Überlappung gegeben sein, was bestimmte Abmessungen und eine gewisse Dämpfung voraussetzt. Die Dämpfung darf andererseits nicht zu hoch sein, damit die Hallradien nicht unzulässig groß werden. Schlussendlich müssen die Empfangsplatten natürlich so beschaffen sein, dass ein „Begehen“ durch einen menschlichen Geher problemlos möglich ist.

Die letztlich ausgewählten Empfangsplatten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Bei der schweren Platte handelt es sich um den Fußboden eines bauakustischen Prüfstandes, der bereits als Empfangsplatte für andere Quellen verwendet wurde. Die leichte Platte wurde so bemessen, dass ein Geher auf einer vorgegebenen Strecke einmalig auftritt. Die Platte ist vollflächig auf einem weichen Teppichboden gelagert, wodurch sich ein Höhenunterschied von weniger als 1 cm zum umgebenden Boden ergibt. Dies erleichtert ein natürliches Begehen durch eine Testperson ohne zusätzliche Maßnahmen.

Die Verlustfaktoren wurden auf beiden Platten über die Körperschallnachhallzeit gemessen. Außerdem wurde mit

einem Shaker eine bekannte Körperschalleistung in die Platten eingeleitet und die zugehörige mittlere Schnelle auf den Platten gemessen. Der so ermittelte Zusammenhang zwischen mittlerer Plattenschnelle und eingeleiteter Leistung weicht zum Teil erheblich vom idealen Fall ab und wurde als Kalibrierfaktor bei allen weiteren Messungen angewendet. Für die Anwendung des Verfahrens müssen weiterhin die Eingangsmobilitäten der Empfangsplatten bekannt sein, die durch Messungen mit einem Impedanzmesskopf (Aluminium) bzw. mit separaten Kraft- und Beschleunigungsaufnehmern (Beton) ermittelt wurden. Die Messung erfolgte an mehreren Punkten in der zum Auftreten vorgesehenen Zone, die Ergebnisse wurden anschließend in Terzen gemittelt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Empfangsplatten

Verwendung	$Y$ hoch	$Y$ niedrig
Material	Aluminium (Dural)	Stahlbeton
$S$ (m <sup>2</sup> )	0,7	16,7
$d$ (mm)	2	160
$m$ (kg)	3,9	6400
$E$ (GPa)	73	34
$Y_{\text{inf}}$ (m/(Ns))	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-6}$

## Durchführung der Messungen

Der Messaufbau wurde zunächst durch Charakterisierung einer bekannten Quelle verifiziert. Zur Verifizierung diente ein Hammerwerk mit einem einzelnen Hammer. Die dabei ermittelte Quellmobilität ist systematisch ca. 1,5 dB niedriger als der zu erwartende Wert, diese Abweichung wurde auch schon bei früheren Versuchen mit einer anderen leichten Empfangsplatte festgestellt [3]. Anschließend wurden mit verschiedenen Testpersonen Gehversuche durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Untersuchte Geher

Geher	$m$ (kg)	Schuhwerk
1	68	Halbschuhe, mittelhart
2	95	Halbschuhe, mittelhart
3	95	Sicherheitsschuhe, weich
4	95	Socken, gehend
5	95	Socken, „Heeldrop“*
6	40	Winterstiefel, weich
7	65	Stiefeletten, mittelhart
8	65	Pumps, hart

\*Aufsetzen der Fersen aus dem Stand heraus

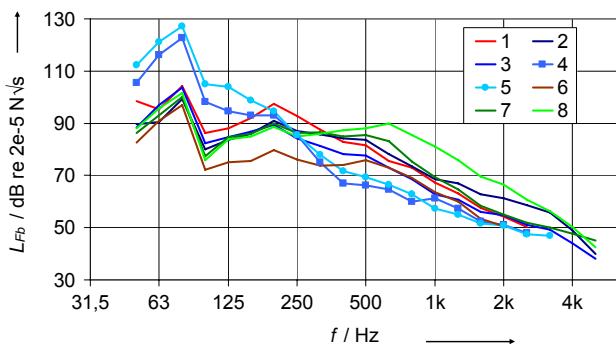
Da in [3] gezeigt werden konnte, dass das Verfahren auch für impulsförmige Signale funktioniert, wurde bei jedem Gehvorgang jeweils immer ein einzelner Schritt erfasst. Für jeden Geher wurden jeweils 5 Schritte mit dem linken und 5

Schritte mit dem rechten Fuß ausgewertet. Auf jeder Empfangsplatte wurde das Gehersignal mit sechs Beschleunigungsaufnehmern parallel aufgezeichnet. Daraus wurden durch Umrechnung in Schnellepegel, Normierung auf eine Sekunde und Anwendung des Kalibrierfaktors für die jeweilige Empfangsplatte Terz-Energiepegel berechnet, die von einem Schritt in die Platte eingeleitet werden.

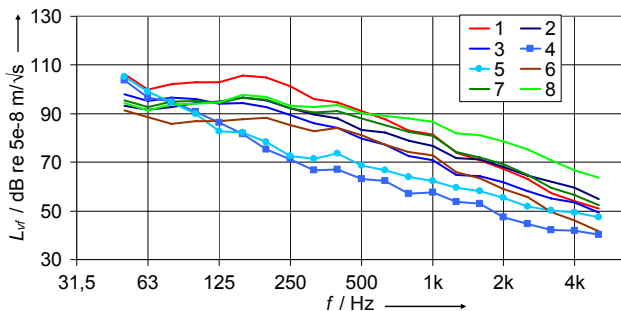
### Ergebnisse

Die Quellkräfte als auch die freien Schnellen der verschiedenen Geher decken einen Bereich von bis zu 40 dB ab (Bild 1, Bild 2). Die daraus berechnete Quellmobilität schwankt dagegen wesentlich weniger (Bild 3). Werden die untersuchten Geher in die zwei Gruppen „barfuß“ und „mit Schuh“ eingeteilt, so werden die Schwankungen innerhalb der Gruppen wesentlich kleiner. Barfuß ergeben sich sowohl für die Quellkraft als auch für die freie Schnelle Spektren, die mit zunehmender Frequenz stark abfallen. Diese Tendenz ist für Geher mit Schuh auch vorhanden, jedoch geringer ausgeprägt. Bei der Gruppe „mit Schuh“ fällt auf, dass der harte Pumps bei hohen Frequenzen besonders große Quellkräfte und freie Schnellen verursacht. Die zugehörige Mobilität ist dagegen unauffällig (Bild 3).

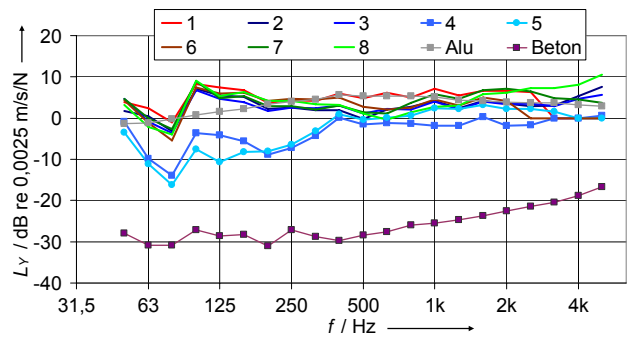
Der Vergleich der ermittelten Quellmobilitäten mit den Mobilitäten der Empfangsplatten zeigt, dass die Mobilität der Aluminiumplatte nicht ausreichend groß gegenüber den Quellmobilitäten ist (Bild 3). Damit liegen die freien Schnellen und auch die Quellmobilitäten tatsächlich über den hier angegebenen Ergebnissen. Das modifizierte Hammerwerk liegt sowohl in Bezug auf die Quellstärke als auch auf die Mobilität in der gleichen Größenordnung [3].



**Bild 1:** Quellkräfte verschiedener Geher (Tabelle 1) ; jeweils 10 Mittelungen



**Bild 2:** Mittlere freie Schnellen verschiedener Geher (Tabelle 1) für einen einzelnen Schritt



**Bild 3:** Mittlere Quellmobilitäten verschiedener Geher (Tabelle 1) und Mobilitäten der verwendeten Empfangsplatten

Werden aus den 10 Schritten pro Geher die Standardabweichungen berechnet, so ergeben sich für die Quellkraft und die freie Schnelle Werte zwischen 1 und 4 dB und für die Quellmobilität zwischen 1 und 3 dB. Damit sind die Einzelschritte der verschiedenen Geher hinreichend genau reproduzierbar.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Mobilität gehender Personen mit Schuh kann mit Werten zwischen 0 und ca. 10 dB abgeschätzt werden. Dies liegt im oberen Bereich bekannter anderer Untersuchungen [1]. Bei barfuß laufenden Personen kann dagegen von ca. 10 dB niedrigeren Mobilitäten ausgegangen werden. Für die Anregung üblicher Gebäudedecken (Massivdecken und Holzbalkendecken mit Estrich) können gehende Personen somit als Kraftquellen betrachtet werden. Für eine solche Modellierung ist lediglich die Quellkraft erforderlich, für die im Rahmen dieser Arbeit eine Abschätzung erfolgte. Die Arbeiten werden durch Verwendung anderer schwerer Empfangsplatten fortgesetzt, da die erforderliche Fehlanpassung auch bei wesentlich größeren Mobilitäten als der verwendeten Betonplatte noch gegeben ist. Darüber hinaus sollen noch weitere Körperschallquellen (z.B. Gummiball) untersucht werden.

### Danksagung

Dank geht an Prof. Dr. Werner Scholl, der die Arbeiten durch zahlreiche und fruchtbare Diskussionen begleitet hat.

### Literatur

- [1] M. Lievens: *Mobility Measurements of a Standing Human Body in the Context of Impact Sound Auralisation*, Fortschritte der Akustik-DAGA 2007, Stuttgart, 139-140
- [2] B.M. Gibbs, N. Qi and A.T. Moorhouse: *A practical characterisation for vibro-acoustic sources in buildings*. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 93, (2007), 84-93
- [3] Bietz, H., Wittstock, V.: *Experiences with characterising simple sources of structure-borne sound by the two plate method*. Proceedings NAG/DAGA 2009, Rotterdam, 452-455