

Messtechnische und theoretische Untersuchungen zum Einfluss von Massebelastungen auf den Übertragungskoeffizienten von Beschleunigungsaufnehmern der Back-to-Back-Bauform

Angelika Täubner, Hans-Joachim Schlaak, Thomas Bruns

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland,

Email:angelika.taubner@ptb.de

Einleitung

Die Rückführungskette für Beschleunigungsaufnehmer beruht auf der primären Schwingungskalibrierung durch Laserinterferometrie auf der Ebene der nationalen Metrologie-Institute (NMI) und sekundärer Schwingungskalibrierung nach dem Vergleichsverfahren auf der Ebene der akkreditierten Kalibrierlaboratorien (DKD).

Für die Sekundärkalibrierung wird ein Prüfling auf der Topfläche eines primärkalibrierten Beschleunigungsaufnehmers der Back-to-Back-Bauform (als BB-Aufnehmer bezeichnet) befestigt. Bei der interferometrischen Kalibrierung eines BB-Aufnehmers wird die Prüflingsmasse durch eine Dummy-Masse ersetzt und somit das reale Masseverhältnis nachgebildet.

Führende Aufnehmerhersteller wie Brüel & Kjaer und Endevco spezifizieren in Kalibrierzertifikaten die Masseabhängigkeit. Die von Brüel & Kjaer angegebenen Kurven sind jedoch nicht im Einklang mit in der PTB gewonnenen Untersuchungsergebnissen [1,2].

Experimentelle Untersuchungen

Das Kalibrierobjekt, ein Beschleunigungsaufnehmer vom Single-ended-Typ (SE-Aufnehmer) bekommt durch die Ankopplung an die Topfläche eines BB-Aufnehmers die Beschleunigung an der Referenzfläche übertragen, also das, was auch das Interferometer während einer Primärkalibrierung auf der Topfläche „sieht“. Deshalb muss der Übertragungskoeffizient von BB-Aufnehmern mit Massebelastung direkt auf der Topfläche des Aufnehmers gemessen werden [1, 2]. In der PTB wurden dazu Belastungsmassen aus Wolfram (Dichte ca. 19 g/cm^3) konstruiert und realisiert.

Das Übertragungsverhalten von drei unterschiedlichen BB-Aufnehmertypen wurde in Abhängigkeit von der Massebelastung im Frequenzbereich 80 Hz bis 20 kHz untersucht. Abbildung 1 zeigt die Belastungsabhängigkeit des Übertragungskoeffizienten eines BB-Aufnehmers vom Typ 2270, Hersteller Endevco. Je größer die Masse umso stärker wirkt sie dem Ansteigen des Übertragungskoeffizienten entgegen [3]. Der Aufnehmer gibt nicht mehr die Ausgangsspannung ab, die der interferentiell auf der Topfläche gemessenen Beschleunigung entspricht. In der Abbildung 2 wird der Einfluss der Massebelastung auf das Übertragungsverhalten von BB-Aufnehmern des Typs 8305, Hersteller B&K, dargestellt. Bei diesem Aufnehmertyp wird ab 5 kHz ein geringes Ansteigen des Übertragungskoeffizienten mit Massebelastung festgestellt. Dieses Verhalten steht in Widerspruch zu den vom Hersteller angegebenen Korrekturkurven.

Auch für den BB-Aufnehmertyp 8076K, Hersteller Kistler (nicht dargestellt), konnte experimentell ein Ansteigen des Übertragungskoeffizienten mit Massebelastung oberhalb von 5 kHz nachgewiesen werden.

Die experimentellen Untersuchungen an mehreren Exemplaren der drei BB-Aufnehmertypen bestätigen das unterschiedliche Übertragungsverhalten mit Massebelastung. Zusätzliche experimentelle Untersuchungen sowie die Betrachtung der konstruktiven Unterschiede der Aufnehmertypen liefern keine eindeutige Erklärung für das unterschiedliche Übertragungsverhalten mit Massebelastung.

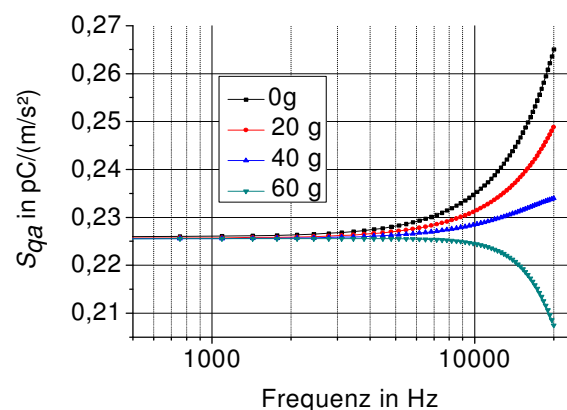


Abbildung 1: Ladungs-Übertragungskoeffizient eines BB-Aufnehmers vom Typ 2270 im unbelasteten Zustand und bei verschiedenen Massebelastungen.

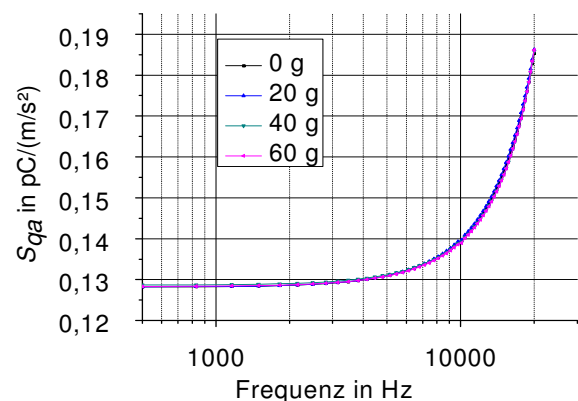


Abbildung 2: Ladungs-Übertragungskoeffizient eines BB-Aufnehmers vom Typ 8305 im unbelasteten Zustand und bei verschiedenen Massebelastungen.

Theoretische Betrachtungen

Bei den bekannten BB-Aufnehmern wird das piezoelektrische Wandlerelement nicht mit dem Aufnehmerboden verbunden, sondern mit dem Kopfteil des Aufnehmergehäuses (siehe Abb. 3). Die Oberseite des Kopfteils ist die Topfläche, an die der Prüfling oder die Dummy-Masse

angeschraubt wird. Hauptursache für die Abhängigkeit des Übertragungskoeffizienten von der Massebelastung ist die Elastizität des Bereiches der Aufnehmerstruktur zwischen der Topfläche und der unteren Kopfteilfläche, an der das Piezowandlerelement anliegt. Diese Elastizität führt bei höheren Frequenzen der Anregungsbeschleunigung zu unterschiedlichen Auslenkungsamplituden und damit zu unterschiedlichen Beschleunigungsamplituden der Topfläche und der unteren Kopfteilfläche. Mit Hilfe von FEM-Untersuchungen (Modal- und harmonische Analysen) können die Unterschiede der Auslenkungsamplituden in der Aufnehmerstruktur sichtbar gemacht und quantifiziert werden. Der Effekt der unterschiedlichen Beschleunigungsamplituden von Topfläche und unterer Kopfteilfläche lässt sich durch ein vereinfachtes mechanisches Schema eines BB-Aufnehmers mit der Belastungsmasse M beschreiben. Mit dem in Abb. 3 gezeigten Schema wird der reale Aufnehmer mit seinen räumlich kontinuierlich verteilten Bauteilen durch punktförmige Massen und masselose Federn dargestellt. Es werden nur eine Bewegungsrichtung (ein Freiheitsgrad) zugelassen und die Dämpfungsverluste vernachlässigt.

Das mechanische Schema enthält die Masse des Aufnehmerbodens m_B , die Masse des unteren Kopfteils m_{K1} die Nachgiebigkeit des rohrförmigen Gehäusebereiches n_R , die seismische Masse m_s , die Nachgiebigkeit des Piezowandlerelementes n_P und die Masse des oberen Kopfteils m_{K2} . Zwischen den Massen m_{K1} und m_{K2} liegt die Nachgiebigkeit des Aufnehmerkopfes n_K , die als Hauptursache für die Abhängigkeit des Aufnehmerübertragungskoeffizienten von der Massebelastung M angesehen wird. Die Nachgiebigkeit n_V soll die Elastizität der Schraubverbindung von Massebelastung M und BB-Aufnehmer berücksichtigen.

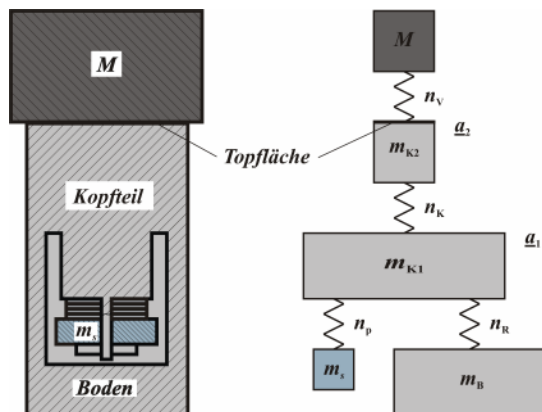


Abbildung 3: Grundsätzlicher Aufbau und mechanisches Schema eines BB-Beschleunigungsaufnehmers mit Massebelastung M .

Aus dem mechanischen Schema nach Abb. 3 kann mit der Methodik der schaltungstechnischen Beschreibung mechanischer Systeme [4] ein Ersatzschaltbild abgeleitet werden. Mit den effektiven Methoden der Elektrotechnik lässt sich dann aus diesem Ersatzschaltbild der Zusammenhang zwischen seinen Elementen und Parametern bestimmen. Auf diesem Weg erhält man für das Verhältnis der Beschleunigungsamplituden von Topfläche und unterer Kopfteilfläche

$$\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_2} = 1 - \omega^2 m_{K2} n_K - \frac{\omega^2 M n_K}{1 - \omega^2 n_V M}. \quad (1)$$

Übersichtlicher wird Gl. 1 durch Einführung zweier Bezugsfrequenzen ω_K und ω_V mit

$$\omega_K^2 = \frac{1}{n_K m_{K2}} \quad \text{und} \quad \omega_V^2 = \frac{1}{n_V M}.$$

Dann erhält man

$$\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_2} = 1 - (\omega / \omega_K)^2 \left[1 + \frac{M}{m_{K2}} \cdot \frac{1}{1 - (\omega / \omega_V)^2} \right]. \quad (2)$$

Der Gl. (2) kann man entnehmen, dass bei tiefen Frequenzen ($\omega \ll \omega_K$) die Beschleunigungsamplituden von Topfläche und unterer Kopfteilfläche gleich sind. Bei mittleren Frequenzen ($\omega < \omega_K$) wird das Amplitudenverhältnis kleiner 1, d.h. die Beschleunigungsamplitude der Topfläche ist größer als die der unteren Kopfteilfläche. Eine große Massebelastung M und damit ein großes Verhältnis M/m_{K2} verstärkt die Abnahme des Amplitudenverhältnisses.

Vernachlässigt man die Elastizität der Schraubverbindung von Aufnehmer und Belastungsmasse wird $n_V = 0$ und damit ω_V in Gl. (2) unendlich groß. Gl. (2) vereinfacht sich zu

$$\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_2} = 1 - (\omega / \omega_K)^2 \left(1 + \frac{M}{m_{K2}} \right). \quad (3)$$

Die Beziehung nach Gl. (3) erklärt die in Abb. 1 erkennbare starke Masseabhängigkeit des Übertragungskoeffizienten des BB-Aufnehmers Endevco 2270.

Setzt man die Nachgiebigkeit des Kopfteils n_K zu Null, wird ω_K in Gl. (2) unendlich groß, wodurch das Verhältnis der Beschleunigungsamplituden erwartungsgemäß gleich 1 wird. Die Abhängigkeit des Aufnehmerübertragungskoeffizienten von der Massebelastung verschwindet, was für einen BB-Aufnehmer auch angestrebt wird. Eine nur geringe Masseabhängigkeit liegt bei den BB-Aufnehmern des Typs Brüel & Kjaer 8305 und Kistler 8076K vor. Bei beiden Typen ist die Nachgiebigkeit des Kopfteils hauptsächlich wegen der geringeren Kopfteilhöhe kleiner als beim Aufnehmer Endevco 2270. Der Effekt, dass durch die geringere Kopfteilhöhe Elastizitäten quer zur Aufnehmerachse zunehmen, wurde hier vernachlässigt. Er ist Thema weiterer Untersuchungen.

Literatur

- [1] G. Lauer, Analyse der Messunsicherheit bei der absoluten Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern, 10. Tagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik, DAGA 84 Darmstadt, S. 272-278
- [2] A. Täubner, Arbeitsberichte über messtechnische Untersuchungen zum Einfluss von Massebelastungen auf den Übertragungskoeffizienten von Beschleunigungsaufnehmer-Referenznormalen
- [3] B. Payne, The Back-to-Back Accelerometer as a High Frequency Vibration Standard, ISA 31 Instrumentation Symposium, San Diego, CA, May 1985
- [4] Lenk, Arno: Elektromechanische Systeme, Band 1. Verlag Technik Berlin, 1971