

Dynamik und Schwingungen



Henrik Volkers

Zur Stoßkalibrierung von Beschleunigungssensoren bei hoher Intensität

SHAKER
VERLAG

Schriftenreihe
Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

**Zur Stoßkalibrierung
von Beschleunigungssensoren bei hoher Intensität**

**Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu
Braunschweig**

zur Erlangung der Würde

eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Henrik Volkers
geboren in: Recklinghausen

eingereicht am: 23.05.2019
mündliche Prüfung am: 04.12.2019

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer
Prof. Dr.-Ing. Sabine C. Langer

2020

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Henrik Volkers

**Zur Stoßkalibrierung von Beschleunigungssensoren
bei hoher Intensität**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7657-8

ISSN 1865-9101

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Untersuchungen und die Entwicklung von Verfahren und Anregungsformen zur Parameteridentifikation eines Modells für Beschleunigungssensoren (BS) mit dem Ziel einer besseren Vergleichbarkeit von Stoßkalibrierungen von Beschleunigungssensoren bei Stoßamplituden größer 5 km/s^2 .

Leider ist die Vergleichbarkeit bei den derzeitig (weltweit) verfügbaren Einrichtungen und angewendeten Kalibrierverfahren nur bedingt gegeben. Das als Aufnehmerkenngroße (Maßverkörperung) bei hohen Beschleunigungsamplituden angegebene Spitzenwertübertragungsverhältnis S_{sh} ist streng genommen nur gültig für Stoßbeschleunigungen identischer spektraler Zusammensetzung, da die eingesetzten Beschleunigungssensoren in den angeregten Frequenzbereichen keine konstante Übertragungsfunktion besitzen.

Als Ansatz zur Lösung der Problematik der schlechten Vergleichbarkeit wurde ein Modell des Sensors vorgestellt, bei dem die Modellparameter aus Messungen bestimmt werden. Unter Anwendung dieses parametrisierten Modells konnte dann aus der gemessenen Sensorantwort die Sensoranregung rekonstruiert werden.

Zunächst erfolgten detaillierte Untersuchungen der Messeinrichtung sowie eine Erweiterung der Messbandbreite zu höheren Frequenzen. Die Untersuchung der Einflüsse der Antastpositionen auf der Referenzfläche des Sensors und deren Eigenbewegungen (Warp) führte zu einer neuen Methode der Gewichtung der Unsicherheiten im Frequenzbereich.

Für die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Ladungsverstärkers wurden ein Modell zur Beschreibung des Ladungsverstärkers und erweiterte Messverfahren entwickelt, womit sich systematische Fehler der Vergangenheit vermeiden lassen. Beides findet derzeit Eingang in die neuen Normen zur Kalibrierung von Messverstärkern.

Die Auswertung der gemessenen Übertragungsfunktionen der untersuchten Beschleunigungssensoren zeigte, dass die klassische Modellbeschreibung des Beschleunigungssensors mit einem Freiheitsgrad, engl. Single Degree of Freedom (1-DOF), nicht ausreicht. Daher wird ein erweitertes Modell mit zusätzlicher Koppelmasse (2-DOF-Modell) vorgestellt, das den Sensor ausreichend genau beschreibt. Die Identifizierung der Modellparameter erfolgt über einen Levenberg-Marquardt-Fit im Frequenzbereich. Unter Anwendung der Monte-Carlo-Methode werden die Unsicherheiten der Modellparameter und der damit rekonstruierten Beschleunigungsanregungen abgeschätzt.

Abschließend wird gezeigt, dass die entwickelten Methoden und das 2-DOF-Modell fähig sind, Vergleiche von Stoßkalibrierungen mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung bei deutlich verringerten Unsicherheiten durchzuführen.

Abstract

This thesis describes the investigation and development of methods and excitation procedures for the parameter identification of a model for accelerometers with the purpose of a better comparability of shock calibration of accelerometers at shock amplitudes greater than 5 km/s^2 .

Unfortunately, the comparability of the currently (worldwide) available equipment and calibration procedures is only limited. The peak value transfer ratio S_{sh} defined as the transducer characteristic at high acceleration amplitudes is only valid for shock accelerations of identical spectral composition, since the accelerometers used as transfer standards do not have a constant transfer function in the excited frequency ranges.

As an approach to a solution to that problem, a model of the sensor is developed and the parameters of the model are determined from measurements. Using this parameterized model, the sensor excitation can then be reconstructed from the measured sensor response.

At first, a detailed investigation of the measuring equipment and an extension of the measuring bandwidth to higher frequencies were carried out.

For the determination of the transfer function of the charge amplifier, a model for the description of the charge amplifier and extended measuring methods were developed that take into account the influences of the source impedance of the sensor and which avoid the systematic errors of the past. Model and methods are currently being incorporated into a new standard for the calibration of measurement amplifiers.

The evaluation of the measured transfer functions of the accelerometers investigated showed that the classical model description of the

accelerometer as a single degree of freedom (1-DOF) model is not sufficient. Therefore, an extended model with additional coupling mass (2-DOF model) is presented that describes the sensor with good accuracy.

The model parameters are identified by a Levenberg-Marquardt fit in the frequency domain. Using the Monte Carlo method, the uncertainties of the model parameters and the reconstructed acceleration excitations are estimated.

Finally, it is shown that the methods and the 2-DOF model are capable of performing shock calibration comparisons of different spectral compositions with significantly reduced uncertainties.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Stoßkalibrierung von Beschleunigungssensoren	6
2.1. Beschreibung der Transfernormale	6
2.2. Kalibrierung am Hopkinsonstab	8
2.2.1. Kugelschussanregung	9
2.2.2. Sensormesskette	11
2.2.3. Referenzmesskette	12
2.2.4. Messdatenerfassung und -verarbeitung	13
2.3. Die Problematik bei der Spitzenwert- Stoßkalibrierung nach ISO 16063-13	13
2.4. Modellansatz nach ISO 16063-43	16
3. Untersuchung der Messeinrichtungen	21
3.1. Datenerfassung	22
3.1.1. Untersuchung zur Synchronität	25
3.2. Signaldatenverarbeitung	25
3.3. Vibrometer	34
3.3.1. Rauschen des Vibrometers	35
3.4. Ladungsverstärker	37
3.4.1. Aufbau einer neuen Kalibriereinrichtung	39
3.4.2. Einfluss der Quellimpedanz	40
3.4.3. Modell des Ladungsverstärkers	41
3.4.4. Parameteridentifikation und Validierung des Mo- dellansatzes	46
3.4.5. Einfluss auf die Sinuskalibrierung von Beschleu- nigungsaufnehmern	48

3.5. Anregung mit dem Hopkinsonstab	53
3.5.1. Einfluss der Stabfixierung	53
3.5.2. Einfluss der Antastpunkte	58
3.5.3. Einfluss der Antastpunkte auf die Spitzenwert- messung	64
3.6. Stoßanregung mit einer Kugelfalleinrichtung	67
3.7. Reziproke Anregung oder Impedanzmessung	71
4. Modellansatz	75
4.1. Modellansatz mit einem Freiheitsgrad (1-DOF)	75
4.2. Modellansatz mit zwei Freiheitsgraden (2-DOF)	77
4.3. Parameteridentifikation	80
4.4. Rekonstruktion des Anregungssignals	85
4.5. Ergebnisse	86
5. Abschätzung der Messunsicherheiten	92
6. Zusammenfassung	97
7. Veröffentlichungen im Rahmen der Arbeit	99
8. Literaturverzeichnis	102
A. Der Back-to-Back-Beschleunigungssensor als 2-DOF-Modell	106