Jan-Hauke Bartels, M. Sc.
jan-hauke.bartels@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Institut für Massivbau

Anwendung von Beschleunigungssensoren im niederfrequenten Schwingungsbereich

1 Einleitung und Motivation

Die exakte Erfassung von physikalischen Größen wie Schwingungen, Drücke oder Kräfte ist heutzutage von großer Bedeutung in einer technisierten Welt, in der Bauwerke und Maschinen zunehmend messtechnisch überwacht werden. Eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige Messung ist eine möglichst hohe Präzision der eingesetzten Messgeräte. Um die Funktionsfähigkeit der Messgeräte sicherzustellen, ist eine sorgfältige Kalibrierung unerlässlich. Die Kalibrierung gemäß DIN 1319 bezieht sich auf die Ermittlung der Abweichung zwischen den Messwerten eines Messinstruments und den Werten eines Referenzinstruments oder einer bekannten Größe [1]. Es ist zu beachten, dass Messsysteme im Laufe der Zeit einer Alterung unterliegen, daher ist durch eine regelmäßige Kalibrierung dieser Signalveränderung entgegenzuwirken.

Für die messtechnische Überwachung von Ingenieurbauwerken wie Brücken oder Windenergieanlagen werden häufig Beschleunigungssensoren eingesetzt, mit denen die Eigenfrequenzen der Struktur ermittelt und Schädigungen am Bauwerk identifiziert werden können. Naturgemäß weisen Brücken niedrige Eigenfrequenzen auf, weil eine hohe Masse im Vergleich zur Steifigkeit vorliegt. Die Eigenfrequenzen von Straßenbrücken liegen typischerweise zwischen 2 Hz und 5 Hz, bei Windenergieanlagen deutlich unter 1 Hz, wobei Eigenfrequenzen von ca. 0,30 Hz in diesem Fall nicht selten sind. Solch niedrige Eigenfrequenzen müssen zuverlässig ermittelt werden, was in der in der Praxis ein Problem darstellt, weil diese nicht den Standard-Anwendungsfall für Beschleunigungssensoren abbilden. Für Beschleunigungssensoren erfolgt die Kalibrierung gemäß DIN ISO 16063-21 [2] in Verbindung mit der DIN EN ISO/IEC 17025 [3] mittels Schwingerregereinheit, mit der vergleichsweise große Verfahrwege und damit ausreichend große Messsignalamplituden realisiert werden müssen, um tieffrequente Schwingungen zuverlässig messen zu können. Das Problem ist, dass solche Kalibiersysteme sehr teuer sind. Das Ziel dieser Untersuchung ist daher, einen vergleichsweise günstigen Versuchsstand zu testen, der für die Kalibrierung von IEPE-Sensoren zuverlässige Kalibrierwerte liefert.

In diesem Beitrag wird am Institut für Massivbau der TU Dresden ein vereinfachter Versuchsstand getestet, der im Gegensatz zu den Standards ein lineares Geschwindigkeitsprofil simuliert, sodass die Beschleunigung als Rechteckfunktion abgebildet wird. Es werden IEPE-Sensoren untersucht, die häufig für das Bauwerksmonitoring eingesetzt werden und mit einem MEMS-Sensor von PCB SYNOTECH GMBH verglichen.

2 Versuchsdurchführung und Signalanalyse

Für die Untersuchung wird eine Lineareinheit der Fa. IEF-WERNER GMBH verwendet. Solche motorisierten Achsen werden häufig für die Realisierung von vollautomatisierten Fertigungsstraßen in der industriellen Produktion und Qualitätskontrolle genutzt; diese soll in diesem Fall aber als

günstige Alternative zu teuren Kalibriersystemen dienen. Der Versuchsaufbau, wie er für die Kalibrierung der IEPE-Beschleunigungssensoren verwendet wird, ist in Abbildung 1 dargestellt.

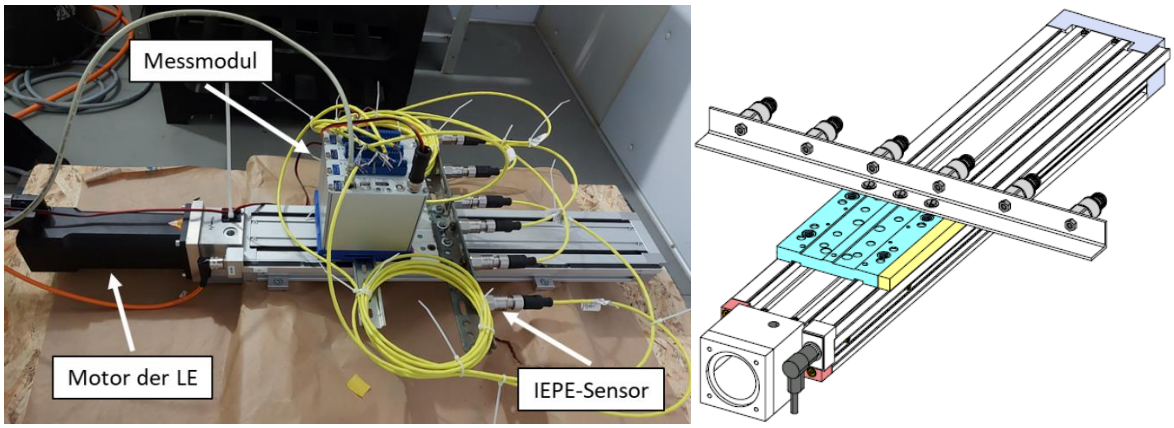

Abbildung 1. Versuchsaufbau für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren im niederfrequenten Beschleunigungsbereich (links), Isometrie des Versuchsstands (rechts)

Der Vorschub der Lineareinheit wird über einen Spindelantrieb realisiert und in eine lineare Bewegung umgesetzt [4]. Auf der Lineareinheit befindet sich ein beweglicher Schlitten, auf dem die zu kalibrierenden Beschleunigungssensoren, die Kabel und das Messmodul – bestehend aus Messverstärker und Analog-Digital-Wandler – befestigt werden. Mit diesem Versuchsaufbau sind möglichst reale Randbedingungen geschaffen, da in der Realität solche niederfrequenten Schwingungen auch das gesamte Messsystem (Sensor, Kabel, Messmodul) beanspruchen. Die in Schlittenbewegungsrichtung angebrachten IEPE-Sensoren werden über ein 1 m langes Koaxialkabel an das Messmodul angeschlossen und werden über das in Abbildung 2 gezeigte Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil dynamisch angeregt.

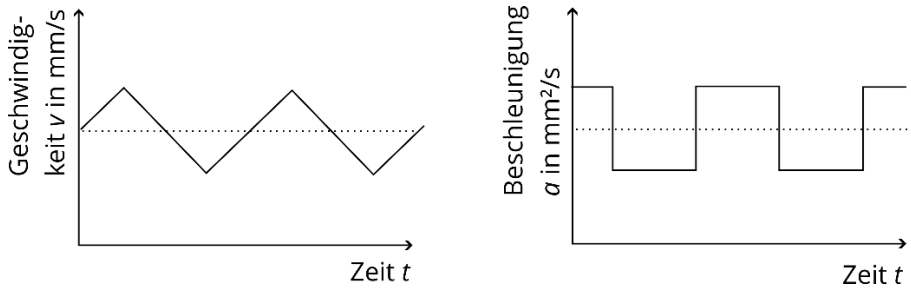

Abbildung 2. Eingangssignal der Geschwindigkeit *v* (links) und der Beschleunigung *a* (rechts), generiert durch Lineareinheit

Gemäß DIN ISO 16063-21 ist ein trigonometrischer Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf vorgesehen. Von dieser Regelung unterscheidet sich das generierte Profil aus Abbildung 2 grundsätzlich, da lediglich ein lineares Geschwindigkeitsprofil über die Ansteuerung der Lineareinheit erzeugt werden kann. Dies führt dazu, dass durch Ableitung der Geschwindigkeitsfunktion eine rechteckförmige Beschleunigungsfunktion entsteht. Mithilfe des Steuerungsmoduls kann die Anfahr- und Bremsgeschwindigkeit der Lineareinheit geregelt werden, sodass unterschiedliche Periodendauern des sich bewegenden Schlittens simuliert werden können. Mit diesem Vorgehen wird im Anschluss das Antwortverhalten des Beschleunigungssensors über einen Frequenzbereich von 0,2 Hz bis 1,0 Hz analysiert. Die Rohdaten für eine tieffrequente Beschleunigungsmessung von 1 Hz sind in Abbildung 3 dargestellt. Im Vergleich dazu ist parallel eine Laser-Distanzmessung dargestellt, die zweimal numerisch nach der Zeit abgeleitet wird.

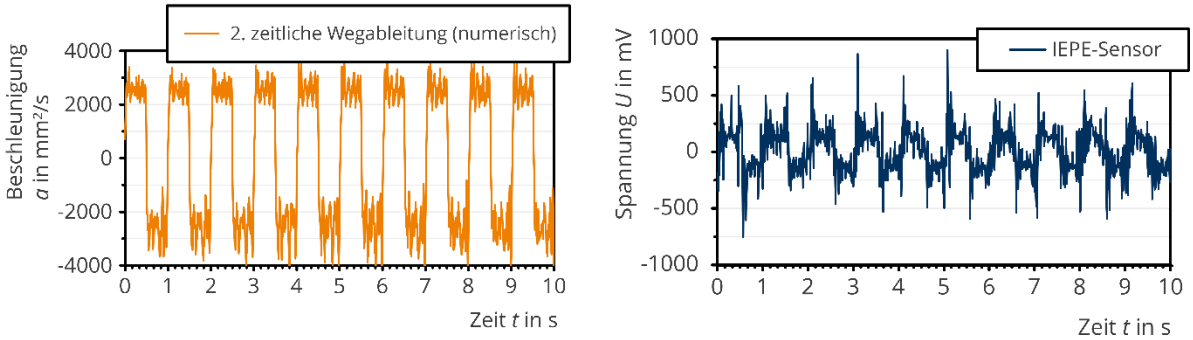

Abbildung 3. Rohdatensignal aus einer Laser-Distanzmessung (links) und Beschleunigungsmessung mittels IEPE-Sensor (rechts), beide Messungen bei 1 Hz

Das Rohdatensignal des Beschleunigungssensors verzeichnet nennenswerte Rauschanteile im Vergleich zum Laser-Distanzsensor, sodass kein deutliches Beschleunigungsprofil zu erkennen ist. Das Rauschen des Laser-Signals tritt auf, weil mittels numerischer Ableitung Fehler entstehen. Diese sind aber deutlich geringer als bei der Beschleunigungsmessung und es wird das rechteckige Beschleunigungsprofil sichtbar. Das hohe Rauschlevel des Beschleunigungssensors ist auf die Qualität des Sensors zurückzuführen, sodass die Rohdaten mit einem Bessel-Tiefpass und einer Grenzfrequenz von 5 Hz gefiltert werden und damit die hochfrequenten Rauschanteile des Rohdatensignals unberücksichtigt bleiben. Die unterschiedliche Skalierung der y-Achsen ist damit begründet, dass zunächst Rohdaten dargestellt werden. Aus der Wegmessung der Laser-Distanzsensoren entsteht durch die zweifache numerische Ableitung nach der Zeit die Beschleunigung. Das Rohdatensignal des Beschleunigungssensors ist zunächst die abgegriffene Spannung, die direkt proportional der Beschleunigung ist.

Zum Vergleich unterschiedlicher Messprinzipien bei Beschleunigungssensoren wurde neben der Untersuchung des IEPE-Sensors auch ein MEMS-Sensor des Modells 3713B112G von der Fa. PCB SYNOTECH GmbH getestet. Die tiefpass-gefilterten Signale der beiden Sensortypen sind in Abbildung 4 dargestellt.

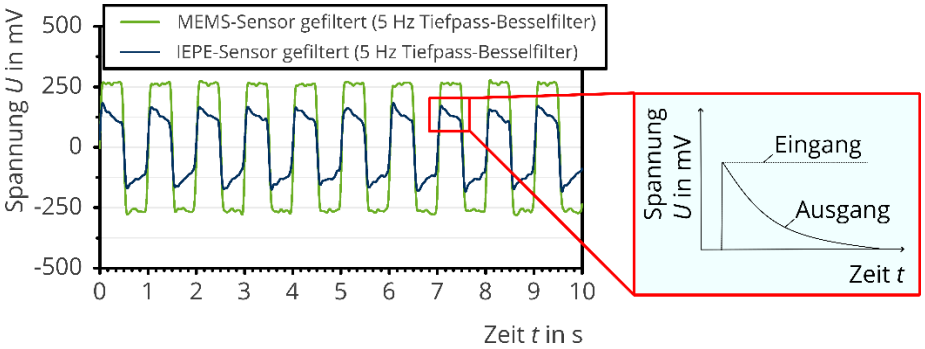

Abbildung 4. Zeitsignalverläufe von IEPE-Sensor (blau) und MEMS-Sensor (grün) bei 1 Hz

Zunächst ist der Unterschied der Amplituden sichtbar. Dieser tritt auf, weil die Empfindlichkeit der beiden Sensoren unterschiedlich groß ist. Während die Empfindlichkeit des IEPE-Sensors mit ca. 50 mV/(m·s^2) angegeben wird, weist der MEMS-Sensor eine Empfindlichkeit von ca. 100 mV/(m·s^2) auf. In Abbildung 4 ist die Ausgangsspannung des MEMS-Sensors tatsächlich doppelt so groß wie die Ausgangsspannung des IEPE-Sensors. Es fällt aber auf, dass das Signal des IEPE-Sensors im Vergleich zum MEMS-Sensor nicht konstant ist, obwohl das Eingangssignal aus Abbildung 2 in diesen Bereichen konstant sein sollte. Begründet werden kann dies mit der Funktionsweise des IEPE-Sensors. Im Vergleich zum MEMS-Sensor ist es mit einem IEPE-Sensor nicht möglich, konstante

Beschleunigungen zu messen. Das IEPE-Messprinzip basiert auf einer RC-Schaltung, sodass nach einem Sprungimpuls die Ladung exponentiell abgebaut wird [5; 6]. Das physikalische Phänomen der Entladung ist im Signalverlauf des IEPE-Sensors in Abbildung 4 deutlich sichtbar und neben dem Messsignalverlauf nochmals prinzipiell dargestellt.

3 Diskussion und Fazit

In diesem Artikel wurde eine vereinfachtes Kalibriersystem für Beschleunigungssensoren untersucht, dass im Gegensatz zu standardmäßig eingesetzten Kalibriersystemen deutlich günstiger ist. Das Ziel war die Bewertung der Messsignale für unterschiedliche Sensortypen. Es wurden Laser-Distanzmessungen mit Laser-Triangulationssensoren und Beschleunigungsmessungen mit MEMS-Sensoren durchgeführt, die jeweils als Referenzgrundlage dienen. Die Signale wurden mit dem zu testenden IEPE-Sensor verglichen und es hat sich jeweils gezeigt, dass die Referenzsensoren das rechteckförmige Beschleunigungs-Eingangssignal sehr gut abbilden können, wohingegen der IEPE-Sensor nicht in der Lage ist, konstante Beschleunigungen zu messen. Darüber hinaus ist das Rohdatensignal des IEPE-Sensors aufgrund der Herstellungsqualität sehr verrauscht bei geringen Frequenzen von bspw. 1 Hz. Diesem Problem kann beigekommen werden, indem IEPE-Sensoren mit einer höheren Empfindlichkeit als 50 $mV/(m \cdot s^2)$ eingesetzt werden oder ein längerer Schwingweg der Lineareinheit gewählt wird. Für die Kalibrierung von IEPE-Sensoren im niederfrequenten Schwingungsbereich sollte allerdings eine Lineareinheit eingesetzt werden, die ein trigonometrisches Beschleunigungsprofil erzeugen kann. Damit wird eine kontinuierliche Beschleunigungsänderung über die Zeit sichergestellt und es wird die Realität des Ausschwingvorgangs eines Bauwerks besser abgebildet.

4 Literaturverzeichnis

[1] *DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[2] *DIN ISO 16063-21:2016-08, Verfahren zur Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern_-Teil_21: Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzaufnehmer (ISO_16063-21:2003_+ Cor._1:2009_+ Amd.1:2016)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[3] *DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[4] IEF Werner GmbH (2017) *Originalbetriebsanleitung profiLINE 115* [online]. https://www.ief.de/fileadmin//Download-Explorer/DE/2_Komponenten/3_Linearantriebe/1_Spindelantriebe/4_profiLINE_115/MAN_DE_1039736_profiLINE115.pdf.

[5] PCB Synotech (2021) *Piezoelektrische Beschleunigungssensoren - Grundlagen* [online].

[6] Weber, M. (2021) *Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer – Theorie und Anwendung* [online]. https://www.mmf.de/manual/aufnehmerman.pdf [Zugriff am: 6. Apr. 2023].