

# Kalibrierung von Vibrations-Sensoren

Dr. Christian Hof

e-mail: [christian.hof@metas.ch](mailto:christian.hof@metas.ch), Tel.: 031 32 34 750

Bundesamt für Metrologie METAS, Lindenweg 50, CH-3003 Bern-Wabern  
[www.metas.ch](http://www.metas.ch)

## 1. Einleitung

Die Sicherheit und das Wohlbefinden des Menschen können auf vielfältige Weise durch Erschütterungen beeinträchtigt werden. Aber auch empfindliche technische Einrichtungen sind vor zu hohen Erschütterungspegeln zu schützen. Um Massnahmen gegen Erschütterungen angemessen planen und ihre Wirksamkeit richtig beurteilen zu können, sind zuverlässige Messungen unabdingbar. Voraussetzung dafür ist, dass die Eigenschaften der für Messungen eingesetzten Sensoren genau bekannt sind. Diese Kenntnis liefern Kalibrierungen durch das Labor Vibration des METAS.

### 1.1. *Das METAS*

Das METAS ist das nationale Metrologie-Institut der Schweiz. Als solches realisiert und vermittelt es international abgestimmte und anerkannte Masseinheiten in der erforderlichen Genauigkeit. Es beaufsichtigt die Verwendung von Messmitteln in den Bereichen Handel, Verkehr, öffentliche Sicherheit, Gesundheit und Umwelt. METAS überwacht den Vollzug der gesetzlichen Bestimmungen durch die Kantone und die ermächtigten Eichstellen. Es stützt seine Tätigkeiten auf das Bundesgesetz über das Messwesen. METAS erbringt für die Gesellschaft, Wirtschaft und Forschung vielfältige Dienstleistungen.

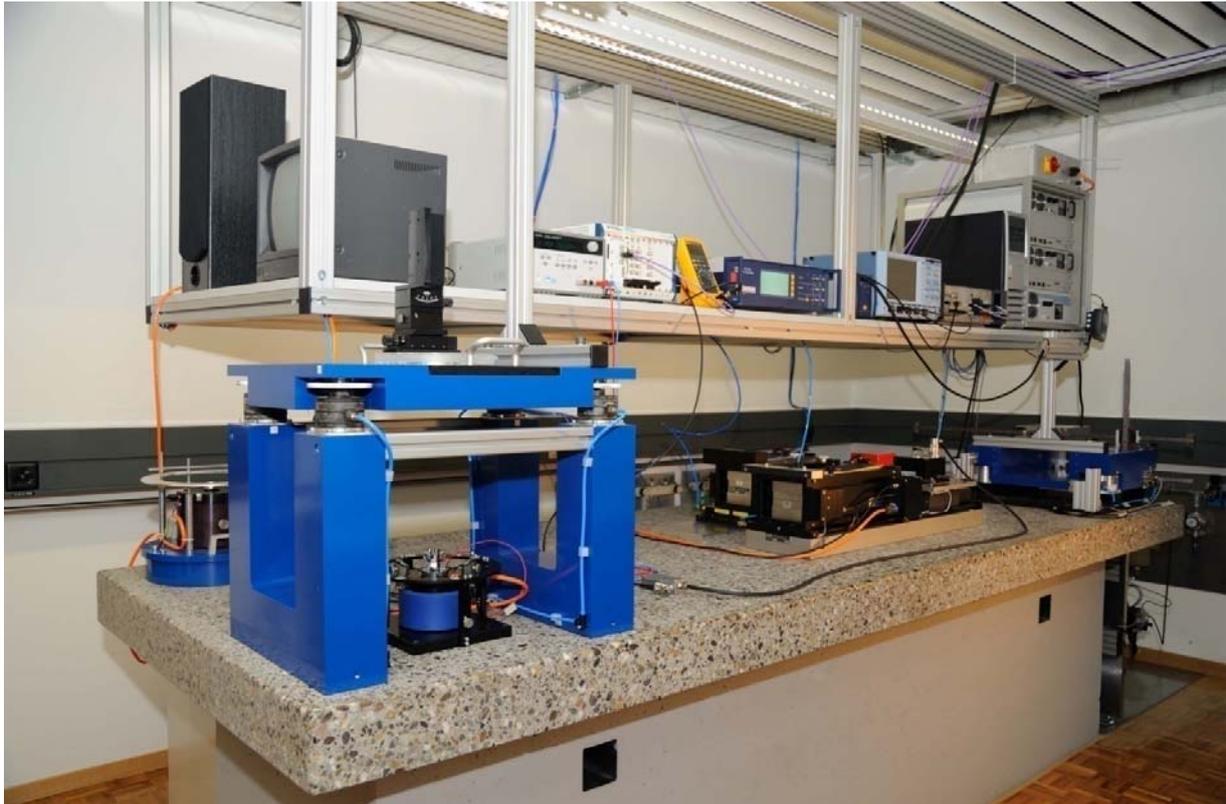
### 1.2. *Eichung vs. Kalibrierung*

Das METAS betreibt u.a. auch ein Labor *Vibration*. Dieses wurde ursprünglich im Hinblick auf den Erlass der "Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen" aufgebaut. Man ging davon aus, dass analog zu anderen Bereichen des gesetzlichen Messwesens in der Verordnung Minimal-Anforderungen definiert würden, welchen die im genannten Zusammenhang eingesetzten Messmittel zu genügen hätten. Mit einer periodischen Eichung hätte dann der Verwender nachweisen können, dass seine Einrichtungen diesen Anforderungen genügen. Die genannte Verordnung ist jedoch nach wie vor nicht in Kraft und es gibt folglich auch keine gesetzliche Bestimmungen bezüglich der erforderlichen Genauigkeit von Vibrations-Messinstrumenten. Die Verantwortung darüber, ob ein Messmittel für einen bestimmten Verwendungszweck genügend genau ist, liegt beim Anwender. Mit Hilfe periodischer (z.B. zweijährlicher) Kalibrierungen wird die Messbeständigkeit eines bestimmten Messmittels nachgewiesen und eine allfällige Abweichung des angezeigten Wertes gegenüber der Eingangsgrösse quantifiziert.

Das Labor Vibration des METAS ist heute gut eingerichtet und verfügt über eine Anzahl Messplätze, die es uns ermöglichen vielfältige Kalibrier-Dienstleistungen anbieten zu können.

## 2. Das Labor Vibration des METAS

Das Labor *Vibration* verfügt über Einrichtungen, mit denen verschiedene Arten von Vibrationssensoren kalibriert werden. Daneben stehen auch Messplätze zur Verfügung, mit denen Geräte zur Signalaufbereitung wie Ladungs-Spannungs-Konverter, Kalibratoren, oder ganze Vibrations-Messketten charakterisiert werden können. Im vorliegenden Beitrag werden konkret die Methoden gezeigt mit welchen die Empfindlichkeit von Sensoren bestimmt wird.



*Fig. 2: Das Vibrationslabor des METAS: Gut sichtbar ist der seismische Tisch und verschiedene darauf verankerte Shaker. Der Rest der Instrumentierung (Speisungen, Vibrometer-Controller, Laserquelle, Leistungsverstärker, Messgeräte...) ist gut zugänglich auf einem Regal, welches an der Decke montiert ist.*

Das Grundprinzip ist bei beiden nachfolgend beschriebenen Methoden das selbe: Der zu untersuchende Prüfling wird mit Hilfe eines elektrodynamischen Schwingerregers (Shaker) in harmonische Bewegungen bekannter Amplitude versetzt. Das dabei vom Prüfling erzeugte elektrische Ausgangssignal wird gemessen und so die Sensor-Empfindlichkeit ermittelt. Um eine möglichst gut definierte mechanische Erregung erzeugen zu können, wurde im Labor ein massiver Betontisch aufgebaut, welcher verschiedenen Shakern als stabiler Ankerpunkt dient. Diese sind fest mit der Betonplatte verschraubt, so dass bei mechanischer Anregung jeweils nur die bewegliche Shaker-Armatur in Schwingung versetzt wird, welche den Prüfling trägt. Die benötigten Zusatzgeräte wie Generator, Leistungsverstärker, A/D-

Wandler und Steuergeräte stehen auf einem von der Labordecke hängenden Regal. Das Labor selber ist klimatisiert - die Temperatur wird konstant auf 23 °C gehalten, die relative Luftfeuchtigkeit bei 40 %.

### 3. Kalibrierung durch das Vergleichsverfahren

Die Empfindlichkeit  $S$  eines Sensors wird definiert als Verhältnis zwischen dem von diesem erzeugten elektrischen Ausgangs-Signal  $u$  (z.B. Spannung (V), Ladung (pC), etc..) bei einer bestimmten mechanischen Anregung  $a$  (Beschleunigung ( $\text{ms}^{-2}$ ), Geschwindigkeit ( $\text{ms}^{-1}$ ) etc.). Da die beiden Signale nicht notwendigerweise in Phase sind wird dies mathematisch vorzugsweise in komplexer Schreibweise notiert:

$$\hat{S}(f) = \frac{\hat{u}(f)}{\hat{a}(f)}; \text{ mit } \hat{u}(f) = u(f) \cdot e^{i\varphi_u(f)} \text{ und } \hat{a}(f) = a(f) \cdot e^{i\varphi_a(f)} \quad (1)$$

Dabei wird sowohl der Amplitude ( $u$  und  $a$ ) als auch der Phase ( $\varphi_u, \varphi_a$ ) der Signale Rechnung getragen.

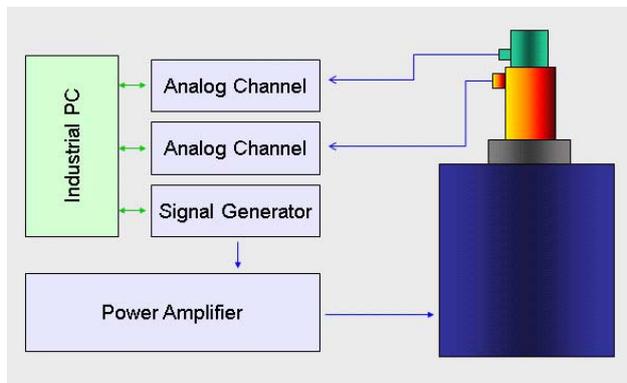


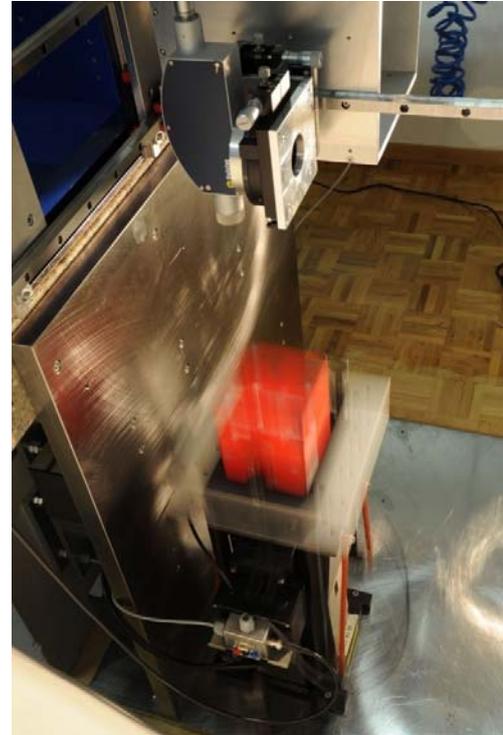
Fig. 3: Schematische Darstellung der Sekundärkalibrierung

Beim Vergleichsverfahren wird der zu kalibrierende Prüfling mit einem bekannten Referenz-Sensor mechanisch fest gekoppelt, so dass im untersuchten Frequenzbereich beide Sensoren gezwungenermassen identische Bewegungen ausführen. Wenn man dann die von den Sensoren erzeugten elektrischen Signale synchron digitalisiert und vergleicht, kann die komplexe Empfindlichkeit mit Hilfe einer Sinus-Approximation ermittelt werden.

$$\text{wegen } \hat{a} = \frac{\hat{a}_{\text{Referenz}}}{\hat{a}_{\text{Referenz}}} = \frac{\hat{a}_{\text{Prüfling}}}{\hat{a}_{\text{Prüfling}}} \text{ ergibt sich: } \hat{S}_{\text{Prüfling}} = \hat{S}_{\text{Referenz}} \cdot \frac{\hat{u}_{\text{Prüfling}}}{\hat{u}_{\text{Referenz}}} \quad (2)$$

Die mechanische Anregung wird dabei durch einen Shaker erzeugt, welcher durch einen elektrischen Signal-Generator über einen Leistungsverstärker angesteuert wird. Um eine hohe Präzision zu erreichen wird bei diskreten, vordefinierten Frequenzen über eine Regelschleife die zu generierende Signalamplitude eingepegelt. Jeder elektrodynamische Shaker hat insbesondere bei hohen Auslenkungsamplituden in der Regel kein perfekt lineares Übertragungsverhalten. Dadurch werden bei sinusförmiger Anregung auch höhere harmonische Komponenten generiert. Beim System welches am METAS in Betrieb ist, kann über eine Feedback-Schleife ein Steuersignal erzeugt werden, welches diese

höheren Frequenzanteile kompensiert, so dass der Klirrfaktor sehr klein gehalten werden kann und ein annähernd verzerrungsfreies mechanisches Signal bereitgestellt wird.



*Fig 4: Vertikale Vergleichskalibrierung eines Sensors im Niederfrequenzbereich. Hier wurde ein Syscom MS2003 zur Untersuchung des Einflusses der Montageplatte mit dieser auf den Shakertisch positioniert. Bei Standardkalibrierungen dieser Art Aufnehmer in erweitertem Frequenzbereich werden diese normalerweise allerdings ohne Montageplatte direkt mit dem Shakertisch verschraubt.*

Im Niederfrequenzbereich kommt zur Kalibrierung schwerer Aufnehmer ein APS-Kalibriershaker zum Einsatz. Als Referenzsensor dient dabei ein vorgängig kalibriertes Referenznormal, welches unterhalb des Shakertischs an diesem befestigt ist und die bereitgestellte mechanische Bewegung erfasst. Dieser Sensor wurde vorgängig mit dem Primärverfahren in der für das Vergleichsverfahren verwendeten Konfiguration kalibriert. Auf der rechten Photo (Fig. 4) ist der Laserkopf sichtbar, welcher vertikal nach unten gerichtet ist und den jeweils zu messenden Punkt anpeilt.

#### **4. Kalibrierung durch das Primärverfahren**

Als Primärverfahren wird in der Metrologie eine Messmethode bezeichnet, welche es ermöglicht, eine bestimmte physikalische Einheit darzustellen, ohne dabei auf ein Messinstrument zurückzugreifen, welches als Referenz für eben diese Einheit dient. So wird zum Beispiel im Bereich Vibration mit dem Primärverfahren die dynamische Grösse der Beschleunigung auf Referenznormale der Länge und der Zeit zurückgeführt. Die Methode welche dabei zum Einsatz gelangt ist schematisch auf folgender Zeichnung dargestellt (Fig. 5):

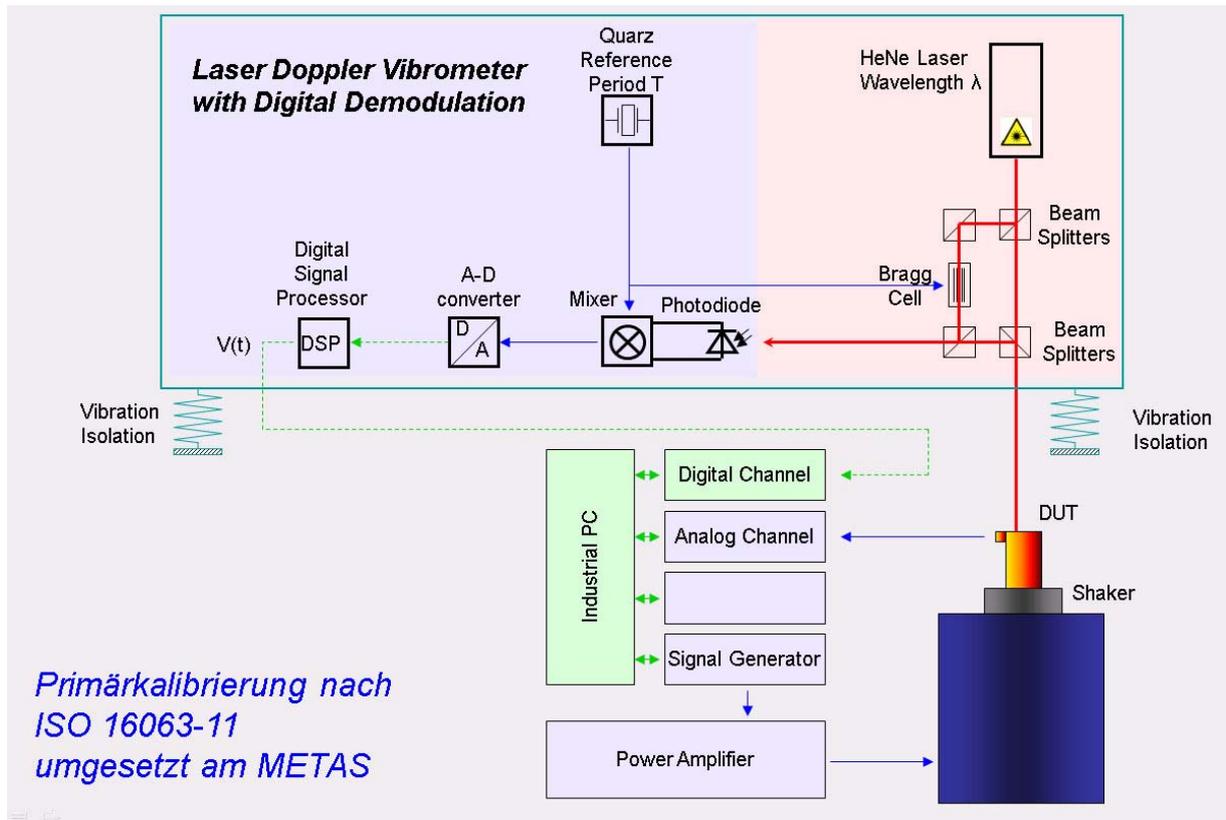


Fig. 5: Primärmethode zur Darstellung der Beschleunigung (resp. Geschwindigkeit) im Bereich Vibration. Als Referenz dient ein Laser-Doppler-Vibrometer, welches ermöglicht, die abgeleitete SI-Einheit der Beschleunigung ( $\text{ms}^{-2}$ ) mit Hilfe einer bekannten Wellenlänge  $\lambda$  und der Periode  $T$  eines Quarz-Normals letztlich auf die Einheiten der Länge (m) und der Zeit (s) zurückzuführen.

Ähnlich wie bei der Sekundärmethode wird ein zu kalibrierender Prüfling (DUT) mit Hilfe eines Shakers in Vibrationen versetzt. Zum Regeln (und Messen) der bereitgestellten mechanischen Erregung gelangt jedoch anstelle eines Referenz-Sensors ein Laser-Doppler-Vibrometer zum Einsatz. Dieses Vibrometer beinhaltet in einem optischen Systemteil ein Interferometer bei dem als Quelle (und Längennormal) ein HeNe-Laser verwendet wird. Ein Teil des emittierten Laserstrahls wird auf einen Messpunkt auf dem Prüfling gelenkt. Die zu untersuchende Oberfläche muss einen Teil des auftreffenden Lichtes so reflektieren, dass ein genügend starker Anteil davon im Interferometer auf einer Photozelle mit einem separat geführten Referenz-Strahl überlagert werden kann. Wenn sich die zu untersuchende Oberfläche nun während dieser Reflexion in Richtung des Lasers bewegt, erfährt das reflektierte Licht einen Doppler-Shift. Das heisst, die optische Frequenz wird um einen Betrag von

$$f_D = 2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (3)$$

um die Dopplerfrequenz, zu höheren Frequenzen (und kürzeren Wellenlängen) hin verschoben. Umgekehrt wird die optische Frequenz um den entsprechenden Betrag reduziert, wenn sich die untersuchte Fläche vom Laser entfernt. Bei der Überlagerung mit dem durch Strahlteiler separat

geführten Referenzstrahl im Interferometer auf dem optischen Detektor entsteht so eine Modulation der optischen Intensität, deren Frequenz die Information über die Geschwindigkeit der untersuchten Oberfläche beinhaltet. Um auch bei kleinen Prüflings-Geschwindigkeiten ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis (und entsprechend eine grosse Präzision) zu erhalten, wird auch der Referenzstrahl des Interferometers selber mit Hilfe eines akusto-optischen Modulators (Bragg-Zelle) moduliert. Die Modulationsfrequenz beträgt 40 MHz und ist (anders als die um einen Faktor  $10^7$  höher gelegenen optischen Frequenzen) mit Hilfe einer Photodiode direkt in ein elektrisches Signal wandelbar. Bei diesem sogenannten Heterodyn-Verfahren kann bei der Geschwindigkeitsmessung neben dem Betrag auch die Richtung bestimmt werden, da sich der Doppler-Effekt als Frequenzänderung mit Vorzeichen bemerkbar macht.



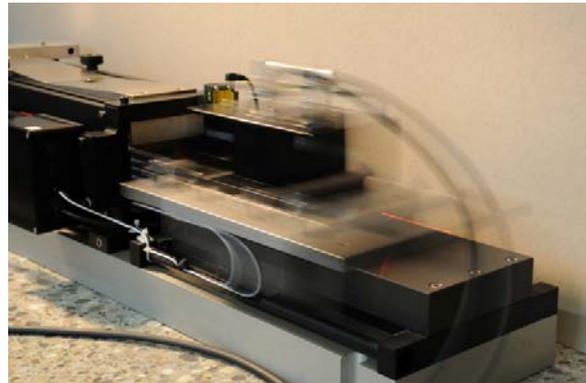
*Fig. 6: Ansicht des Messaufbaus für die Primär-Kalibrierung. Auf der Übersichtphoto rechts sieht man den Laser-Kopf des Vibrometers, welcher auf einer Vibrationsisolation montiert ist. Auf der linken Seite ist ganz oben der Vibrometer-Controller und die Laser-Einheit abgebildet. Links unten sieht man Detail-Aufnahmen des HF-Shakers mit montiertem Prüfling - hier ein zu kalibrierender Impedanzmesskopf.*

Das elektrische Signal wird über einen Mischer mit dem ursprünglichen Zeit-Referenz-Signal verglichen, welches auch die Bragg-Zelle ansteuert. Dadurch steht am Ausgang des Mixers ein elektrisches Signal zur Verfügung, dessen Modulationsfrequenz der Doppler-Frequenz des Prüflings entspricht. Tatsächlich werden zur Bestimmung der Bewegungsrichtung zwei solche Signale erzeugt (im Schema nicht dargestellt), wovon eines in Quadratur zum anderen steht. Mit einer numerischen Demodulation

(welche durch einen DSP ausgeführt wird) kann so ein Datenstrom von Geschwindigkeits-Zeit-Daten generiert werden. Dabei stehen pro Sekunde 96'000 Messungen der Momentangeschwindigkeit zur Verfügung.

Der Takt für das Digitalisieren des Prüflings-Signals wird im Fall einer Primärkalibrierung durch das Laser-Vibrometer vorgegeben. Dadurch kann eine Synchronizität der Prüflings und Referenz-Daten gewährleistet werden. Die weitere Datenanalyse zur Bestimmung der Empfindlichkeits-Amplitude und -Phase erfolgt nun entsprechend wie bei der Sekundärkalibrierung.

Das am METAS für die Primärmethode eingesetzte Laser-Doppler-Vibrometer ist ein kommerziell erhältliches Produkt. Im Gegensatz zu vielen anderen verfügbaren Vibrometer-Typen, in welchen normalerweise die gemessene Geschwindigkeit als Spannungssignal auf einem Analog-Ausgang bereit gestellt wird zeichnet sich dieser Typ insbesondere durch seinen Controller aus, welcher auch die digitale Demodulation vornimmt. Ein Drift in der Signal-Aufbereitung kann somit a priori ausgeschlossen werden.



*Fig. 7: Für horizontale Kalibrierungen im Niederfrequenzbereich wird typischerweise ein luftgelagerter APS 129 Kalibriershaker verwendet, wie man ihn auf der linken Seite im Vordergrund erkennen kann. Auf der selben Photo ist im Hintergrund die Vibrationsisoliationsvorrichtung sichtbar, auf welcher der Laser-Vibrometer-Mess-Kopf befestigt wird. Auf der rechten Photo ist aufgrund der Bewegungsunschärfe der Laser-Referenz-Messpunkt an der Shaker-Tischplatte erkennbar.*

## 5. Dominierende Komponente der Messunsicherheit

Die Genauigkeit einer Kalibrierung wird am METAS durch die erweiterte Messunsicherheit nach ISO (GUM: 1995) quantifiziert. Dabei wird versucht allen Stör-Parametern Rechnung zu tragen, welche ein Messergebnis beeinflussen können. Es wird eine komplette Liste von Einflussgrößen erstellt, die zu berücksichtigen sind, und für jede einzelne Grösse wird eine Abschätzung des Bereichs vorgenommen in welchem ihr Wert liegen kann. Ausserdem wird für jeden dieser Stör-Parameter untersucht, wie stark das Messergebnis durch diesen verfälscht wird. Schliesslich wird mit einem standardisierten Verfahren der kumulierte Einfluss sämtlicher Einflussgrößen berechnet und in Form eines Vertrauensintervalls als Bestandteil eines Messresultates angegeben. Bei der Kalibrierung von Vibrationsaufnehmern hängt die

erreichbare Messunsicherheit stark vom Prüfling und von den gewünschten Kalibrierbedingungen ab. Je nach Gewicht und bevorzugter Orientierung im Schwerfeld der Erde muss der entsprechende Shaker gewählt werden. Die Bauform und die vorgesehene Montagevorrichtung aber auch die Art des Ausgangssignals des Prüflings können die Kalibriergenauigkeit ebenfalls beeinflussen. Schliesslich hängt diese auch davon ab bei welchen Amplituden oder Frequenzen kalibriert werden soll. Typische Betriebsbedingungen und zugehörige Messunsicherheiten, die sich mit den am METAS vorhandenen Einrichtungen erreichen lassen können den Tabelle 1 und 2 entnommen werden:

Orientierung im Schwerfeld	Nutzbarer Frequenzbereich /Hz	Maximale Masse des Prüflings /kg	Maximale Weg-amplitude /mm	Max.erzeugbare Beschleunigung (m <sub>Prüfling</sub> 1.5kg) <sup>†</sup> /ms <sup>-2</sup>	Messunsicherheit /%
horizontal	0.4 ... 63	23	80	13 <sup>*</sup>	1
horizontal	>63 ... 350	23	limitiert durch Beschleunigung	13 <sup>*</sup>	1 ... 3
vertikal	0.4 ... 63	11	80	44 <sup>*</sup>	1 ... 3
vertikal	>63 ... 350	11	limitiert durch Beschleunigung	44 <sup>*</sup>	1 ... 3

*Tab. 1: Übersichtstabelle realistischer Kalibrierbedingungen und erreichbarer Messunsicherheiten für die Charakterisierung schwerer Vibrations-Sensoren im Niederfrequenzbereich.*

Frequenzbereich	Primärmethode nach ISO 16063-11		Sekundärmethode nach ISO 16063-21	
	Messunsicherheit Betrag /%	Messunsicherheit Phase /°	Messunsicherheit Betrag /%	Messunsicherheit Phase /°
5 Hz ... <2 kHz	0.4	0.5	1.0	1.0
2 kHz ... 5 kHz	0.4	1.0	1.5	2.0
>5 kHz ... 10 kHz	0.8	1.0	2.0	2.0
>10 kHz ... 20 kHz	1.0 ... 2.5	-	-	-

*Tab. 2: Vergleichstabelle der bestmöglichen Kalibriergenauigkeit im Bezug auf Amplitude und Phase für Sensorkalibrierungen mit der Primär- resp. Sekundärmethode.*

Die wichtigste Limitierung im Bezug auf die realisierbare Genauigkeit einer Kalibrierung liegt sowohl im Hochfrequenz- als auch im Niederfrequenzbereich in der Bereitstellung eines genügend gut definierten mechanischen Signals.

Im Hochfrequenzbereich bewegt sich für eine gegebene Anordnung eines Prüflings, der mit einer bestimmten Montage-Vorrichtung auf der Shaker-Armatur befestigt ist, ab einer bestimmten Frequenz die Gesamtstruktur nicht mehr als starrer Körper. Die Deformationen, welche auf Grund seiner Elastizität unvermeidlich sind, nehmen im Vergleich zu den Schwingungsamplituden, die beim Kalibriervorgang erzeugt werden, zu da die letzteren bei gleichbleibender Beschleunigung quadratisch mit der Frequenz abnehmen (bei 10 kHz tritt eine Spitzen-Beschleunigung von 10 ms<sup>-2</sup> schon für Auslenkungsamplituden von gerade mal 2.5 nm auf). Man hat sich also bei sehr hohen Frequenzen eine mechanische Konstruktion, die auf den ersten Blick durchaus starr und kompakt erscheint, am ehesten als "Wackelpudding" vorzustellen.

Schon vorher - bei tieferen Frequenzen - machen sich allerdings Schwierigkeiten in der Generierung einer perfekten, rein eindimensionalen Bewegung bemerkbar. Selbst ein starrer Prüfling hat nämlich im Bezug auf die Dynamik drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade. Bei der Kalibrierung möchte man jedoch ausschliesslich einen translatorischen Freiheitsgrad anregen und dabei die Antwort des Prüflings auf diese mechanische Erregung messen. Das gelingt nur bei tiefen Frequenzen und grossen Auslenkungsamplituden recht gut. Man bedient sich dabei eines mechanischen Lagers, welches die Bewegung des Prüflings auf einen Freiheitsgrad einschränkt. Jede Art Lager hat jedoch ein gewisses Führungsspiel. Dieses kann zwar sehr klein und statisch kaum messbar sein - es wird sich jedoch mit steigender Frequenz im Vergleich zur verschwindenden Auslenkungsamplitude  $\sim \frac{1}{f}$  (für Geschwindigkeits-Sensoren) resp.  $\sim \frac{1}{f^2}$  (für Beschleunigungs-Sensoren) unweigerlich bemerkbar machen.

Man kann sich diese Problematik am besten mit einem für die Kalibrierung ungeeigneten Messaufbau veranschaulichen. Fig. 8 zeigt eine Konfiguration, mit welcher versucht worden war, einen schweren Aufnehmer nach dem Vergleichsverfahren zu kalibrieren. Obwohl die Methode nach ISO 16063-21 einen direkten Kontakt zwischen den Referenz-Ebenen von Prüfling und Vergleichsnormalempfiehlt, sollte in Anbetracht der verhältnismässig tiefen Frequenzen hier darauf verzichtet werden. Dies erschien auch deshalb angebracht, weil als Referenzebene des zu untersuchenden Sensors ausschliesslich seine Unterseite in Frage kommt. In der Anwendung ist es vorgesehen, diesen (mit oder ohne zusätzliche Montageplatte) mit seiner Unterseite auf die zu messende Struktur anzubringen. Die Gehäuse-Seitenwand steht zudem nicht genau rechtwinklig zum Sensor-Boden.

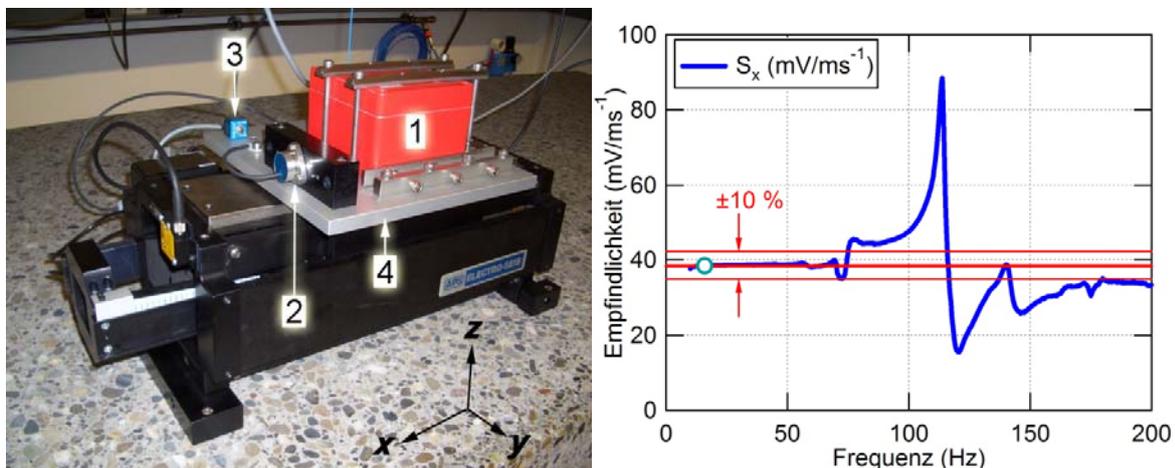


Fig. 8: Auf der Photo links ist eine Anordnung sichtbar, welche für die Kalibrierung eines 1.5 kg schweren Prüflings (1) ausser bei sehr tiefen Frequenzen ungeeignet ist. Letzterer wurde fest auf dem Shakertisch (4) montiert, dessen horizontale Bewegung mit Hilfe eines Referenzsensors (2) gemessen wurde. Dabei wurde eine scheinbare Empfindlichkeitskurve (rechts) gemessen, die um 120 Hz eine ausgeprägte Resonanz aufwies. Mit einem triaxialen Zusatzsensor (3) konnte das Problem analysiert werden.

Bei dieser Anordnung wurde eine Sensor-Empfindlichkeit gemessen, welche scheinbar ausgeprägte Resonanzen aufwies. Es stellte sich die Frage, ob diese Charakteristik tatsächlich eine Eigenart des untersuchten Prüflings darstellte, ob die Befestigungs-Vorrichtung von Prüfling und Referenz allenfalls nicht ausreichend starr war, oder ob Kipp- oder Taumelbewegungen für die erhaltenen Resultate verantwortlich waren. Deshalb wurde die beim Kalibriervorgang resultierende Bewegung des Shaker-Tisches mit Hilfe eines triaxialen Sensors überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass der Shakertisch bei einer aus Sicht des Vergleichsnormals konstant gehaltenen Beschleunigung von  $1 \text{ ms}^{-2}$  abhängig von der Frequenz z.T. recht abenteuerliche Bewegungen vollführte.

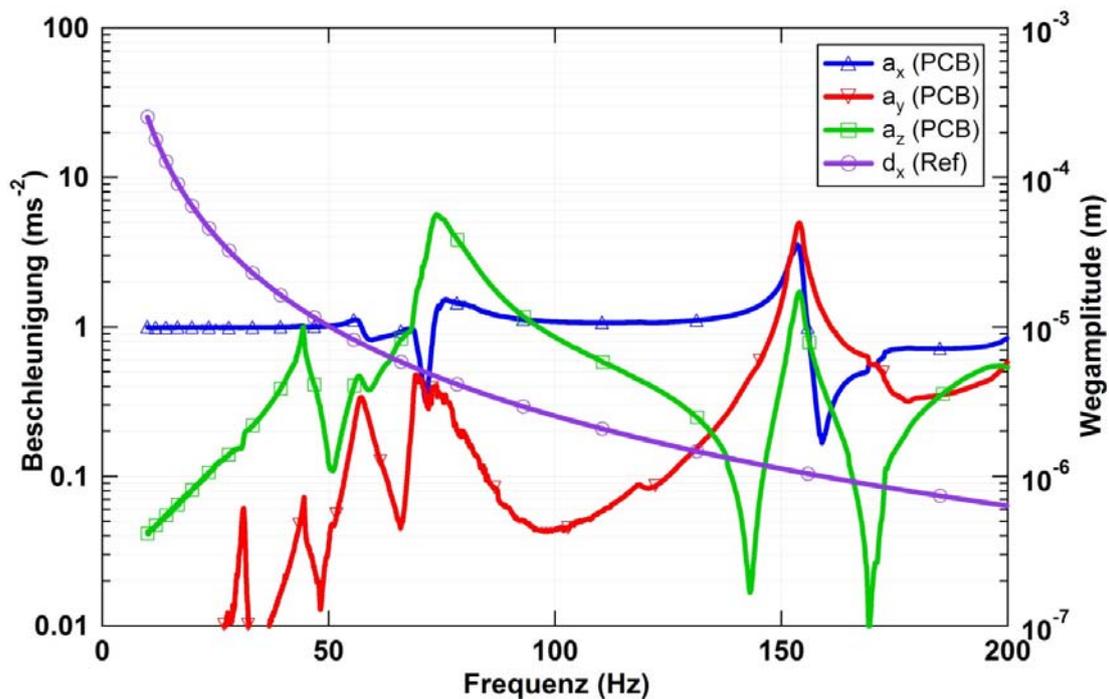


Fig. 9: Die Beschleunigungen, die durch den triaxialen Sensor in Fig. 8 gemessen werden, während die am Referenz-Normal auftretende Beschleunigung konstant auf  $1 \text{ ms}^{-2}$  gehalten wird. Die im Messpunkt auftretenden Querbeschleunigungen sind praktisch ausnahmslos in der gleichen Grössenordnung wie die Hauptachsenbeschleunigung, z.T. sind sie sogar grösser.

Der triaxiale Sensor stellte im Messpunkt selber grosse Querbeschleunigungen fest. Man kann sich jedoch leicht vorstellen, dass diese in erster Linie auf Kipp-Bewegungen der Gesamtkonstruktion zurückzuführen sind. Bei der Rotation eines Objektes machen sich nämlich mit zunehmender Distanz von der Achse wachsende Lokalbeschleunigungen bemerkbar.

Kipp-Bewegungen wurden untersucht, indem mit einem Laservibrometer bei konstanter Prüflingsbewegung unterschiedliche Punkte der Gehäusewand untersucht wurden (Fig. 10). Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die Gesamtkonstruktion zwar sehr wohl als starres Objekt bewegte, dass bei dieser (ungeeigneten) Konfiguration der gewünschten x-Achsen-Beschleunigung eine frequenzabhängige, starke Kippbewegung überlagert war. Die bevorzugte Kipp-Richtung und Amplitude

war zwar stark frequenzabhängig, jedoch bemerkenswert gut reproduzierbar, so dass für jeden Vibrometer-Messpunkt ein kompletter Frequenz-Scan durchgeführt werden konnte um mit den so ermittelten Daten anschliessend ein Gesamtbild zu erhalten.

Bei genauerer Betrachtung wird augenfällig, weshalb die in Fig. 8 gezeigte Vorrichtung für die beschriebene Aufgabe nicht verwendet werden kann. Der Hauptgrund ist auf der rechten Seite der Fig. 10 dargestellt. Man sieht, dass aufgrund der mechanischen Konstruktion des Shakers ein grosser Versatz des Massenschwerpunktes der bewegten Struktur gegenüber der angreifenden Kraft besteht. Dadurch entsteht gezwungenermassen ein grosses Drehmoment.

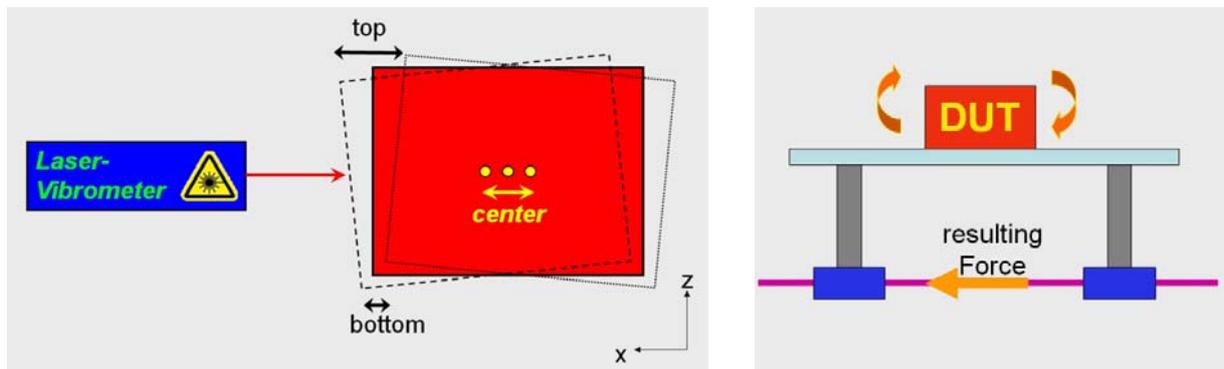


Fig. 10: Auf der linken Seite ist schematisch ein Verfahren dargestellt, mit dem mit Hilfe eines Laser-Vibrometers die Kipp-Bewegung eines Prüflings untersucht werden konnte, indem unterschiedliche Messpunkte angepeilt wurden. Wegen der überlagerten Dreh-Bewegung wird im dargestellten Fall auf der Prüflings-Oberseite eine scheinbar viel grössere Beschleunigung gemessen als weiter unten. Auf der rechten Seite wird schematisch erläutert, wie aufgrund einer asymmetrischen Montage ein Kippmoment induziert wird.

Dass mit diesem Kippen Kalibrierfehler entstehen würden wird ersichtlich, wenn man sich die für eine Kalibrierung bei  $1\text{ms}^{-2}$  zu erzeugenden Wegamplituden in Erinnerung ruft, wie sie auf Fig. 8 ersichtlich sind. Bei 160 Hz ist das nur noch  $1\ \mu\text{m}$ .

Zur Reduktion der auf dieser Problematik beruhenden Messunsicherheit werden unterschiedliche Massnahmen erfolgreich umgesetzt. Zum einen wird in horizontaler Richtung eine optimalere Vorrichtung verwendet, wie sie z.B. durch den APS 129 Shaker ermöglicht wird. Wie auf Bild 7 andeutungsweise sichtbar gibt es bei dieser Vorrichtung diesen Versatz zwischen angreifender Kraft und Massenschwerpunkt nicht in demselben Ausmass. Bei Prüflingen wie z.B. dem MS 2003 von Syscom kann dadurch am METAS bis zu Frequenzen von  $> 300\ \text{Hz}$  eine Unsicherheit von  $< 3\ \%$  erreicht werden.

In vertikaler Richtung wird darauf geachtet, dass die Empfindlichkeitsachse des Prüflings mit der Hauptachse des Referenz-Sensors zusammenfällt. Dadurch machen sich die verbleibenden Kipp-Bewegungen weniger ausgeprägt als Kalibrier-Fehler (resp. Mess-Unsicherheit) bemerkbar.

## 6. Schlussfolgerungen

METAS, das nationale Metrologie-Institut der Schweiz, betreibt ein Vibrationslabor, in welchem Vibrations-Sensoren kalibriert werden. Unterschiedliche Typen für verschiedene Einsatzgebiete können mit optimierten Einrichtungen untersucht werden. Je nach Anforderung im Bezug auf Preis resp. Messunsicherheit stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.

Mit einem auf einem Laser-Doppler-Vibrometer mit digitaler Demodulation basierenden Primärverfahren können Referenznormale können Amplitude und Phase der Sensor-Empfindlichkeit mit der höchsten Genauigkeit bestimmt werden.

Kostengünstigere Kalibriermöglichkeiten stehen basierend auf dem Vergleichsverfahren zur Verfügung.

Eine wichtige Limitierung der Kalibriergenauigkeit wird durch das Fehlen von "perfekten" Shakern verursacht. Mechanische Bewegungen können nicht in einem beliebig breiten Frequenzbereich über einen grossen Amplitudenbereich und für beliebige Prüflingsmassen (und Dimensionen) in der gewünschten Raumrichtung rein eindimensional erzeugt werden. Aus diesem Grund entschieden wir uns für ein modulares System, welches je nach Aufgabe mit dem jeweils geeigneten Vibrations-Erregungs-System betrieben werden kann.