

# **Ermittlung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren**

Diplomarbeit

von

Gerhard Klade

Matrikel-Nr.: 0230525

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Thurner

Begutachter: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser

Technische Universität Graz



Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Leichtbau

Graz, im September 2011

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 09.09.2011

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, reading "Meade Gerhand", written over a horizontal line.

Unterschrift

## **Vorwort**

Schon während meiner Studienzeit konnte ich eine Menge berufliche Erfahrung im Bereich Messtechnik sammeln. Durch die Möglichkeit meine Diplomarbeit bei der anerkannten Prüfstelle PJ Messtechnik GmbH zu schreiben, konnte ich zusätzliche wichtige Erkenntnisse sammeln, die für meine berufliche Zukunft sicher nützlich sein werden.

Zuerst möchte ich mich für die Unterstützung und die engagierte Betreuung bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Thurner und Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser vom Institut für Leichtbau bedanken. Mein Dank gilt weiters Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Joch von der Firma PJ Messtechnik GmbH für die Möglichkeit der Durchführung der Arbeit und die Einbringung seiner Erfahrungen und Kenntnisse in diesem Bereich.

Darüber hinaus möchte ich mich auch bei den hier nicht genannten Personen bedanken, die mir während der Durchführung der Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

## Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der Messunsicherheit bei der sinusförmigen Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren für eine konkrete Kalibriereinrichtung. Der Kalibrieraufbau besteht aus einem konventionellen elektrodynamischen Schwingererger samt zugehörigem Schwingregelsystem, der mechanischen Aufspanneinrichtung für den Referenzsensor und die zu kalibrierenden Sensoren sowie einer Datenerfassungs- und Auswerteeinheit. Die Unsicherheit des vorliegenden Kalibriersystems wird durch Aufstellen des Messunsicherheitsbudgets nach Vorgaben der international relevanten normativen Regelwerke - GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) sowie DIN ISO 16063-21 – qualitativ und quantitativ ermittelt. Damit kann die reale Unsicherheit einer Sensorkalibrierung am realisierten Kalibriersystem bestimmt werden, wodurch eine gültige Sensorkalibrierung im Rahmen einer firmeninternen Werkskalibrierung für Beschleunigungssensoren ermöglicht wird.



## Abstract

This thesis focuses on the determination of measurement uncertainty in the sinusoidal calibration of accelerometers after the comparison method of measurement to a specific calibration device. The calibration device consists of an electrodynamic vibration excitation with the associated vibration control system, the mechanical clamping device for the reference sensor and the sensors to be calibrated plus a data acquisition and evaluation unit. The uncertainty of the calibration system is calculated by establishing the uncertainty budget according to the international regulations GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) and DIN ISO 16063-21. Hereby the real uncertainty of a calibration on the implemented calibration system can be determined. This enables an internal working standard calibration of accelerometers.

---

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

1. Einleitung .....	1
2. Stand der Technik .....	4
3. Messung von Beschleunigungen .....	8
3.1. Mechanische Beschreibung von Beschleunigungssensoren .....	8
3.2. Piezoelektrische Beschleunigungssensoren .....	10
3.3. Piezoresistive Beschleunigungssensoren .....	11
3.4. Kapazitive Beschleunigungssensoren.....	12
3.5. Servo-Beschleunigungssensoren.....	14
3.6. Beschleunigungsmessung mittels Laservibrometer .....	14
4. Verfahren zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren.....	17
4.1. Allgemeines .....	17
4.2. Primär Schwingungskalibrierung mit einem Laser-Interferometer.....	19
4.3. Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger mit Sinusanregung.....	22
4.4. Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger mit stoßförmiger Anregung .....	24
5. Grundlagen zur Bestimmung der Messunsicherheit.....	28
5.1. Allgemeines .....	28
5.2. Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit nach GUM .....	28
5.3. Modell zur sinusförmigen Vergleichskalibrierung von Beschleunigungssensoren.....	35
6. System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren .....	42
6.1. Konzept der Kalibriereinrichtung .....	42
6.2. Schwingregelsystem .....	44
6.3. Schwingungserreger .....	45
6.3.1. Aufbau des Schwingerregers .....	45
6.3.2. Ermittlung der Quer- und Taumelbewegung des Shakers .....	48

---

6.3.2.1.	Einfluss der Querschleunigung auf das Kalibrierergebnis ...	48
6.3.2.2.	Messaufbau .....	52
6.3.2.3.	Versuchsumfang.....	56
6.3.2.4.	Ermittelter Klirrfaktor aus Versuch 1 .....	60
6.3.2.5.	Ergebnisse aus der Ermittlung der Quer- und Taumelbewegungen des Schwingerregers.....	65
6.4.	Referenzsensor.....	66
6.5.	Prüflinge.....	70
6.6.	Messverstärker .....	71
6.7.	Aufspannplatte .....	74
6.8.	Abschätzung der Eigenschwingformen des Schwingungssystems .....	74
7.	Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren .....	78
7.1.	Allgemeines .....	78
7.2.	Budgettabelle, allgemein.....	81
7.3.	Eingangsgößen.....	83
7.3.1.	Übertragungskoeffizient des Referenzsensors $S_1$ .....	83
7.3.2.	Zeitliche Instabilität der Sensoren $K_{I,BNG}$ .....	84
7.3.3.	Verstärker-Übertragungskoeffizienten $V_R$ .....	84
7.3.4.	Zeitliche Instabilität der Verstärker Übertragungskoeffizienten $K_{V1}$ .....	86
7.3.5.	Temperatureinfluss der Sensoren $K_T$ .....	87
7.3.6.	Einflussfaktor der Querbewegung $K_{QD}$ .....	88
7.3.7.	Einflussfaktor Basisdehnung $K_{BD}$ .....	89
7.3.8.	Einflussfaktor Signalstörungen $K_{St}$ .....	90
7.3.9.	Einfluss von Oberwellen $K_O$ .....	91
7.3.10.	Einflussfaktor der Ankopplungsparameter $K_{Pos}$ .....	92
7.3.11.	Einfluss von Nichtlinearitäten des Referenzsensors $K_{lin, R}$ .....	92
7.3.12.	Einfluss von Nichtlinearitäten des Messverstärkers $K_{lin, V}$ .....	94
7.3.13.	Einfluss des Magnetfeldes des Schwingungserregers auf die Messung $K_{MG}$ .....	94
7.3.14.	Einfluss von Resteffekten $K_{RE}$ .....	95
7.4.	Messunsicherheitsbudget bei der Kalibrierung .....	96

---

8. Kalibrierung eines Beschleunigungssensors.....	99
8.1. Auswertung der Messsignale .....	99
8.1.1. Signalauswertung im Frequenzbereich.....	99
8.1.2. Signalauswertung bei der Kalibrierung .....	103
8.2. Kalibrierbedingungen .....	108
8.2.1. Zu kalibrierende Sensoren.....	108
8.2.2. Einsatz der Verstärkereinschubplatten .....	108
8.2.3. Montage der Sensoren .....	109
8.2.4. Beachtung der Umgebungsbedingungen.....	111
9. Fazit / Ausblick.....	112
10. Quellenverzeichnis.....	114
11. Abbildungsverzeichnis.....	118
12. Tabellenverzeichnis .....	122
13. Anhang.....	123
13.1. Detailergebnisse der Versuche 2 bis 10 für die Ermittlung der Querbewegung des Schwingerregers.....	123
13.1.1. Detailergebnis von Versuch Nr. 2.....	123
13.1.2. Detailergebnis von Versuch Nr. 3.....	124
13.1.3. Detailergebnis von Versuch Nr. 4.....	125
13.1.4. Detailergebnis von Versuch Nr. 5.....	126
13.1.5. Detailergebnis von Versuch Nr. 6.....	127
13.1.6. Detailergebnis von Versuch Nr. 7.....	128
13.1.7. Detailergebnis von Versuch Nr. 8.....	129
13.1.8. Detailergebnis von Versuch Nr. 9.....	130
13.1.9. Detailergebnis von Versuch Nr. 10.....	131
13.2. Ergebnis der Kalibrierung eines Sensors des Typs PJM-LN .....	132
13.3. Kalibrierschein Referenzsensor.....	136
13.4. Kalibrierschein der Verstärkereinschubplatten .....	139
13.5. Fertigungszeichnungen .....	143

## Abkürzungsverzeichnis

BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
BNME	Bezugsnormalmesseinrichtung
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
EAL	European cooperation for Accreditation of Laboratories
FFT	Fast-Fourier-Transformation
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HeNe	Helium Neon
IEPE /ICP	Piezoelektrischer Aufnehmer mit integrierter Elektronik
NME	Normalmesseinrichtung
NMI	Nationales Metrologieinstitut
PDF	Probability density function - Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
PTB	Physikalisch – Technische Bundesanstalt
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat

## Symbolverzeichnis

$\Delta f(t)$	Momentanwert der Frequenzverschiebung
$\Delta T$	Temperaturänderung
$\Delta \varphi(t)$	Momentanwert der Phasenverschiebung
$a$	Allg. Ausdruck für 1) eine Beschleunigung oder 2) die halbe Spanne symmetrischen Verteilung
$A$	Elektrodenfläche
$\hat{a}$	Amplitude der Beschleunigung
$a_{Anz}$	Ermittelter "angezeigter" Wert der Beschleunigung
$a_{Qmax}$	Maximale Querschleunigung
$c$	Dämpfungskoeffizient eines idealisierten Dämpfers oder Federkonstante
$C$	Elektrische Kapazität
$c_i$	Sensitivitätskoeffizient
$d$	Luftspaltweite
$d_{S2(f)}, d_{S2(a)}$	Abweichung in % zur Referenz
$e$	Allg. relative Messabweichung
$S_{\%Qmax}$	Auf den Übertragungskoeffizienten $S$ bezogene maximale Querschleunigungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers in Prozent
$S_{max}$	Vektor der größten Empfindlichkeit des Beschleunigungsaufnehmers
$S_{nom}$	Nominelle Empfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers
$S_{Qeff}$	Effektive Querschleunigungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers
$S_{Qmax}$	Maximale Querschleunigungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers
$E_{T,S}$	Temperaturempfindlichkeit eines Sensors
$F$	An einer Masse wirkende Trägheitskraft
$f_N$	Eigenfrequenz des Gesamtsystems
$I_0$	Ruhestrom des Tauchspulensystems
$k$	Steifigkeit einer idealisierten Feder, Erweiterungsfaktor
$K_i$	Korrekturfaktoren der Einflussgrößen
$k_L$	Klirrfaktor
$m$	Masse eines beschleunigten Körpers
$m_A$	Masse der Aufspannplatte
$m_s$	Masse der Shakerarmatur
$Q$	Güte eines Feder-Masse-Systems
$s$	Weg eines beschleunigten Körpers

---

$S$	Übertragungskoeffizient, Empfindlichkeit eines Beschleunigungssensors (in nomineller Messrichtung)
$\xi$	Amplitude des Schwingweges
$S_1$	Betrag des Übertragungskoeffizienten der Referenzmesskette
$S_2$	Betrag des Übertragungskoeffizienten des zu kalibrierenden Aufnehmers
$U$	Relative erweiterte Messunsicherheit
$u(x_i)$	Relative Messunsicherheit
$U_1$	Ausgangsspannung des Referenzaufnehmers
$\hat{U}_{1,1}$	Amplitude der Grundwelle des Referenzsensors
$\hat{U}_{1,2-i}$	Amplituden der Oberwellen des Referenzsensors
$U_2$	Ausgangsspannung des zu kalibrierenden Aufnehmers
$u_c(y)$	Kombinierte Standardunsicherheit
$v$	Schwinggeschwindigkeit
$V_R$	Verhältnis zwischen der Referenzspannung und der Spannung des Prüflings
$W$	Erweiterte Messunsicherheit
$w(K)$	Relative Standardmessunsicherheit
$w_{rel,i}(y)$	Relative Unsicherheitsbeiträge
$x$	Auslenkung der Masse aus der Ruhelage
$X$	Allg. Ausdrücke für die Eingangsgrößen eines Auswertungsmodells einer Messgröße
$x_N$	Schätzwerte der Ergebnisgrößen
$Y$	Messgröße
$y$	Bester Schätzwert der Messgröße
$\alpha$	Winkel zwischen $E_{max}$ und $E_{nom}$
$\gamma$	Winkel zwischen der wirkenden Querschleunigung der max. Querschleunigungsempfindlichkeit
$\varepsilon$	Dielektrizitätskonstante
$\lambda$	Wellenlänge des Lasers
$\varphi_a$	Nullphasenwinkel der Beschleunigung
$\varphi_s$	Nullphasenwinkel des Schwingweges
$\varphi_v$	Nullphasenwinkel der Geschwindigkeit
$\omega$	Eigenfrequenz des Systems
$\omega_0$	Ungedämpfte Eigenkreisfrequenz
$\hat{x}$	Amplitude der Ausgangsspannung

# 1. Einleitung

Durch physikalische Größen werden die Eigenschaften, Merkmale oder Zustände von Körpern beschrieben. Diese werden als Messgrößen bezeichnet wenn sie Gegenstand einer Messung sind. Beim Messvorgang handelt es sich somit um die Erfassung von physikalischen Größen und damit verbunden die Zuordnung einer Maßzahl wobei Maßzahlen unabhängig voneinander festgelegte Basiseinheiten (SI-Einheiten) sind. Von den vordefinierten Basiseinheiten können Einheiten für jede physikalische Größe abgeleitet werden [27]. Eine solche abgeleitete Einheit wäre die Beschleunigung mit der Einheit  $m/s^2$  wobei die Beschleunigung die Änderung des Geschwindigkeitsvektors beschreibt. Für die Erfassung solcher physikalischen Größen bedient man sich u.a. sogenannter Sensoren, die die Größe in elektrische Signale umwandeln.

Um Eisenbahnfahrzeuge für den internationalen Verkehr zuzulassen wird die Einhaltung von Grenzwerten hinsichtlich Fahrsicherheit und Fahrwegbeanspruchung gemäß UIC-Kodex 518 bzw. der EN DIN 14363 gefordert. Die Überprüfung auf Einhaltung der Grenzwerte erfolgt durch einen experimentellen Nachweis. Ebenso werden für den Festigkeitsnachweis nach EN 13749 und EN 12663 Betriebsmessungen zur Validierung der Lastannahmen am Wagenkasten bzw. Drehgestell gefordert. Weiters wird mit Beschleunigungssensoren bei Eisenbahnfahrzeugen der Schwingkomfort nach UIC 513 ermittelt

Damit das Ergebnis hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte bei den zuständigen Stellen anerkannt wird ist eine Akkreditierung als Prüfstelle nach der EN ISO/IEC 17025 nötig. Um gleichbleibende Qualität bei den Messungen sicherzustellen und den Anforderungen der EN ISO/IEC 17025 zu genügen müssen die bei den Messungen verwendeten Messmittel regelmäßig kalibriert werden.



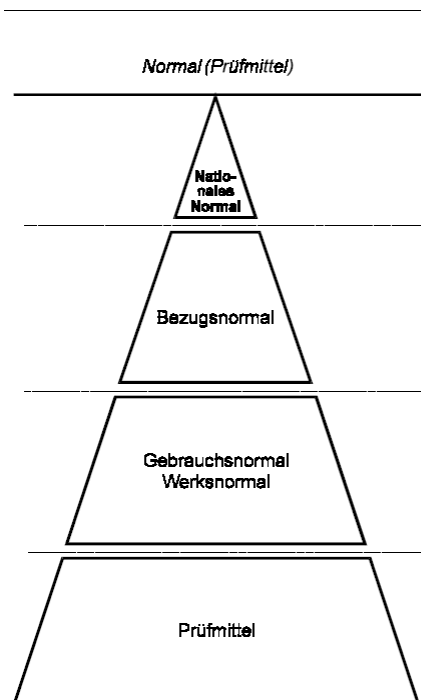
Normal (Prüfmittel)	Anwender	Aufgaben	Voraussetzung der Kalibrierung/Messung	Dokumentation der Kalibrierung/Messung
 Nationales Normal	Metrologisches Staatsinstitut	Bereithaltung und Weitergabe der nationalen Normale	Gesetzlicher Auftrag zur Darstellung der SI-Einheiten und zur Sicherung der internationalen Vergleichbarkeit	Kalibrierschein für Bezugsnormal
Bezugsnormal	Akkreditierte Kalibrierlaboratorien	Sicherung der metrologischen Infrastruktur eines Landes	Kalibrierschein des Staatsinstitutes oder eines anderen akkreditierten Laboratoriums	Kalibrierschein für Gebrauchs- oder Werksnormal
Gebrauchsnormal Werksnormal	Innerbetriebliche Kalibrierlaboratorien	Prüfmittelüberwachung für innerbetriebliche Zwecke	Kalibrierschein des Staatsinstitutes oder eines akkreditierten Laboratoriums	Werkskalibrierschein, Kalibrierzeichen o.ä. für Prüfmittel
Prüfmittel	alle Unternehmensbereiche	Messungen und Prüfungen im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen	Werkskalibrierschein, Kalibrierzeichen o.ä.	Prüfzeichen o.ä.

Abbildung 1: Kalibrierhierarchie [12]

Das dafür nötige Verfahren reiht sich in diesem Bild auf der Ebene Gebrauchsnormal / Werksnormal ein. Mit dem Verfahren sollen nur Werkskalibrierungen für die Prüfmittelüberwachungen durchgeführt werden können. Es muss von den Behörden als gültiges Verfahren für die Werkskalibrierung der Sensoren anerkannt werden.

Das Ergebnis der Kalibrierung ist ein Kalibrierschein der den aktuell gültigen Übertragungskoeffizient des Prüfbeschleunigungssensors beinhaltet. Die Kennwerte von Sensoren hängen in einem gewissen Maß von dem zeitlichen Verlauf der zu messenden Größe ab und daher sind die Sensoren bei einer ähnlichen Belastung wie in der zu messenden Situation zu kalibrieren.

Der Übertragungskoeffizient ist als Verhältnis der elektrischen Ausgangsgröße zu einer spezifizierten Bewegung des Aufnehmers definiert. Das Ergebnis ist lediglich eine Näherung oder ein Schätzwert des Wertes der Messgröße und somit noch nicht vollständig. Um das Ergebnis somit vollständig angeben zu können, ist es notwendig die erweiterte Messunsicherheit nach den entsprechend gültigen

Vorschriften zu ermitteln. Um die für die Kalibrierung nötige Messunsicherheit ermitteln zu können, ist es von wesentlicher Bedeutung genaue Kenntnisse über das Kalibriersystem und alle Einflüsse darauf zu besitzen.

Ziel der Arbeit ist das Erstellen eines Verfahrens zur Kalibrierung von zwei bestimmten Beschleunigungssensortypen. Das Verfahren ist entsprechend den aktuell gültigen Normen und Richtlinien aufzustellen. Zum Erreichen des Ziels beinhaltet die Arbeit die folgenden Punkte:

- Recherche der aktuelle eingesetzten Kalibrierverfahren für Beschleunigungssensoren
- Beschreibung der technischen Anforderungen in Bezug auf die gültigen Normen
- Beschreiben der Messprinzipien der verschiedenen Beschleunigungssensortypen
- Errechnen der Messunsicherheit der gesamten Messkette für die Kalibrierung der Beschleunigungssensoren
- Prozessbeschreibung für die Kalibrierung erstellen
- Verfahrensanweisung erstellen
- Auswerteroutine für die Erstellung eines Kalibrierscheins programmieren mit der Angabe des aktuell gültigen Übertragungskoeffizienten

## 2. Stand der Technik

In den letzten Jahren wurden verschiedene nationale Normale für die Darstellung der Einheit der physikalischen Beschleunigung entwickelt, mit denen Aufnehmer, Messketten und Messgeräte für die Messgröße Beschleunigung in weiten Messbereichen mit hoher Genauigkeit kalibriert werden können [28]. Kalibrieren ist nach DIN 1319-1 das Ermitteln des Zusammenhangs (Übertragungskoeffizienten) zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung [6].

Die Rückführung der Messungen auf nationale Normale ist eine zentrale Forderung in der Norm EN ISO/IEC 17025. Der Begriff **Rückführung** beschreibt einen Vorgang, durch den die Anzeige eines Messgerätes (oder eine Maßverkörperung) in einer Stufe oder in mehreren Stufen mit einem nationalen Normal für die betreffende Messgröße verglichen werden kann. Auf jeder dieser Stufen wurde eine Kalibrierung mit einem Normal durchgeführt, dessen messtechnische Qualität bereits durch Kalibrierung mit einem höherwertigen Normal (kleinerer Unsicherheit) bestimmt wurde. Abbildung 1 zeigt die Rangfolge der Normale und eine sich daraus ergebende messtechnische Organisationsstruktur zur Rückführung von Messungen und Prüfergebnissen auf nationale Normale innerhalb eines Unternehmens. Der Benutzer des Normals oder der Mess- und Prüfmittel wird für jede Ebene der Hierarchie zusammen mit seinen Funktionen innerhalb der Struktur, der messtechnischen Grundlage und den Ergebnissen seiner Arbeit (Dokumentation) angegeben [12].

Die Übertragungskoeffizienten von Beschleunigungssensoren hängen in einem gewissen Maß vom zeitlichen Verlauf der Messgröße ab. Bei statischer Belastung kann der Übertragungskoeffizient einen anderen Wert besitzen als bei dynamischer Belastung [23]. In nachfolgender Abbildung sind die üblichen Kalibrierverfahren zusammengefasst und kurz beschrieben.

Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung	Beschleunigungs-generierung	Methode; Art des Verfahrens; Anmerkung
statisch	langsame Drehung im Erdschwerefeld	„Kippmethode“ ; absolutes Verfahren
	Drehung um eine Achse mit konstanter Geschw.	Zentrifuge; absolutes Verfahren
sinusförmig	Drehung im Erdschwerefeld mit bestimmter Geschw.	„Kippmethode“ ; absolutes Verfahren
	gleichzeitige Drehung um zwei Achsen, mit jeweils konstanter Geschw.	Doppel-Zentrifuge; absolutes Verfahren
	elektrodynamischer Schwingerreger (Lorentzkraft)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reziprozitätsmethode; absolutes Verfahren; vorwiegend in den USA eingesetzt</li> <li>➤ Laserinterferometrieverfahren; absolutes Verfahren; Primärnormal in der PTB</li> <li>➤ Messung der Beschleunigung durch ein Bezugsnormal; Vergleichsverfahren</li> </ul>
stoßförmig	durch Stoß erzeugte Festkörperbewegung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ luftgelagerte Hammer- und Ambosskörper plus Laserinterferometrieverfahren; absolutes Verfahren; Primärnormal in der PTB</li> <li>➤ „Stoßpendel“ ; Messung der Beschleunigung durch ein Bezugsnormal; Vergleichsverfahren; vorwiegend in Deutschland eingesetzt</li> <li>➤ „Fallrohr“ ; Messung der Beschleunigung durch ein Bezugsnormal; Vergleichsverfahren</li> </ul>
	durch Stoß erzeugte Spannungswelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Hopkinsonstab mit Beschleunigungsermittlung über Laserinterferometrieverfahren; absolutes Verfahren; Primärnormal in der PTB</li> <li>➤ Hopkinsonstab mit Beschleunigungsermittlung über eine Dehnungsmessung; Vergleichsverfahren</li> </ul>

Abbildung 2: Gliederung üblicher Kalibrierverfahren für Beschleunigungsaufnehmer [23]

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Kalibrierung zwischen Vergleichs- und Absolutkalibrierung. Bei der Absolutkalibrierung wird die Messgröße durch andere Größen bestimmt, die mit der Messgröße in einem festen funktionalen Zusammenhang stehen. Mit anderen Größen sind Basisgrößen des internationalen Einheitensystems (SI) oder davon abgeleitete Größen gemeint

(z.B. Länge, Masse, ...). Wird z.B. die Beschleunigung bei einer Kalibrierung durch Bestimmung von Weg und Zeit bzw. Frequenz und anschließender zweimaliger Differentiation ermittelt, handelt es sich um ein absolutes Verfahren [23].

Bei den Vergleichsverfahren wird die Messgröße durch eine andere, genauere Messeinrichtung für die gesuchte Messgröße bestimmt. Werden zwei Beschleunigungsaufnehmer der gleichen Beschleunigung ausgesetzt und die eine Messkette durch Vergleich mit der anderen, so zählt dies zu den Vergleichsverfahren [23].

In Österreich hat das BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) den gesetzlichen Auftrag, Messnormale der gesetzlichen Maßeinheiten bereit zu stellen und deren internationale Gleichwertigkeit sicher zu stellen. Es wird nachfolgend jedoch vor allem auf die Dienstleistungen der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Deutschland verwiesen, da dieses Institut eines der weltweit führenden im Bereich der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren ist und auch Innovationen in diesem Bereich voran treibt. Die PTB arbeitet derzeit mit sieben Normalmesseinrichtungen, die als nationale Normale translatorische bzw. rotatorische Bewegungen in einem gewünschten Freiheitsgrad (geradlinig oder um eine feststehende Achse) mit sinus- bzw. stoßförmigen Zeitabhängigkeiten erzeugen und mit Laser-Interferometrie hochgenau messen. Die zwei nachfolgenden Tabellen zeigen alle Verfahren die derzeit im Labor der Physikalisch Technischen Bundesanstalt zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren eingesetzt werden.

Verfahren	Frequenzbereich [Hz]	Max. Beschleunigungsamplitude [ $\text{m/s}^2$ ]	Messunsicherheit bei Primärkalibrierung [%]	Messunsicherheit bei Sekundärkalibrierung [%]
Tieffrequenz-Beschleunigungs-NME	0,1 – 20	2	0,2	0,5
Niederfrequenz-Beschleunigungs-NME	0,4 - 63	15	0,2	0,5
Mittelfrequenz-Beschleunigungs-NME	10 – 5.000	100	0,2	0,5
Hochfrequenz-Beschleunigungs-NME	10 – 20.000	200	0,2 – 0,4	k.A.
Mehrkomponenten-Beschleunigungs-NME	1 - 1000	100	0,5 - 1	k.A.

Tabelle 1: Normalmesseinrichtungen der PTB bei sinusförmiger Anregung

Verfahren	Stoßdauer	Max. Beschleunigungsamplitude [ $\text{m/s}^2$ ]	Messunsicherheit bei Primärkalibrierung [%]	Messunsicherheit bei Sekundärkalibrierung [%]
Stoß-Beschleunigungs-NME 5.000 $\text{m/s}^2$	1 – 10 ms	50 – 5.000	0,5	k.A.
Stoß-Beschleunigungs-NME 10.000 $\text{m/s}^2$	100 – 300 $\mu\text{s}$	1.000 – 100.000	1	k.A.

Tabelle 2: Normalmesseinrichtungen der PTB bei stoßförmiger Anregung

### 3. Messung von Beschleunigungen

Die Beschleunigung beschreibt die Änderung des Geschwindigkeitsvektors. D.h. ändert sich die Geschwindigkeit vom Betrag her oder die Richtung der Geschwindigkeit erfährt der Körper eine Beschleunigung.

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \dot{\vec{v}}(t) \quad (3-1)$$

Damit jedoch eine Beschleunigung auftreten kann, ist immer eine Kraft notwendig. In Systemen mit konstanter Masse gilt dann [34]:

$$\vec{a}(t) = \frac{\vec{F}(t)}{m} \quad (3-2)$$

Dieser Zusammenhang dient als Grundlage für die Messung von Beschleunigungen. In weiterer Folge wird das mechanische System von Beschleunigungssensoren und die verschiedenen Messprinzipien zur Messung der physikalischen Größe Beschleunigung beschrieben.

#### 3.1. Mechanische Beschreibung von Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren sind im Prinzip schwingungsfähige Masse – Feder – Elemente, die Verzögerungsglieder 2. Ordnung bilden. Das Modell eines solchen Elements ist in der nächsten Abbildung dargestellt. Neben der Federkonstante  $k$  und der trägen Masse  $m$  bestimmt die Dämpfung  $c$  das mechanische Antwortverhalten auf eine äußere Kraft  $F(t)$ . Zur Berechnung des Antwortverhaltens ist die Differentialgleichung bzw. die algebraische Gleichung für zugehörige Laplace – Transformation zu lösen [22]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (3-3)$$

$$H(s) = \frac{x(s)}{F(s)/m} = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{c}{m} + \frac{k}{m}} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (3-4)$$

Hierbei ist  $Q$  die Güte des Systems mit

$$Q = (\sqrt{k \cdot m}) / c \quad (3-5)$$

Die Eigenfrequenz des gedämpften Systems berechnet sich zu [22]:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2m \cdot \omega_0}\right)^2} \quad (3-6)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-7)$$

Ist die Einschwingzeit bzw. die Schwingungszeit  $T = 2\pi/\omega$  des Masse – Feder – Systems sehr klein gegenüber der zeitlichen Änderung der Kraft, so kann letztere als zeitlich konstant angesehen werden. In diesem Sonderfall folgt die Amplitude der Auslenkung der seismischen Masse aus der Ruhelage ( $x_0$ ) proportional der wirkenden Kraft  $F_0 = m \cdot a_0$ . Aus der Messung der Auslenkung kann daher die auf die seismische Masse wirkende Beschleunigung bestimmt werden [22].

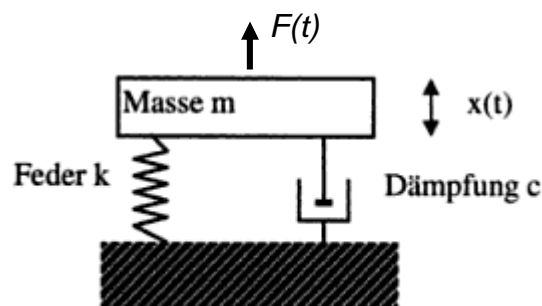


Abbildung 3: Mechanisches Ersatzschaubild eines Beschleunigungssensors [22]

Bei sinusförmiger Anregung lässt sich die Amplitude  $\hat{a}$  und der Nullphasenwinkel  $\varphi_a$  der Beschleunigung  $a$  leicht aus den entsprechenden Kenngrößen der Schwinggeschwindigkeit  $v$  (Amplitude  $\hat{v}$ , Nullphasenwinkel  $\varphi_v$ ) und des Schwingweges (Amplitude  $\hat{s}$ , Nullphasenwinkel  $\varphi_s$ ) errechnen:

$$\hat{v} = \frac{\hat{a}}{\omega} \quad (3-8)$$

$$\hat{s} = \frac{\hat{a}}{\omega^2} \quad (3-9)$$



$$\varphi_s = \varphi_a - \pi \quad (3-10)$$

Die Auslenkung der seismischen Masse kann durch unterschiedliche physikalische Prinzipien gemessen werden. Am häufigsten wird die Auslenkung  $x(t)$  durch Änderung von Widerständen, Kapazitäten oder der elektromagnetischen Induktion sowie durch Nutzung des piezoelektrischen Effekts in ein elektrisches Signal umgewandelt [16]. Bei den verschiedenen Messprinzipien von Beschleunigungssensoren wird nach der Art der Messung der Auslenkung der seismischen Masse unterschieden. Nachfolgend wird näher auf die verschiedenen Messprinzipien der Beschleunigungssensoren eingegangen.

### **3.2. Piezoelektrische Beschleunigungssensoren**

Eine auf solche Sensoren wirkende Beschleunigung erzeugt durch die Trägheit der seismischen Masse eine Kraft auf das vorgespannte piezoelektrische Material. Die Sensoren nutzen die Eigenschaft von piezoelektrischen Materialien aus, dass proportional zu einer auf das Material wirkenden Kraft eine elektrische Ladungsverschiebung stattfindet, die mit geeignet angebrachten Elektroden und einer entsprechenden elektrischen Schaltung erfasst werden kann [16].

Als piezoelektrische Materialien werden Einkristalle wie Quarz oder Turmalin, vielfach aber auch ferroelektrische keramische Werkstoffe wie Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) oder Wismuttitanat eingesetzt. Neben den Materialien lassen sich die Sensoren auch danach unterscheiden wie die Kraft auf das piezoelektrische Material einwirkt. Dabei kann entweder eine Druckkraft, eine Scherkraft oder eine Biegung am piezoelektrischen Material eine elektrische Ladungsverschiebung hervorrufen. Anwendung finden piezoelektrische Sensoren insbesondere im Bereich der Schock- und Vibrationsmesstechnik zwischen 0,5 Hz und ca. 20 000 Hz [16].

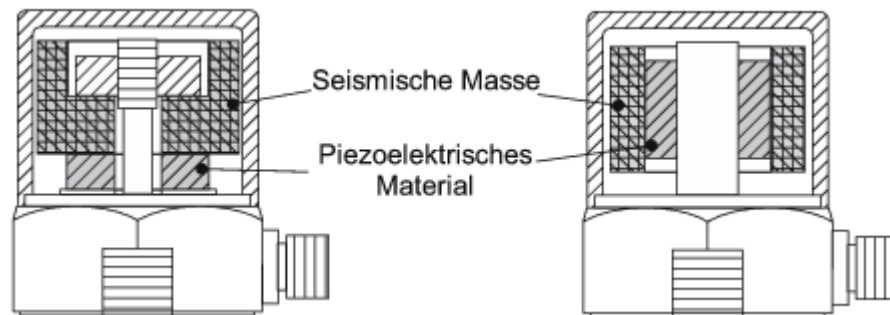


Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau des Kompressionstyps (links) und des Schertyps (rechts) [16]

Eine Variante der Spannungsaufbereitung sind Sensoren mit integrierter Mikroelektronik (IEPE oder auch ICP Systeme genannt). Damit ist es möglich, das hochohmige und relativ schwache elektrische Signale direkt am Piezoelement abzunehmen, zu verstärken und in die Ausgangsimpedanz des Sensors zu wandeln. Man erhält ein störungsfreies niederohmiges Ausgangssignal, was weitgehend unabhängig vom angeschlossenen Kabeltyp und –länge für eine Übertragung über Distanzen von mehr als 100 m geeignet ist. Der Nachteil besteht in der Notwendigkeit einer Stromversorgung der Sensorelektronik [24].

### 3.3. Piezoresistive Beschleunigungssensoren

Häufig wird ein hervorstehender dünner Träger benutzt, der durch bestimmte Formgebung (z. B. Hohlkehlen) als Feder wirkt und dessen freistehendes Ende als seismische Masse ausgebildet ist. Auf jede Seite des Trägers werden piezoresistive Dehnungsmesselemente geklebt (oder bei mikromechanischer Herstellung auch durch Diffusion erzeugt) [16].

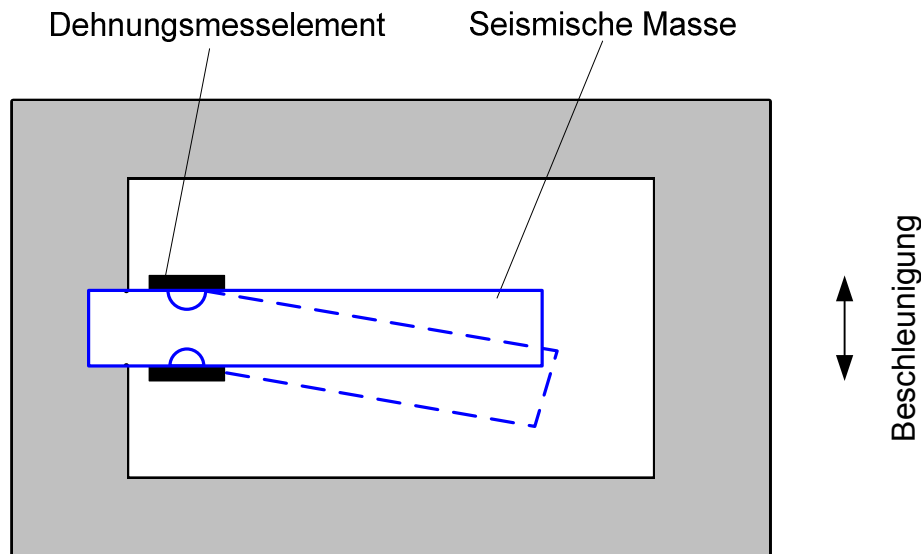


Abbildung 5: Prinzip eines piezoresistiven Beschleunigungssensors [16]

Bei Einwirken einer Beschleunigung auf die Struktur biegt sich der Träger und die Dehnungsmesselemente werden gedehnt bzw. gestaucht. Dadurch erhöht sich der Widerstand des einen Messelements, während der des anderen sinkt. Verschaltet man die Widerstände in geeigneter Weise, so lässt sich ein zur Durchbiegung des Balkens und damit zu einer auf den Sensor wirkenden (auch statischen) Beschleunigung proportionales Ausgangssignal erzeugen. Der elektrische Teil kann Voll- oder Halbbrücken und Schaltungen zur Temperaturkompensation enthalten. Piezoresistive Sensoren haben gegenüber anderen Prinzipien häufig Vorteile bei der Messung von Stößen mit langen Stoßzeiten, bei denen die Erfassung des „DC-Response“ bzw. der niederfrequenten Anteile des Stoßspektrums wichtig ist [16].

### 3.4. Kapazitive Beschleunigungssensoren

Ähnlich wie bei den piezoresistiven Beschleunigungssensoren wird bei den kapazitiven Sensoren an dünnen, als Feder wirkenden Trägern eine seismische Masse ausgebildet. Masse und Gehäuse werden so konstruiert, dass sie als Kondensator wirken. Bei Bewegung des Sensors durch eine Beschleunigung wird die Masse aus ihrer Ruhelage ausgelenkt und die Kapazität des Kondensators

geändert. Die Kapazitätsänderung ist daher durch die Proportionalität zur Auslenkung ein Maß für die Beschleunigung [16].

Als Bauformen kennt man scheibenförmige "mechanische Luft-Kondensatoren", bestehend aus parallelen Elektroden mit kontrolliertem Abstand, zwischen denen aufgrund äußerer Beschleunigungen über eine seismische Masse die Luftspaltweite und damit die Kapazität verändert wird [24].

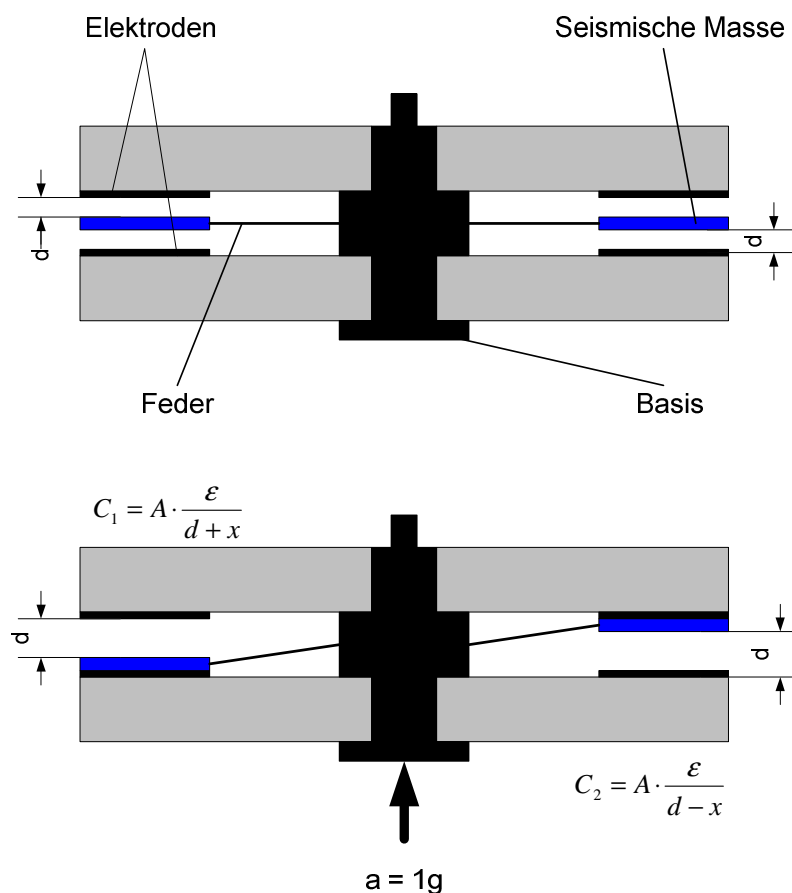


Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven Wandlers ( $C$  – Kapazität,  $A$  – Elektrodenfläche,  $\epsilon$  – Dielektrizitätskonstante,  $d$  – Luftspaltweite,  $x$  – Auslenkung der seismischen Masse) [24]

Wie die piezoresistiven Sensoren können die kapazitiven Sensoren statische Beschleunigungen messen, allerdings besitzen auch sie die Abhängigkeit von einer elektrischen Hilfsenergie d.h., sie müssen mit einer Betriebsspannung

versorgt werden. Da bei den kapazitiven Beschleunigungssensoren Typen realisierbar sind, die eine hohe Empfindlichkeit und einen sehr guten Überlastschutz besitzen, werden sie gern eingesetzt, wenn Beschleunigungen geringer Amplitude zu messen sind, dabei aber hohe Störbeschleunigungen auftreten können [16].

### **3.5. Servo-Beschleunigungssensoren**

Bei den Servo-Beschleunigungssensoren wird die bewegliche seismische Masse über ein elektronisches Regelsystem bei der Messung in ihrer Ruhelage gehalten. Wirkt eine Beschleunigung auf den Sensor so dient die Kraft bzw. Spannung, die dazu aufgebracht werden muss, dass damit die seismische Masse in ihrer Ruhelage gehalten wird, als Maß für die gemessene Beschleunigung. Die rücktreibende Kraft der seismischen Masse wird durch elektromagnetische Felder erzeugt [16].

Dieser Sensortyp zeichnet sich vor allem durch eine ausgezeichnete Stabilität, gute Genauigkeit bzw. hohes Auflösungsvermögen und große Bandbreite aus. Der Messbereich der Sensoren kann üblicherweise durch Hinzufügen von externen Widerständen vergrößert bzw. verkleinert werden [16].

Eine detaillierte Beschreibung über Aufbau und Funktionsweise dieses Sensortyps ist in Kapitel 6.4 ersichtlich.

### **3.6. Beschleunigungsmessung mittels Laservibrometer**

Laservibrometer ist eine gebräuchliche Bezeichnung für berührungslos arbeitende Schwingungsmessgeräte, die auf dem Prinzip des optischen Dopplereffekts beruhen. Träger der Messinformation ist hier vom Messobjekt zurück gestreutes Licht. Hervorzuheben ist die Eigenschaft, nur die Bewegungskomponente zu erfassen, die mit der Einfallrichtung des scharf gebündelten Laserstrahls zusammenfällt. Es handelt sich somit um einen streng einachsigen, punktförmigen Aufnehmer [11].

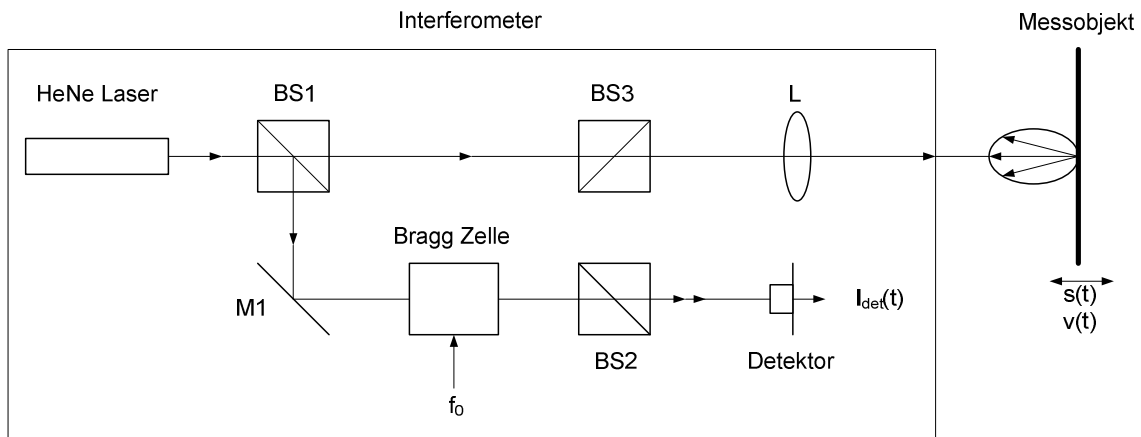


Abbildung 7: Schematischer Aufbau der interferometrischen Schwingungsmessung [3]

Im Interferometer wird ein kohärenter Lichtstrahl in Referenz- und Messstrahl aufgespalten. Während der Referenzstrahl innerhalb des Interferometers bleibt, wird der Messstrahl auf die Oberfläche des schwingenden Messobjekts gerichtet. Dort erfährt die elektromagnetische Welle auf Grund des Doppler-Effekts eine Phasen- bzw. Frequenzverschiebung, die nach der Überlagerung mit der Referenzwelle am Photodetektor das elektrische Dopplersignal erzeugt. Die zeitlichen Verläufe von momentaner Phase und Frequenz des Dopplersignals sind mit den Zeitsignalen der Schwingungskenngrößen  $s(t)$  und  $v(t)$  über die einfachen Beziehungen

$$\Delta\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} s(t) \quad (3-11)$$

und

$$\Delta f(t) = \frac{4}{\lambda} v(t) \quad (3-12)$$

verknüpft [11].

$\Delta f(t)$  Momentanwert der Frequenzverschiebung

$\Delta\varphi(t)$  Momentanwert der Phasenverschiebung

$v(t)$  Momentanwert der Geschwindigkeit

$s(t)$  Momentanwert des Schwingweges

Mit Hilfe bekannter digitaler Demodulations-Verfahren nach ISO 16063-11 [1] kann aus der Modulation des Doppler-Signals das Schwingensignal rekonstruiert werden. Da die exakt bekannte Laser-Wellenlänge  $\lambda$  als Maßverkörperung wirkt, können die Ergebnisse im Sinne einer Absolutmessung auf das internationale Einheitensystem (SI) zurückgeführt werden [11].

Die Wellenlänge des Laserlichtes besitzt eine sehr geringe Messunsicherheit, daraus ergeben sich für die elektrischen Ausgangssignale der Laseroptik  $\Delta f(t)$  und  $\Delta \varphi(t)$  ebenfalls sehr geringe Messunsicherheitsbeiträge. [3]

Laservibrometer mit analogem Signalausgang haben systembedingte Unsicherheitsbeiträge durch analoge Signalverarbeitung und Drift. Deshalb können diese nicht als Referenz-Laservibrometer zum Einsatz kommen. Durch den Einsatz digitaler Signalverarbeitung ist es möglich, das Dopplersignal durch rein mathematische Methoden mit höchster Präzision zu demodulieren und damit jegliche Drifterscheinungen zu eliminieren [3]. Dieses Verfahren wird in Referenz-Messsystemen unter anderem zur Primärkalibrierung eingesetzt und wird in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

## **4. Verfahren zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren**

### **4.1. Allgemeines**

Bei den zu kalibrierenden Sensoren handelt es sich um kapazitive Beschleunigungssensoren des Typs PJM-LN und Servo-Beschleunigungssensoren des Typs Q-Flex. Diese Sensortypen haben sich bei Messungen an Schienenfahrzeugen in den letzten Jahren bewährt und durchgesetzt.

Man erhält bei Messungen an Schienenfahrzeugen ein dynamisches Messsignal mit unterschiedlicher Frequenz und unterschiedlichen Beschleunigungsamplituden. Die Bandbreite der Messsignale ist bei eisenbahntechnischen Anwendungen üblicherweise größer als z.B. bei der speziellen Anwendung Crashtest in der Automobilindustrie.

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein solches Messsignal, bei dem die Vertikalbeschleunigung am Achslager des Radsatzes gemessen wurde. Abbildung 9 zeigt eine Kurzzeitspektralanalyse (Campbell Diagramm) dieses Messsignals.



## Verfahren zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren

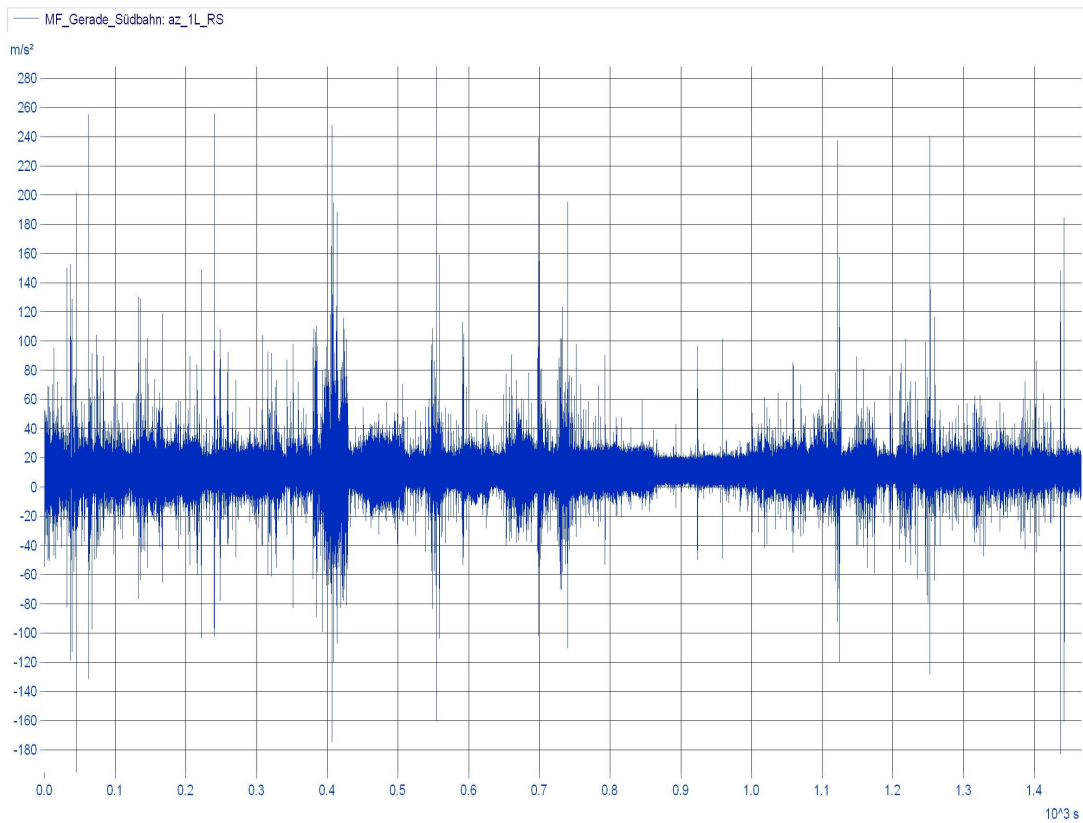


Abbildung 8: Messsignal - Vertikalbeschleunigung am Achslager des Radsatzes

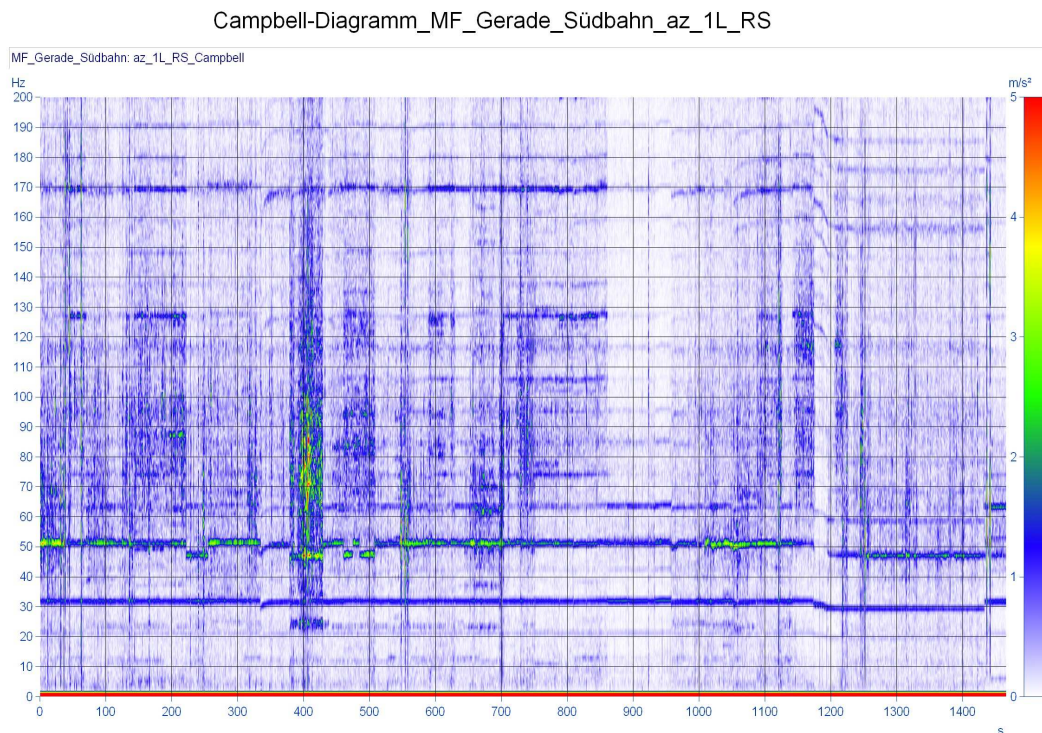


Abbildung 9: Campbell Diagramm der Vertikalbeschleunigungen am Achslager des Radsatzes

Aus den zuvor genannten Gründen ist für diese Anwendungen eine Kalibrierung mit unterschiedlichen Frequenzen zwischen 5 und 200 Hz und verschiedenen Beschleunigungsamplituden wichtig. Somit empfiehlt sich eine sinusförmige Kalibrierung der Beschleunigungssensoren. Da das Verfahren zur innerbetrieblichen Prüfmittelüberwachung bzw. zur Qualitätssicherung bei der Ermittlung von Messdaten eingesetzt wird, ist eine Sekundärkalibrierung, d.h. Kalibrierung durch Vergleich mit einem primärkalibrierten Referenzsensor ausreichend.

Nachfolgend wird die Primär- und Sekundär-Schwingungskalibrierung sowie die Stoßkalibrierung beschrieben.

### **4.2. Primär Schwingungskalibrierung mit einem Laser-Interferometer**

Laboratorien mit Primärkalibriersystemen für Beschleunigungen müssen ihr Referenzmessgerät auf das Nationale Normal der Beschleunigung rückführen wenn sie eine Akkreditierung anstreben oder bereits akkreditiert sind. Ausgenommen davon sind die Nationalen Metrologie-Institute.

In derartigen Systemen wird die physikalische Größe Beschleunigung mittels Laserinterferometrie basierend auf dem Dopplereffekt gemessen. Ein derartiges System wird im nachfolgenden Bild dargestellt [3]:



Abbildung 10: Primärkalibriersystem CS18P-HF [3]

Während in Sekundärsystemen ein hochwertiger, bei einem Nationalen Metrologieinstitut (NMI) kalibrierter, Beschleunigungssensor als Bezugsnormal eingesetzt wird, kommt bei Primärsystemen ein spezielles Referenz-Laser-Vibrometer zum Einsatz [3].

Abbildung 11 zeigt das Blockschaltbild einer Primärkalibriereinrichtung zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren. Dabei wird der Prüfling mit einem sinusförmigen Beschleunigungssignal angeregt, der ein elektrisches Signal abgibt. Das Referenz-Laservibrometer misst die auf den Prüfling wirkende Schwinggeschwindigkeit und gibt ebenfalls an seinem Ausgang das Signal  $v(t)$  ab. Über den Zusammenhang in Gleichung (3-1) kann auf die Beschleunigung geschlossen werden. Zusätzlich wird die anregende Beschleunigungsamplitude durch einen Regelkreis so weit wie möglich konstant gehalten [11].

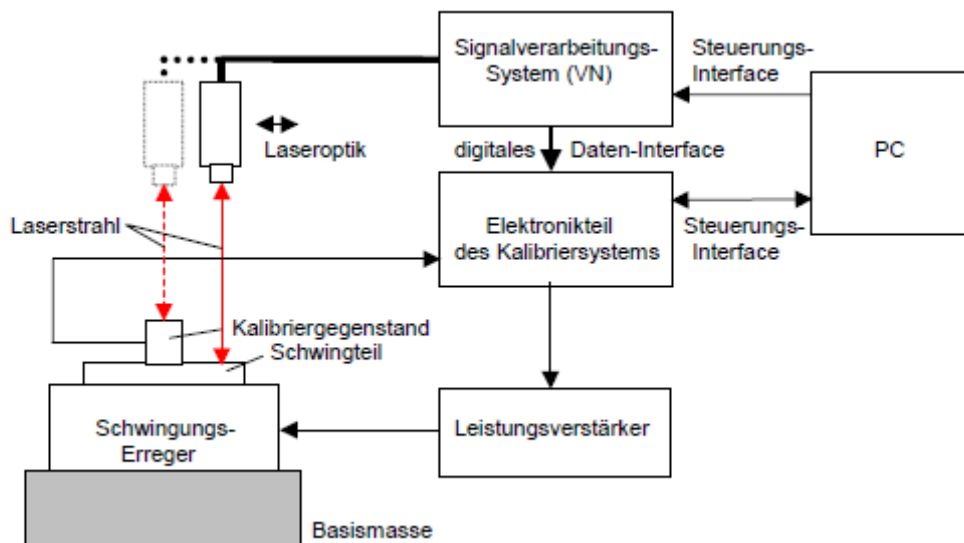


Abbildung 11: Blockschaltbild einer Bezugnormalmesseinrichtung (BNME) zur Primärkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern [11]

Ein Referenz-Laservibrometer muss den folgenden Forderungen entsprechen:

- Nutzung eines Heterodyn- oder Homodyn-Interferometers mit einer ausreichend hohen Bandbreite entsprechend der maximalen Dopplerfrequenz
- Einsatz eines Lasers mit entsprechender Genauigkeit und Stabilität der Wellenlänge (vorzugsweise HeNe – Laser oder ein anderer Typ mit physikalisch bestimmter Wellenlänge)
- Zur Dekodierung der Schwingungsgrößen  $s(t)$  oder  $v(t)$  aus den Dopplersignalen ist ein Verfahren zur digitalen Signalverarbeitung einzusetzen, das berechenbare und stabile Messunsicherheiten entsprechend ISO 16063-11 garantiert
- Das Referenz-Laservibrometer muss so gebaut sein, dass es einen Anschluss an das Nationale Normal z.B. des BEV oder der PTB ermöglicht
- Das Referenz-Laservibrometer muss ein Digital- Interface besitzen, um jegliche zusätzlichen Fehler bei der Analog-/ Digitalwandlung bzw. Digital-/ Analogwandlung auszuschließen.

Wenn ein Laservibrometer nicht den vorgenannten Anforderungen entspricht (z.B. weil ein analoges Demodulierungsverfahren eingesetzt wird oder weil nur ein

Analogausgang vorhanden ist) ist es wie ein normaler Schwingungsaufnehmer zu betrachten [3].

### **4.3. Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger mit Sinusanregung**

Für die Kalibrierung von Schwingungssensoren wird am häufigsten auf die Vergleichsmethode gemäß ISO 16063 Teil 21 zurückgegriffen. Diese Methode wird auch Sekundärkalibrierung genannt. Hierbei wird das zu prüfende System mit einem als Referenz-Standard dienenden Beschleunigungssensor verglichen. Der Referenz-Standard muss zuvor auf übergeordneter Ebene kalibriert worden sein, z. B. durch Primär-Kalibrierung bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt [3]. Bei diesem Verfahren wird zuerst eine feste mechanische Verbindung zwischen dem Prüfling und dem Referenz-Beschleunigungssensor hergestellt. Die beiden Sensoren werden dann mit einer sinusförmigen Beschleunigung angeregt und anschließend werden die Ausgangssignale der Messkette des Kalibriergegenstands und der Bezugnormalmesskette miteinander verglichen (siehe Abbildung 12). Die nachfolgende Abbildung zeigt die notwendigen Komponenten und das Prinzip der Vergleichskalibrierung.

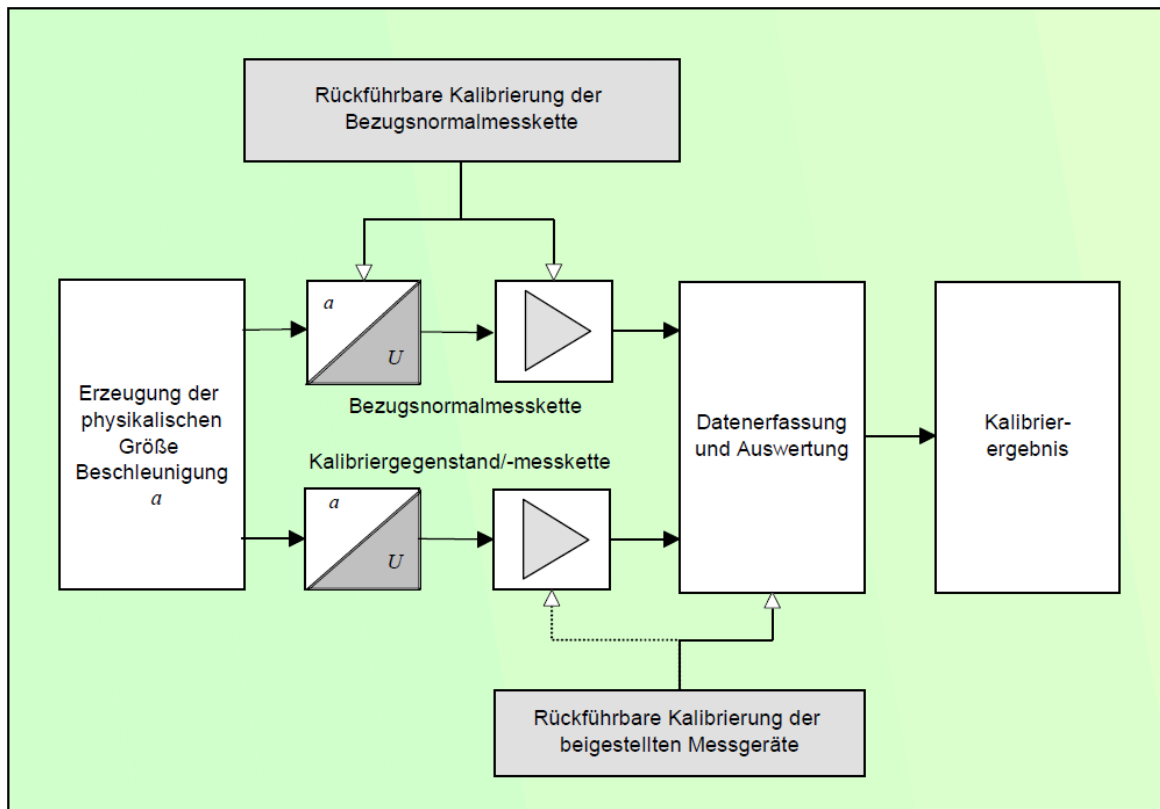


Abbildung 12: Prinzip der Vergleichskalibrierung [8]

Unter den auf dem Markt angebotenen Beschleunigungsaufnehmern gibt es nur einige wenige Typen, die auf Grund ihrer Langzeitstabilität, des nutzbaren Frequenzbereiches, der Linearität und anderer Parameter als Referenznormale geeignet sind. Laut [10] eignen sich aufgrund der oben genannten Anforderungen besonders Piezoresistive-, Piezoelektrische- oder Servo-Beschleunigungssensoren als Referenznormale.

Bei der Ankopplung der Referenzaufnehmer und der zu kalibrierenden Aufnehmer bestehen laut DIN ISO 16063-21 die folgenden Möglichkeiten:

- Rücken-an-Rücken-Anordnung
- Anordnung axial fluchtend an einer auf dem Schwingerreger montierten Vorrichtung
- Ankopplung des Prüflings an einem Schwingerreger mit eingebautem Referenznormal

Ankopplungsvorrichtungen dürfen jedoch nur bis zu einer Frequenz von bis zu 5.000 Hz benutzt werden. Über dieser Frequenz muss entweder die Rücken-an-Rücken-Anordnung oder die Variante mit eingebautem Referenznormal im Schwingungserreger.

#### **4.4. Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzaufnehmer mit stoßförmiger Anregung**

Für stoßförmige Kalibrierungen gibt es drei verschiedene Verfahren. Die Kalibrierung kann mittels

- Stoßpendelkalibrator
- Pneumatischen Stoßkalibrator oder
- Kugelfallkalibrator

erfolgen.

Die Unterschiede der Verfahren liegen

- im Kalibrierbereich hinsichtlich der Stoßparameter (Beschleunigungsspitzenwert und Stoßdauer),
- in der Einstellbarkeit der Stoßparameter (kontinuierliche oder diskrete Werte; eine äquidistante Verteilung der Stützstellen innerhalb eines Kalibrierbereiches ist nicht immer möglich),
- in der Montage von Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Kalibriergegenstand zueinander (Rücken-an-Rücken-Anordnung oder Befestigung der Referenzflächen an einer Zwischenadaption),
- in der Automatisierbarkeit,
- in der Standardabweichung der Einzelwerte einer Messreihe für einen Stoß-Übertragungskoeffizienten unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen,
- in dem benötigten Zeitaufwand für eine Kalibrierung [9].

Stellvertretend für die oben genannten Verfahren wird hier kurz der Stoßpendel – Kalibrator beschrieben.

Die wichtigsten Bestandteile des Stoßpendel-Kalibrators sind ein Ambosspendel aus einer Magnesium-Legierung und ein Hammerpendel wahlweise aus einer Aluminium- oder Stahllegierung (siehe Abbildung 13). Über eine Welle und geeignete Kugellager werden beide Pendel an ihrem oberen Ende drehbar mit der Kopfplatte eines steifen Gehäuses verbunden. Dabei besitzen die Lagerungspunkte der Kugellager einen so großen Abstand, dass eine ausreichende Steifigkeit in y-Richtung vorhanden ist und die Pendelbewegung dem Idealzustand eines einzigen (rotatorischen) Freiheitsgrades möglichst nahe kommt [9].

Das Ambosspendel dient als Trägerkörper für das Beschleunigungsaufnehmer-Normal und den zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmer. Durch Auslenken und Fallenlassen des Hammerpendels werden das Ambosspendel, und mit ihm die beiden Beschleunigungsaufnehmer, stoßförmig in Bewegung versetzt. Der entstehende Impuls sollte an Beschleunigungsaufnehmer-Normal und Kalibriergegenstand den gleichen Verlauf besitzen und frei von Störungen und Oberwellen sein. Um Impulse bis zu einer gewünschten Höhe zu erzeugen, ergibt sich daher die Form und das Material des Ambosspendels aus dem einzugehenden Kompromiss zwischen einer hohen Steifigkeit des Pendels und einem geringen Trägheitsmoment um die Drehachse [9].

Die Dauer, die Höhe und der Frequenzinhalt des Impulses werden durch das Verhältnis der Trägheitsmomente zwischen den Pendeln, die Auslenkung des Hammerpendels und die Härte, Stärke und Form eines Elastomers beeinflusst, das an entsprechender Stelle an das Ambosspendel geklebt wird und den Stoß bedämpft [9].



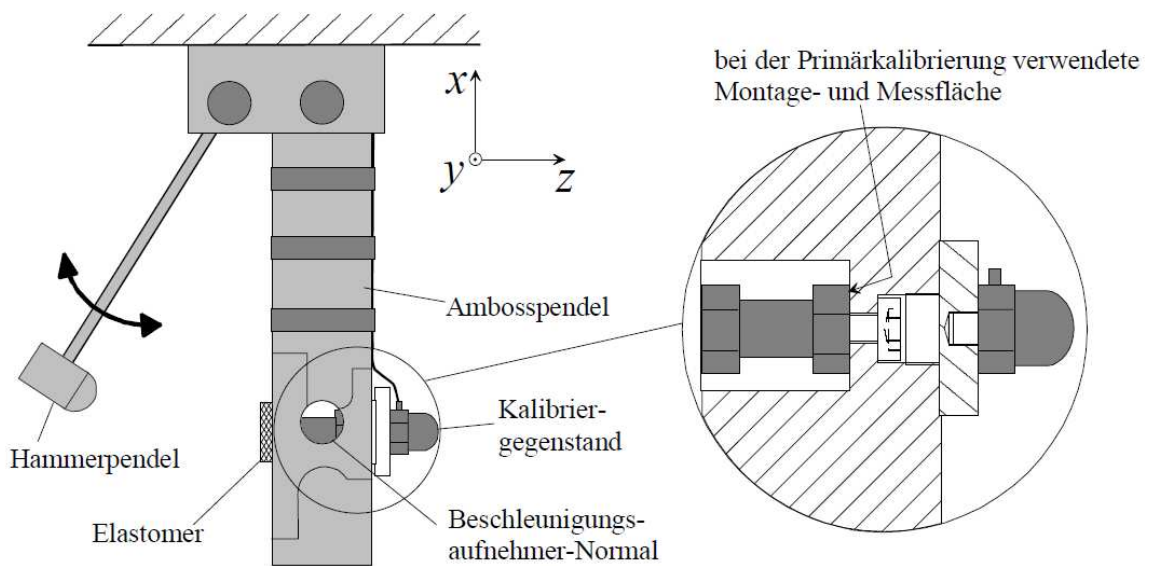


Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau des Stoßpendels [9]

Die Beschleunigungshöhe der Impulse kann durch Variation der Hammerpendel-Auslenkung auf einfache Weise verändert werden. Dabei verkürzt sich bei sonst konstanten Bedingungen die Impulsdauer mit zunehmender Impulshöhe (siehe nachfolgende Abbildung), während das Frequenzspektrum breiter wird. Außerdem wird bei gleich bleibenden Trägheitsmomenten und gleichem Beschleunigungsspitzenwert die Impulsdauer desto länger, je weicher das Elastomer gewählt wird [9].

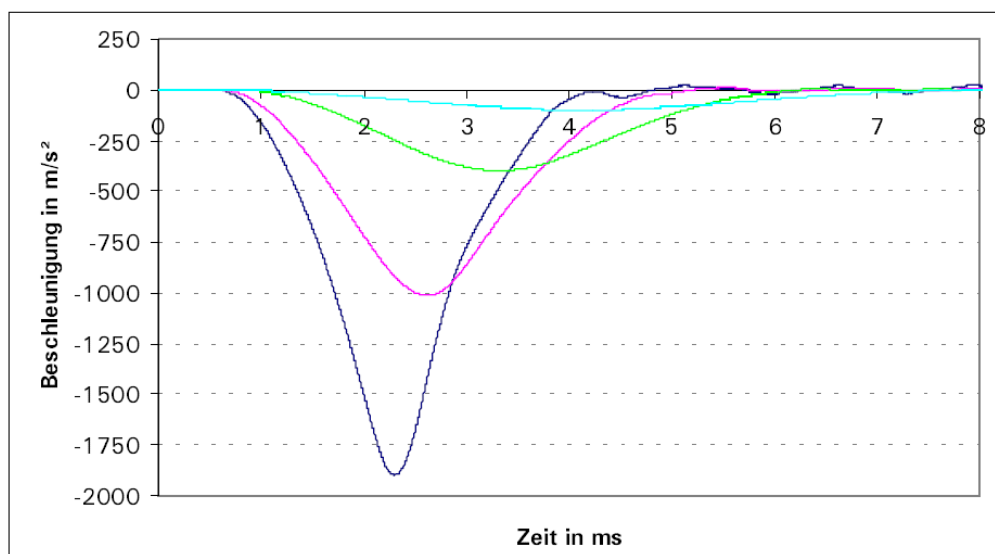


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen dem Beschleunigungsspitzenwert und der Dauer des Impulses bei Variation der Hammerpendelauslenkung [9]

Die obere Einsatzgrenze ist durch die mechanischen Eigenschaften des Ambosspendels gegeben. Sie liegt bei dem Beschleunigungsspitzenwert, bei dem Eigenfrequenzen des Ambosspendels innerhalb des Impuls-Frequenzspektrums in der Art angeregt werden, dass sich den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer störende Oberwellen überlagern. Bei bekannten Bauformen des Ambosspendels liegt die erste Eigenfrequenz der Biegeeigenschwingungsform entlang der x-Achse und in Stoßrichtung bei ca. 700 Hz bis 750 Hz. Für den Stoßpendel-Kalibrator resultiert eine obere Einsatzgrenze von ca. 2000 m/s<sup>2</sup> bei Gesamtmassen von Kalibriergegenstandsaufnehmer und Adaptern bis 100 g und von ca. 1000 m/s<sup>2</sup> bei Gesamtmassen von Kalibriergegenstandsaufnehmer und Adaptern bis 1000 g [9].

## 5. Grundlagen zur Bestimmung der Messunsicherheit

### 5.1. Allgemeines

Ziel einer Messung ist die Ermittlung des Wertes der Messgröße, das heißt, des Wertes der speziellen Größe die es zu messen gilt. Im Allgemeinen ist das Messergebnis lediglich eine Näherung oder ein Schätzwert des Wertes der Messgröße und somit nur dann vollständig, wenn es von einer Angabe der Messunsicherheit dieses Schätzwertes begleitet wird [26].

Um die Berechnung und Angabe der Messunsicherheit weltweit vergleichbar zu machen wurde der *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, kurz *GUM*, erarbeitet. Dieser hat sich nach seiner Publikation als internationaler Standard durchgesetzt. Die maßgebliche Deutsche Fassung dazu ist die ENV 13005:1999 zur Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen.

Für die Praxis zeichnet sich das Standard – GUM – Verfahren vor allem durch folgende Eigenschaften aus:

- Es liefert ein konsistentes, schrittweise Verfahren zur Bewertung und Angabe der Messunsicherheit
- Das Verfahren schließt die systematische Behandlung von nichtstatistischer Information ein
- Es eröffnet die Möglichkeit zu einer relativ einfachen computergestützten Messunsicherheitsberechnung und –budgetierung.

### 5.2. Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit nach GUM

Nachfolgend wird die Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit laut GUM zusammengefasst beschrieben. Dabei wird noch nicht näher auf die vorliegende Anwendung, der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren eingegangen. Die Anwendung des GUM auf die konkrete Aufgabe wird in Kapitel 5.3 behandelt.

Meist wird eine Messgröße  $Y$  nicht direkt gemessen, sondern aus mehreren Eingangsgrößen, die in einem funktionalen Zusammenhang stehen, berechnet.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (5-1)$$

Die einzelnen Eingangsgrößen  $X_i$  können wiederum ebenfalls als Messgrößen betrachtet werden und sind somit von anderen Größen abhängig. Die Modellfunktion  $f$  gibt an, wie die Werte der Ergebnisgröße  $Y$  aus den Werten der Eingangsgrößen  $X_i$  gewonnen werden. Im Folgenden werden alle Größen, deren Wert nicht genau angegeben werden kann, als Zufallsvariablen behandelt. Darunter fallen auch alle Einflussgrößen, die sich auf den Messwert auswirken können. Die Messung ergibt den besten Schätzwert  $y$  (=Messergebnis) der Messgröße  $Y$ , indem die besten Schätzwerte  $x_1, x_2, \dots, x_N$  der Ergebnisgrößen in den funktionalen Zusammenhang eingesetzt werden [7] [23]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (5-2)$$

Die Ursache für die Abweichung des Messergebnisses  $y$  vom wahren Wert der Messgröße  $Y$  ist eine große Anzahl von nicht korrekt erfassten Größen durch verschiedene Einflüsse. Diese Einflüsse können in zufällige und systematische Einflüsse unterschieden werden. Der größte Unterschied zwischen den beiden Einflussarten liegt darin, dass systematische Einflüsse im Gegensatz zu zufälligen Einflussarten korrigiert werden können. Sie können somit, sofern sie bekannt und quantifizierbar sind, messtechnisch erfasst werden und durch Anwendung einer Korrektur ausgeglichen werden. Die Größe von zufälligen Abweichungen ist nicht vorhersehbar, da die Messwerte selbst bei gleichen Bedingungen sich voneinander unterscheiden. Die Messunsicherheit bei zufälligen Einflüssen resultiert aus der ungenauen Kenntnis über Betrag und Vorzeichen der Abweichung. Bei den systematischen Einflüssen ergibt sich die Messunsicherheit aufgrund von Abweichungen bei der Korrektur und den unbekannt systematischen Messabweichungen.

Unsicherheitskomponenten können sich jedoch wie in [23] beschrieben für eine Messung als zufällig darstellen, während sie bei einer anderen Messung, bei der das Ergebnis der vorher genannten Messung als Eingangswert verwendet wird,

als systematischer Anteil angesehen werden muss. Daher wird im GUM nicht zwischen zufälligen und systematischen Unsicherheitsanteilen unterschieden sondern nach der Art der Ermittlung.

Die den Schätzwerten der Eingangsgrößen beizuordnende Messunsicherheit wird laut GUM nach der Ermittlungsmethode vom **Typ A** oder **Typ B** bestimmt. Die Typ A Methode zur Ermittlung der Standardmessunsicherheit ist die Methode, bei der die Messunsicherheit durch statistische Analyse einer Beobachtungsreihe ermittelt wird. In diesem Fall ist die Standardmessunsicherheit die empirische Standardabweichung des Mittelwertes, der durch ein Mittelungsverfahren oder eine geeignete Regressionsanalyse gewonnen wird. Die Methode B zur Ermittlung der Standardmessunsicherheit ist die Methode, bei dem die Messunsicherheit auf andere Weise als durch die statistische Analyse einer Beobachtungsreihe ermittelt wird. In diesem Fall basiert die Ermittlung auf anderen, messtechnisch fundierten Kenntnissen. Zu dieser Kategorie gehörende Werte sind [7]:

- Werte aus anderen, früher durchgeführten Messungen,
- Erfahrungen mit oder allgemeine Kenntnisse über das Verhalten und die Eigenschaften eingesetzter Materialien oder Geräte,
- Herstellerangaben,
- in Kalibrierscheinen oder anderen Bescheinigungen angegebene Werte,
- Messunsicherheiten, die Referenzwerten aus Handbüchern beigeordnet sind.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Methoden zur quantitativen Einschätzung der Eingangsgrößen.

Kenntnisse über die Parameter und (Eingangs-)Größen

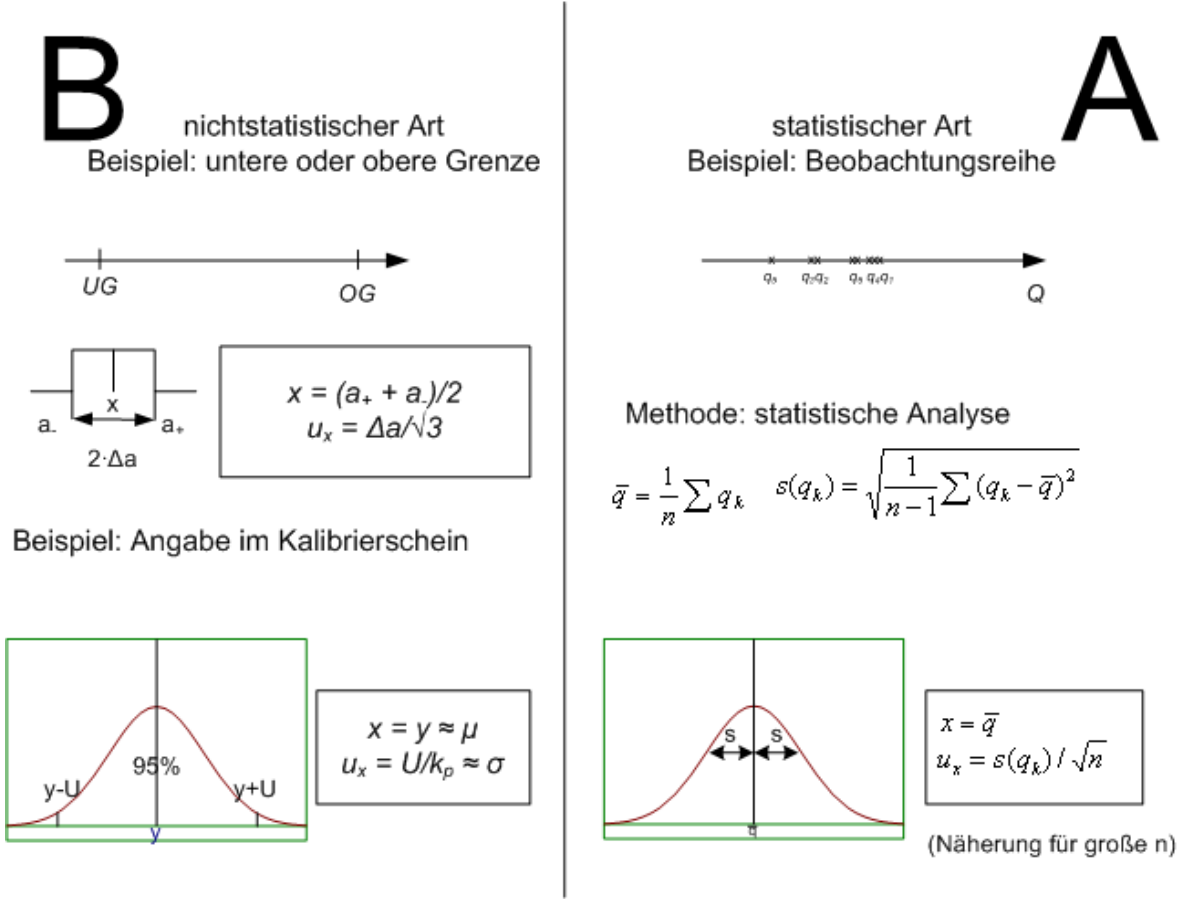


Abbildung 15: Methoden zur quantitativen Einschätzung der Eingangsgrößen [32]

Üblicherweise wird als Wahrscheinlichkeitsverteilung neben der (Gauß'schen) Normalverteilung häufig die Rechteck- und Dreieckverteilung verwendet. In Sonderfällen auch die Trapezverteilung oder die U – Verteilung. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die zuvor erwähnten Verteilungen mit Anwendungsbeispielen und Hinweisen zur Berechnung des Erwartungswertes und der beigeordneten Standardunsicherheit.

## Grundlagen zur Bestimmung der Messunsicherheit

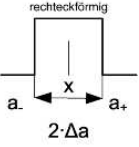
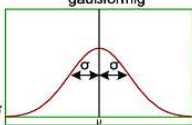
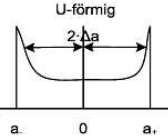
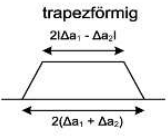
Kenntnisse über die Größe	Resultierende PDF	Erwartungswert	Standardunsicherheit	Beispiele
<p>Mögliche Werte der Größe sind im Intervall <math>[a_-; a_+]</math> enthalten</p>	 <p style="font-size: small; text-align: center;">rechteckförmig</p>	$x = \frac{a_+ + a_-}{2}$	$u_x = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fehlergrenzen</li> <li>- Digitalisierung</li> </ul>
<p>Größe wird beschrieben durch Erwartungswert <math>\mu</math> und Standardabweichung <math>\sigma</math></p>	 <p style="font-size: small; text-align: center;">gaußförmig</p>	$x = \mu$	$u_x = \sigma$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Angaben im Kalibrierschein</li> <li>- Ergebnisse einer statistischen Analyse</li> </ul>
<p>Größe ist harmonische Funktion <math>X = \Delta a \cdot \sin\Phi</math>; Phasenwinkel <math>\Phi</math> ist unbekannt im Intervall <math>[\pi; +\pi]</math></p>	 <p style="font-size: small; text-align: center;">U-förmig</p>	$x = 0$	$u_x = \frac{\Delta a}{\sqrt{2}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- elektromagnetische Schwingungen</li> </ul>
<p>Größe ist Summe/Differenz zweier messbarer Größen; Kenntnisse über die Größen <math>X_1, X_2</math> entsprechen rechteckförmigen Verteilungen</p>	 <p style="font-size: small; text-align: center;">trapezförmig</p>	$x = x_1 \pm x_2$ mit $\Delta a = \Delta a_1 + \Delta a_2$	$u_x = \frac{\Delta a}{\sqrt{6}} \sqrt{1 + \beta}$ mit $\beta = \frac{ \Delta a_1 - \Delta a_2 }{\Delta a_1 + \Delta a_2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ablesen einer Differenz aus zwei Werten mit begrenzter Auflösung</li> </ul>

Abbildung 16: Möglichkeiten zur Berechnung des Erwartungswertes und der Standardunsicherheit [32]

Die kombinierte Standardunsicherheit ist die positive Quadratwurzel aus der kombinierten Varianz  $u_c^2(y)$  und kennzeichnet die Streuung der Werte die der Messgröße  $Y$  zugeordnet werden können. Diese Form der kombinierten Standardunsicherheit gilt für statistisch unbekannte Eingangsgrößen, die statistisch unabhängig voneinander sind.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N (c_i \cdot u(x_i))^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (5-3)$$

Bei den Standardunsicherheiten  $u(x_i)$  handelt es sich um die Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen die zuvor nach Ermittlungsmethode A bzw. B ermittelt worden sind.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_i=x_i} \quad (5-4)$$

$c_i$  wird Empfindlichkeitskoeffizienten genannt und beschreibt, wie der Ausgangsschätzwert  $y$  bei Veränderung der Werte für die Eingangsschätzwerte  $x_1, x_2, \dots, x_n$  variiert und ist gleich der partiellen Ableitung der Modellfunktion nach  $X_i$  an der Stelle  $X_i = x_i$  [26].

Die kombinierte Standardunsicherheit wird, wie in Gleichung (5-3) bzw. (5-4) zu sehen ist durch Multiplikation der Standardunsicherheit  $u(x_i)$  mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten  $c_i$  berechnet. Dies ist jedoch nur unter der Voraussetzung zulässig, dass zwischen den Eingangsgrößen keine Korrelation vorliegt. Die in Gleichung (5-3) dargestellte Form der kombinierten Standardunsicherheit beruht zusätzlich auf einer Taylor-Reihenentwicklung erster Ordnung, d.h. sollten die Nichtlinearitäten von  $f$  signifikant sein, müssen Glieder höherer Ordnung der Taylor-Reihenentwicklung in den Ausdruck von Gleichung (5-3) einbezogen werden.

Sind die Standardunsicherheiten und die Empfindlichkeitskoeffizienten der einzelnen Eingangsgrößen bekannt, lassen sie sich laut GUM durch das „Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz“ zur kombinierten Standardunsicherheit des Messergebnisses zusammenfassen (siehe Gleichung (5-5)).

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (5-5)$$

Soll ein Wertintervall für das Messergebnis angegeben werden, das den wahren Wert der gemessenen Größe mit hoher Wahrscheinlichkeit überdeckt, kann aus der kombinierten Standardunsicherheit  $u(y)$  durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor  $k$  die erweiterte Messunsicherheit  $U$  berechnet werden [23].



Diese Vorgehensweise beschreibt wie gesagt nur die Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit mit unkorrelierten Eingangsgrößen. Für den Fall, dass zwei oder mehrere Eingangsgrößen in Beziehung zueinander stehen sind die obigen Gleichungen ungültig. Korrelieren einige Eingangsgrößen  $X_i$ , so müssen die Korrelationen berücksichtigt werden.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \quad (5-6)$$

Wenn die Eingangsgrößen nicht als unkorreliert angenommen werden können, lassen sich die Korrelation laut GUM selbst dadurch vermeiden, dass die gemeinsamen Einflüsse als zusätzliche unabhängige Eingangsgrößen eingeführt werden.

Auf die Rechtfertigung für die Verwendung und die Herleitung des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes wird hier nicht näher eingegangen sondern nur auf Dokument [26] verwiesen, wo in Anhang E die Motive für die Anwendung nachgelesen werden können.

In der nachfolgenden Abbildung ist nochmals der Ablauf zur Ermittlung des vollständigen Messergebnisses graphisch dargestellt.

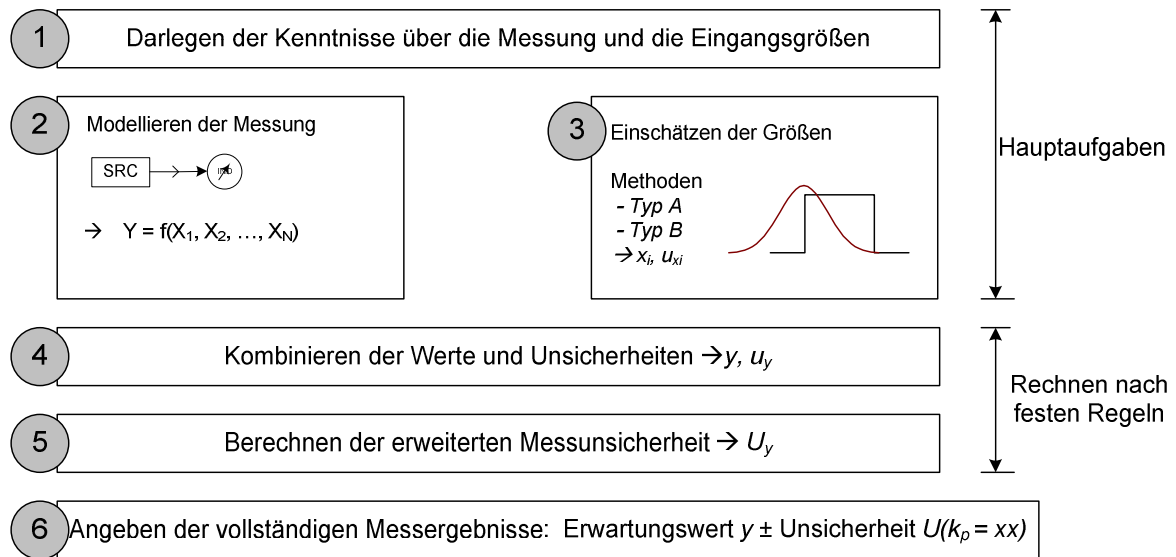


Abbildung 17: Graphische Darstellung des Ablaufs zur Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit nach GUM [31]

Der GUM steht als allgemeiner Leitfaden zur Verfügung, um für alle Bereiche der Messtechnik eine gemeinsame Richtung für die Ermittlung der Messunsicherheit vorzugeben und stellt daher auch keine gültige Norm dar. Das Erstellen von Normen und Richtlinien wurde den Fachrichtungen der Akkreditierungsstellen bzw. den nationalen und internationalen Organisationen für Normung überlassen. Im speziellen Fall der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren gibt es gültige Normen nach der ISO 16063 Reihe. Für den Fall der Schwingungskalibrierung nach dem Vergleichsverfahren von Beschleunigungssensoren ist die ISO 16063-21 verfasst und in ihrer letzten gültigen Fassung anzuwenden.

### 5.3. Modell zur sinusförmigen Vergleichskalibrierung von Beschleunigungssensoren

In diesem Abschnitt wird die Allgemeine Vorgehensweise zur Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit des GUM speziell auf die Situation zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren angepasst. Als Referenz dazu dient neben dem GUM auch die ISO 16063-21. Nachfolgend wird die Ableitung zur Ermittlung der Modellfunktion in Anlehnung an

die ÖNORM ENV 13005 [26] beschrieben. Die Vorgangsweise für die Erstellung des Messunsicherheitsbudgets und die Ermittlung der Messunsicherheit basiert auf der oben genannten ISO 16032-21 [5].

Ziel der Kalibrierung ist die Ermittlung des Übertragungskoeffizienten ( $S$  - Sensitivitätskoeffizient) des Prüflings. Der Übertragungskoeffizient beschreibt den Zusammenhang zwischen der elektrischen Ausgangsgröße und einer spezifizierten physikalischen Eigenschaft des Aufnehmers. Je nach Messprinzip liefert der Sensor als elektrische Ausgangsgröße  $X$  z.B. eine Ladungsverteilung oder elektrische Spannung proportional zur Messgröße.

Zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten des Prüflings werden Referenzsensor und Prüfling mit einer Beschleunigung  $a(t)$  angeregt. Der Ausgang der Messkette der Referenz und der des Prüflings werden dann miteinander verglichen. Der Übertragungskoeffizient wird somit aus dem Verhältnis zwischen der gemessenen Ausgangsgröße  $X_{II}$  der Kalibriermesskette und der gemessenen Ausgangsgröße  $X_I$  (Spannung des Referenzsensors) der Referenzmesskette ermittelt.

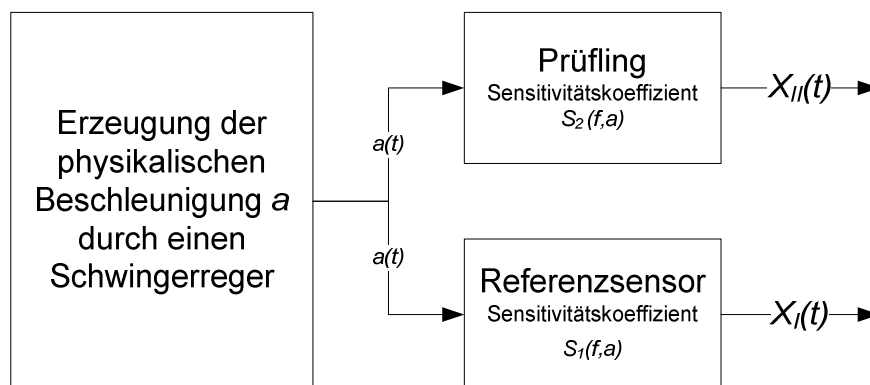


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen angeregter Beschleunigung  $a$ , elektrische Ausgangsgröße des Prüflings  $X_{II}(t)$  und des Referenzsensor  $X_I(t)$

Die Beschleunigung ergibt sich aus der gemessenen Ausgangsspannung der Referenzmesskette und dem Betrag des Übertragungskoeffizienten der Messkette

$S_1$ . Da der Prüfling und der Referenzsensor mit derselben Beschleunigung  $a(t)$  angeregt werden gilt der folgende Zusammenhang:

$$a = \frac{X_I}{S_1} = \frac{X_2}{S_2} \quad (5-7)$$

Der Übertragungskoeffizient  $S_2$  des Prüflings wird somit nach der folgenden Gleichung ermittelt

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{X_{II}}{X_I} \quad (5-8)$$

Um eine unnötige Anzahl von Korrelationen zwischen Eingangsgrößen zu vermeiden, wird in [21] vorgeschlagen das Verhältnis  $V_R$  zwischen der elektr. Ausgangsgröße des Referenzsensors ( $X_I$ ) und der des Prüflings ( $X_{II}$ ) einzuführen.

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{X_{II}}{X_I} = S_1 \cdot V_R \quad (5-9)$$

$S_1$	Betrag des Übertragungskoeffizienten der Referenzmesskette
$X_I$	Anzeige des Messverstärkers des Referenzsensors (elektr. Ausgangsgröße)
$S_2$	Betrag des Übertragungskoeffizienten des zu kalibrierenden Aufnehmers
$X_{II}$	Anzeige des Messverstärkers des zu kalibrierenden Aufnehmers (elektr. Ausgangsgröße)
$V_R$	Verhältnis zwischen der elektrischen Ausgangsgröße des Referenzsensors $X_I$ und der des Prüflings $X_{II}$

Der Übertragungskoeffizient  $S_2$  hängt jedoch nicht nur von den Eingangsgrößen  $S_1$  und  $V_R$  ab sondern von einer Vielzahl zusätzlicher verschiedener Eingangsgrößen  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Grundsätzlich ist für unkorrelierte Eingangsgrößen als Modellfunktion entweder das Summen- oder Produktmodell anwendbar. In diesem Fall wird die Modellfunktion  $f$  als Produkt oder Quotient von Eingangsgrößen ausgedrückt. Daher gilt der folgende Ausdruck

$$y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (5-10)$$

wobei  $c$  eine Konstante und  $p_i$  eine Ganzzahl ist. Daraus ergibt sich aus der allgemeinen Form des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes (Gleichung (5-3)) und Gleichung (5-10) der folgende Ausdruck [21]:

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{p_i^2 \cdot u^2(x_i)}{x_i^2}} \quad (5-11)$$

Die Taylorreihenentwicklung erster Ordnung von Gleichung (5-1) welche in (5-3) resultiert ist wie bereits erwähnt nur dann zulässig, wenn die Modellfunktion  $f$  hinreichend linear bezüglich der Variation der Eingangsgrößen  $x_i$  innerhalb des Bereichs, welcher von den Unsicherheiten  $u(x_i)$  gekennzeichnet wird. Dies ist jedoch nicht der Fall wenn eine Einflussgröße als Eingangsgrößen  $X_i$  betrachtet wird. Um dieses Problem zu bewältigen werden die relativen Fehler  $e_i$  und damit einhergehend die Einflussfaktoren  $K_i$  eingeführt, da der Zusammenhang zwischen der Ergebnisgröße und allen Einflussfaktoren nahezu konstant ist ( $e_i \ll 1$ ). Somit werden wie in [21] vorgeschlagen nicht die einzelnen Abweichungen, sondern die Faktoren als Eingangsgrößen angesehen [21] [23].

$$K_i = (1 - e_i) \quad (5-12)$$

Der Term  $e$  („error“) wird in der Literatur als Effekt einer bestimmten Einflussgröße beschrieben und ist definiert als relative Messabweichung, die durch die Einflussgrößen verursacht werden. Die relativen Messabweichungen  $e_i$  sind häufig eine Funktion mehrerer Größen. So hängt z.B. die Messabweichungskomponente, die infolge von Querbeschleunigungen des Schwingungserregers entsteht, von der Querempfindlichkeit des Aufnehmers und der Amplitude der Querbeschleunigung ab (siehe auch Kapitel 7.3.6) [21] [23].

Nach [21] wird noch abhängig davon, ob die Einflussgrößen auf das Bezugsnormale, den Kalibriergegenstand oder beide wirkt zwischen den folgenden Einflussfaktoren unterschieden:

Einflussfaktor auf das Bezugsnormal  $K_i = (1+e_{iBN})$

Einflussfaktor auf den Kalibriergegenstand  $K_i = (1-e_{iKG})$

Einflussfaktor auf das Bezugsnormal und  
den Kalibriergegenstand  $K_i = (1-e_{iBN}+e_{iKG})$

Aus den angestellten Überlegungen ergibt sich für den vorliegenden Fall der indirekten Messung der Sensitivität  $S_2$  des Prüflings der folgende Ausdruck:

$$S_2 = S_1 V_R \prod_{i=1}^N K_i \quad (5-13)$$

In der nachfolgenden Tabelle ist die vollständige Gleichung für die Ermittlung des Sensitivitätskoeffizienten  $S_2$  der Prüflinge mit einer Beschreibung der Einflussfaktoren dargestellt.

$S_2 = S_1 \cdot V_R \cdot K_{1,BN} \cdot K_{V_1} \cdot K_{V_2} \cdot K_T \cdot K_{QD} \cdot K_{BD} \cdot K_{St} \cdot K_O \cdot K_{Pos} \cdot K_{lin,R} \cdot K_{lin,V} \cdot K_{Mg} \cdot K_{RE}$		
$S_2$	Ergebnis, Übertragungskoeffizient des Kalibriergegenstands	Ergebnisgröße
$S_1$	Übertragungskoeffizient des Referenzsensors	Bestimmungsgrößen
$V_R = X_{II}/X_I$	Spannungsverhältnis der Verstärkerausgänge von KG-Verstärker und Bezugsnormal-Verstärker	
$K_{I,BN}$	Einflussfaktor zeitliche Instabilität des Bezugsnormal	Einflussgrößen
$K_{V_1}$	Einflussfaktor zeitliche Instabilität des Bezugsnormal - Verstärkers	
$K_{V_2}$	Einflussfaktor zeitliche Instabilität des Kalibriergegenstands - Verstärkers	
$K_T$	Einflussfaktor Temperatur der Sensoren	
$K_{QD}$	Einflussfaktor Querbewegung	
$K_{BD}$	Einflussfaktor Basisdehnung	
$K_{St}$	Einflussfaktor Signalstörung	
$K_O$	Einfluss von Oberwellen	
$K_{Pos}$	Einflussfaktor Ankopplungsparameter (Kabel, Drehmoment)	
$K_{lin,R}$	Einfluss von Nichtlinearitäten des Referenzempfängers auf die Messung von $V_R$	
$K_{lin,V}$	Einfluss von Nichtlinearitäten des Signalverstärkers auf die Messung von $V_R$	
$K_{Mg}$	Einfluss des Magnetfeldes des Schwingungserregers auf die Messung	
$K_{RE}$	Einfluss von Resteffekten auf die Messung von $V_R$ (z.B. zufallsbestimmte Effekte bei wiederholten Messungen)	

Abbildung 19: Modellfunktion mit allen Eingangsgrößen

Durch Kombination von Gleichung (5-11) und Gleichung (5-13) erhalten wir für die relative Unsicherheit:

$$u_{c,rel}(S_2) = \frac{u_c(S_2)}{S_2} = \sqrt{\left(\frac{u(S_1)}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{u(V_R)}{V_R}\right)^2 + \sum_{i=3}^N (u(K_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{u_{rel,i} C_i}{x_i}\right)^2} \quad (5-14)$$

Nach diesen Angaben wird in weiterer Folge in Kapitel 7.2 das Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung aufgestellt und daraus die relative Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren in Kapitel 7.4 berechnet.

Sollten Korrelationen zwischen Eingangsgrößen nicht verhindert werden so gilt für die relative Unsicherheit:

$$u_{c,rel}(S_2) = \frac{u_c(S_2)}{S_2} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_{rel,i}^2(S_2) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u_{rel}(x_i, x_j)} \quad (5-15)$$

Dabei bedeuten  $x_i$  die Schätzwerte der Eingangsgrößen und  $u(x_i, x_j)$  den Schätzwert der Kovarianzen von  $x_i$  und  $x_j$ .



## **6. System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren**

Im diesem Kapitel wird das bestehende System zur Kalibrierung von Beschleunigungssensoren und alle relevanten Komponenten detailliert beschrieben. Da keine Informationen hinsichtlich Klirrfaktor und Querbewegungen des verwendeten Schwingerregers zur Verfügung standen wurden Messungen durchgeführt mit denen diese Werte ermittelt werden konnten. Die Ergebnisse dieser Messungen sowie der Messaufbau und Versuchsumfang sind in diesem Kapitel dargestellt.

### **6.1. Konzept der Kalibriereinrichtung**

Die Kalibriereinrichtung für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren ist wie nachfolgend gezeigt aufgebaut.

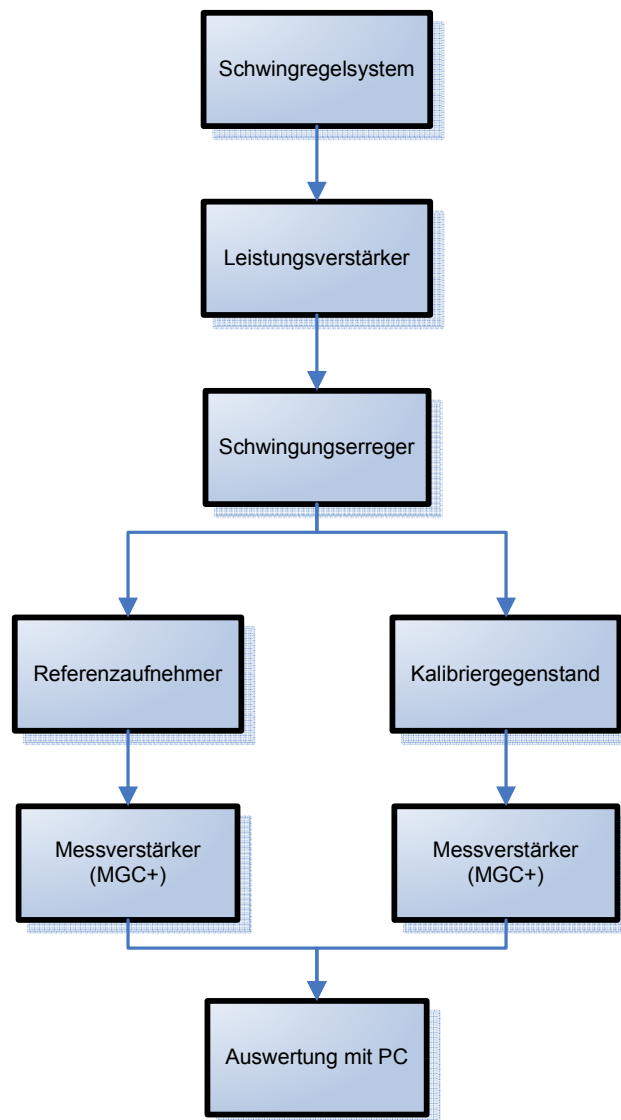


Abbildung 20: Bestandteile der Kalibriereinrichtung

Ein Sinusgenerator stellt eine definierte Beschleunigungsamplitude bei variabler Frequenz zur Verfügung, die über einen Leistungsverstärker in Form einer sinusförmigen Wechselspannung an einen Schwingererreger weitergegeben wird. Eine aktive Regelung sorgt dafür, dass die vorgegebenen Beschleunigungswerte auch bei unterschiedlichen Signalfrequenzen erreicht werden [15].

Beim Schwingererger handelt sich dabei um einen Luft gekühlten Shaker der Fa. Data Physics. Über den Schwingungserreger sind wenig genaue Informationen verfügbar. Daher mussten für die Ermittlung der Querempfindlichkeit einige Test durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind Kapitel 6.3.2 zu entnehmen.

In den nachfolgenden Punkten werden die wichtigsten Komponenten des Kalibriersystems beschrieben.

## **6.2. Schwingregelsystem**

Als Schwingregelsystem wird das VibPilot24 VP8 System von m+p verwendet. Das System beherrscht die beiden Grundanregungsarten Rauschen und Sinus wobei für die Kalibrierung die Sinus – Regelung verwendet wird. Im Regelkreis wird ein zuvor definiertes Sinussignal an den Prüfling angelegt, auf das dann nach Testablaufplan in Echtzeit geregelt wird. Das Sinussignal umfasst die für die Kalibrierung festgelegten Frequenzen und Beschleunigungsamplituden. Diese wurden in Zusammenarbeit mit Auftraggeber, der Fa. PJ Messtechnik GmbH, festgelegt. Die festgelegten Frequenzen und Beschleunigungsamplituden sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Frequenz $f$ (Hz)	Beschleunigung $a$ (m/s <sup>2</sup> )
5	5
8	10
16	50
40	50
60	50
80*	50*
100	50
120	50
140	50
160	50
200	50
80	10
80	20
80	30
80	50
80	80

Tabelle 3: Frequenzen und Beschleunigungsamplituden für die Sinusregelung

## 6.3. Schwingungserreger

### 6.3.1. Aufbau des Schwingerregers

Im Detail gibt es eine große Fülle von individuellen Lösungen des Aufbaus eines elektrodynamischen Schwingerregers. Im Prinzip ist ein Schwingerreger jedoch ein Lautsprecher mit Topfmagnet und eingebetteter Schwingspule. Ein elektrodynamischer Schwingerreger besteht prinzipiell aus folgenden Baugruppen [15]:

- das Schwingsystem
- das Magnetsystem

## System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

- das Führungssystem
- das Kühlsystem (optional)

Wichtige Kriterien für den Schwingkopf sind die Höhe der ersten Hauptresonanz und die Höhe der Durchbiegung der Aufspannfläche im Frequenzbereich.

Es liegt nahe, dass bei Prüfobjekten, deren Massenmittelpunkt nicht mit der Mittelachse des Schwingerregers übereinstimmt, Querkräfte erzeugt werden, die das Führungssystem aufnehmen muss. Werden diese Querkräfte zu groß, können zum einen zu berücksichtigende Querbeschleunigungen entstehen, zum anderen die Signalform des Ausgangssignals verzerrt werden [15]. Zur Quantifizierung dieses Einflusses wurden Messungen durchgeführt – siehe Kapitel 6.3.2.

Beim Schwingungserreger handelt es sich um das Modell von Data Physics GW-V2634 DSA5-25k. Die Funktionsweise der Lagerung wird nachfolgend kurz beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung ist leider nicht möglich da der Fa. Data Physics zugesichert wurde keine technischen Details an Dritte weiter zu geben.

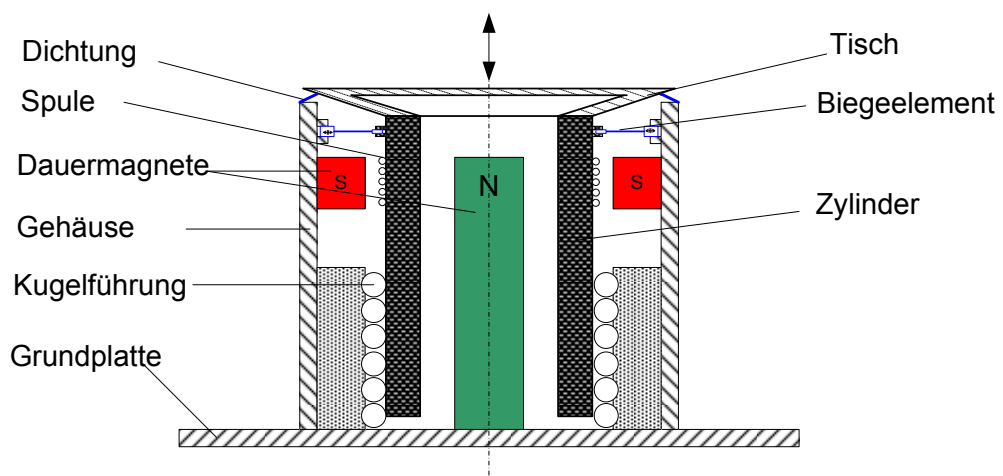


Abbildung 21: Prinzipieller Aufbau eines Schwingerregers

Das Biegeelement (Abbildung 22) gibt dem Tisch die nötige Stabilität in radialer Richtung. Es erlaubt aber gleichzeitig einen großen Weg in Arbeitsrichtung und zusätzlich arbeitet sie als eine Art Rückholfeder. Bei der Konstruktion wurde darauf Wert gelegt, dass die Baugruppe keine unerwünschten Verformungen oder Schwingungen erzeugt.

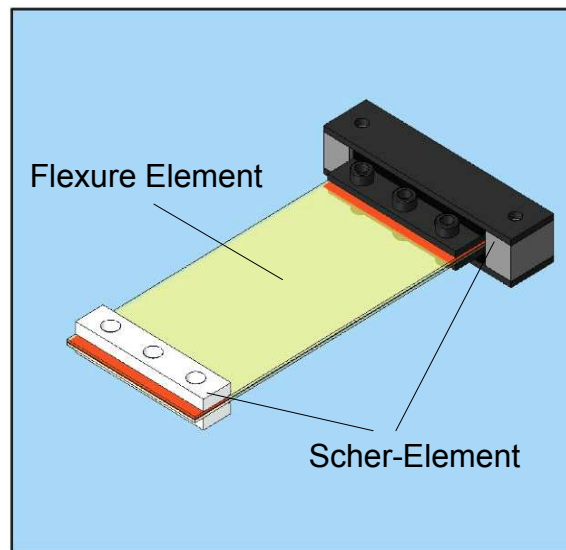


Abbildung 22: Biegeelement

Das Flexure Element ist das elastische Element des Systems, wobei aber keine Verformung in Längsrichtung möglich ist. Die Scher-Elemente besitzen die Freiheitsgrade um die Längenänderung zwischen dem Zylinder und dem Tisch beim Hub auszugleichen.

Das Scher-Element besteht aus zwei Stahlplatten mit einem vulkanisierten Gummi dazwischen. Das Flexure Element ist eine Sandwich Konstruktion bestehend aus zwei Laminatstücken und einer Plastikbeilage. Diese werden durch ein spezielles Silikon miteinander verklebt.

Insgesamt sind acht Biegeelemente rund um den Tisch gleichmäßig verteilt. Diese sind mit hochfesten Schrauben am Tisch befestigt. Die Lagerung des Zylinders

erfolgt über eine Kugelführung. Die nachfolgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schwingerregers.

### 6.3.2. Ermittlung der Quer- und Taumelbewegung des Shakers

#### 6.3.2.1. Einfluss der Querbeschleunigung auf das Kalibrierergebnis

Bei realen Beschleunigungssensoren weicht die Richtung der größten Beschleunigungsempfindlichkeit immer etwas von der nominellen Messrichtung ab. Daher geben sie nicht nur ein Signal ab, wenn sie in Richtung ihrer nominellen Messachse, sondern auch wenn sie quer dazu beschleunigt werden. Dieser normalerweise unerwünschte Effekt wird als Querrichtungsempfindlichkeit oder Querbeschleunigungsempfindlichkeit bezeichnet. Damit kann der Sensor eine in Messrichtung (= nominelle Achse) vorliegende Beschleunigung vortäuschen, obwohl in dieser Richtung keine Beschleunigung vorhanden ist. Die Ursache liegt in nicht vermeidbaren Fertigungstoleranzen, die durch Fehlausrichtungen von Komponenten innerhalb des Sensors und bei piezoelektrischen Sensoren zusätzlich noch durch Polarisationsfehler der piezoelektrischen Elemente entstehen [16].

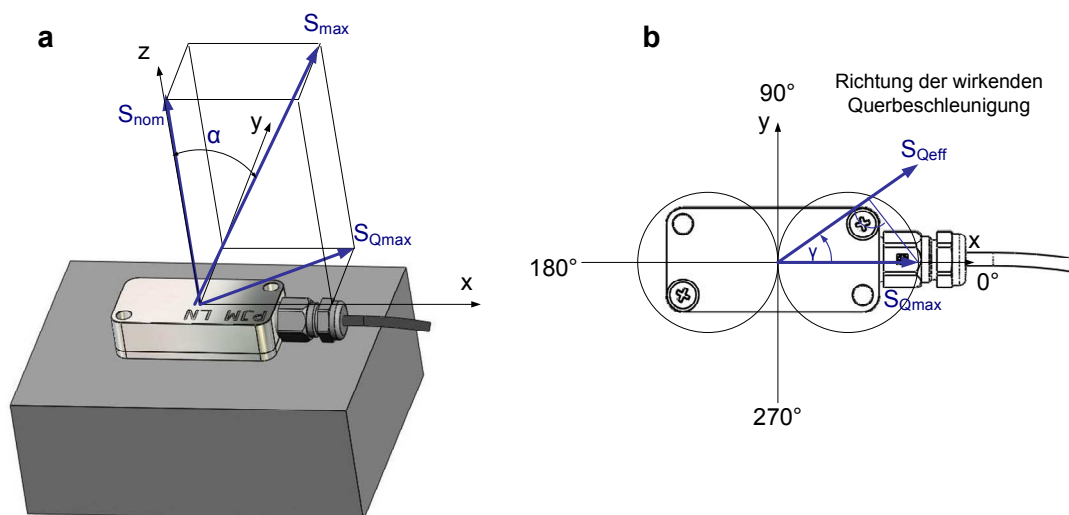


Abbildung 23: Vektorielle Darstellung **a** des Übertragungsverhaltens von Beschleunigungssensoren, **b** der effektiven Querbeschleunigungsempfindlichkeit [16]

$S_{max}$  ist der Vektor der größten Empfindlichkeit (Sensitivität) des Beschleunigungssensors. Er lässt sich in zwei Komponenten zerlegen: in den Vektor  $S_{nom}$ , der in die (nominelle) Messrichtung zeigt und in den Vektor  $S_{Qmax}$ , der senkrecht auf  $S_{nom}$  steht [16].

$$|S_{Nom}| = S = |S_{max}| * \cos \alpha \quad (6-1)$$

$$|S_{Qmax}| = S_{Qmax} = |S_{max}| * \sin \alpha \quad (6-2)$$

Der Betrag des Vektors  $S_{nom}$  wird als Übertragungskoeffizient oder Empfindlichkeit (engl. sensitivity S) des Sensors bezeichnet. Er gibt das Verhältnis der Ausgangsgröße des Beschleunigungssensors zur Beschleunigung in Messrichtung wieder. Entsprechend gibt der Betrag des Vektors  $S_{Qmax}$  das Verhältnis der Sensor-Ausgangsgröße zu einer Beschleunigung senkrecht zur Messachse wieder, wenn die auftretende Querbeschleunigung mit der Richtung der größten Querbeschleunigungsempfindlichkeit übereinstimmt. Die maximale Querbeschleunigungsempfindlichkeit wird häufig auf den Übertragungskoeffizienten S bezogen und in Prozent angegeben [16].

$$S_{\%Qmax} = \frac{S_{Qmax}}{S} * 100\% \quad (6-3)$$

Vorhergehend wurde die max. Querbeschleunigungsempfindlichkeit bestimmt. Diese besitzt ein Sensor aber nur, wenn die wirkende Querbeschleunigung mit der Richtung der max. Querbeschleunigungsempfindlichkeit übereinstimmt. Verlaufen die max. Querbeschleunigungsempfindlichkeit und die wirkende Querbeschleunigung in unterschiedliche Richtungen, so ist die tatsächliche (effektive) Querbeschleunigungsempfindlichkeit des Sensors geringer [16].

Die effektive Querbeschleunigungsempfindlichkeit ist dabei abhängig vom Winkel  $\gamma$  (siehe Abbildung 23).  $\gamma$  liegt zwischen der Richtung der wirkenden Querbeschleunigung und der Richtung der max. Querbeschleunigungsempfindlichkeit.

$$S_{Qeff} = S_{Qmax} * \cos \gamma \quad (6-4)$$

$$S_{\%Qeff} = S_{\%Qmax} * \cos \gamma \quad (6-5)$$



## System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

In der nachfolgenden Abbildung wird die effektive Querbeschleunigungsempfindlichkeit als Funktion des Winkels  $\gamma$  zwischen 0 und 360° betrachtet.

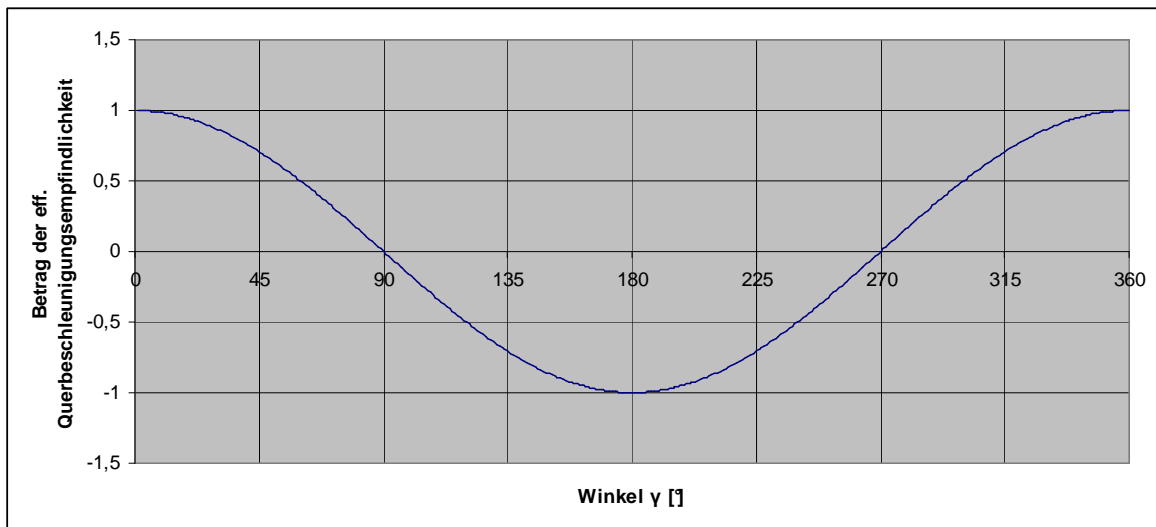


Abbildung 24: Effektive Querbeschleunigungsempfindlichkeit als Funktion des Winkels  $\gamma$ , [23]

Wird ein Beschleunigungsaufnehmer an die Anschlussplatte des Shakers montiert, so gibt er in Abhängigkeit von der vorliegenden Querbeschleunigung in x- und y- Richtung und in Abhängigkeit in welche Richtung die größte (Quer-) Beschleunigungsempfindlichkeit des Aufnehmers zeigt, eine Beschleunigung aus, die von der tatsächlich in z-Richtung vorliegenden abweicht. Der Sensor gibt die in nachstehender Formel beschriebene Beschleunigung aus.

$$a_{z,Anz} = a_z + S_{\%Qeff} * a_{Qmax} = a_z + S_{\%Qmax} * \cos \gamma * \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (6-6)$$

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass die Beschleunigung des Aufnehmers durch die Querbeschleunigungsempfindlichkeit vom Winkel  $\gamma$  abhängig ist.

Da die Richtung der Querbeschleunigungsempfindlichkeit der Referenzsensoren und der Prüflinge nicht bekannt ist, muss die max.

System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem  
Vergleichsverfahren

Querbesehleunigungsempfindlichkeit für den Anteil am Messunsichertheitsbudget  
berücksichtigt werden.

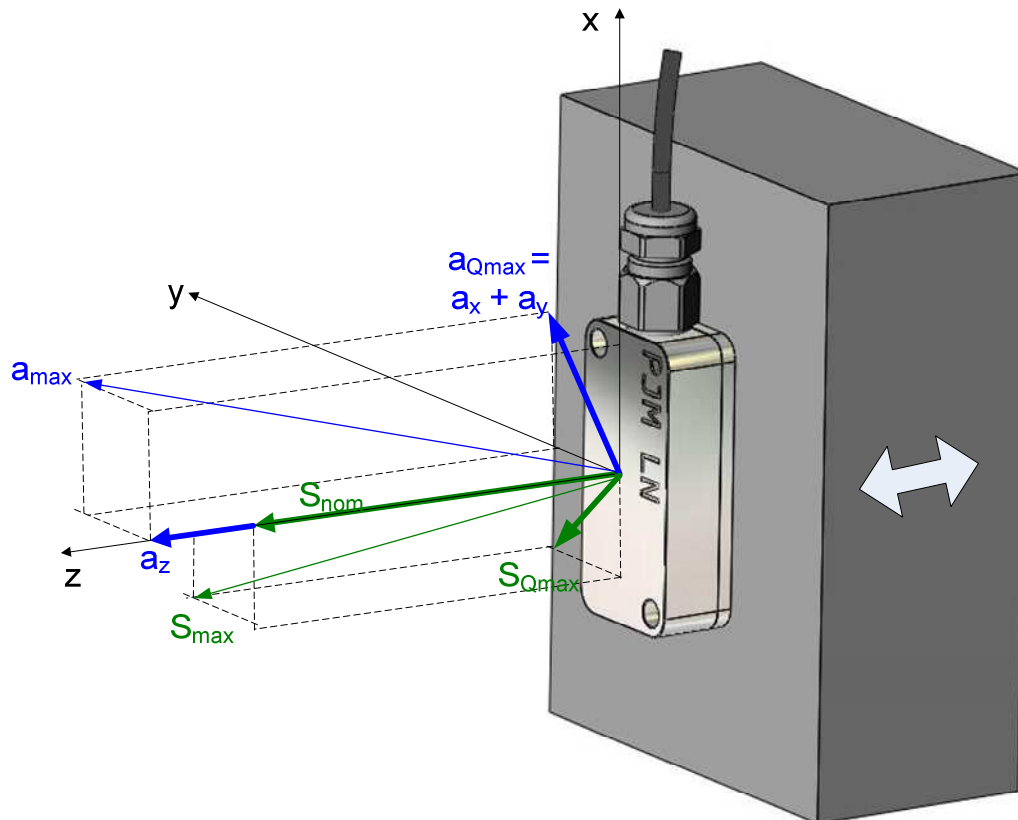


Abbildung 25: Darstellung der vorliegenden Beschleunigungen und des Übertragungsverhaltens bei der Kalibrierung [23]

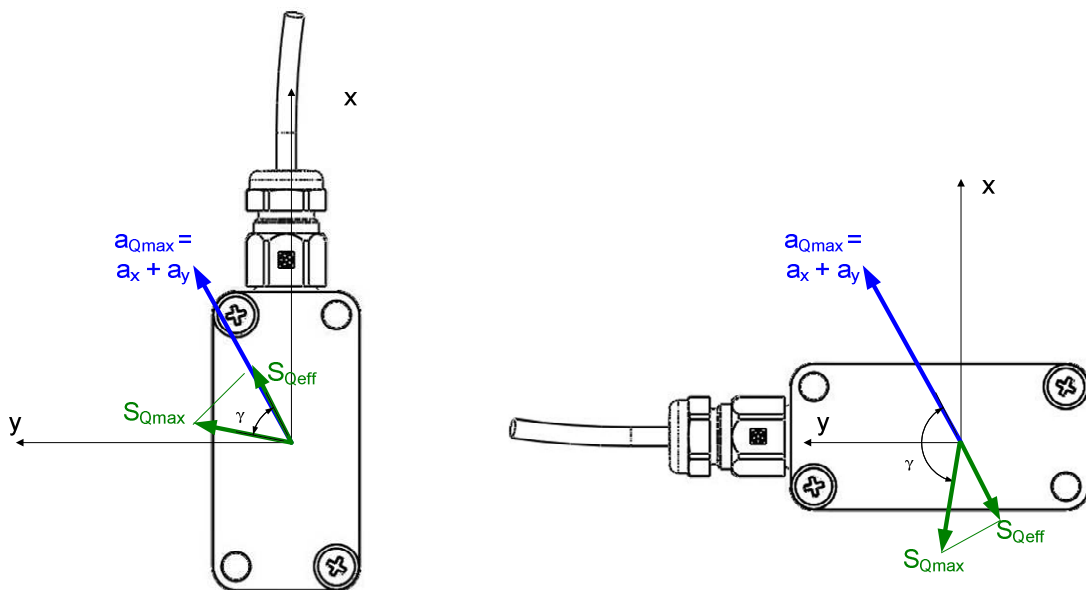


Abbildung 26: Darstellung der effekt. Querbeschleunigungsempfindlichkeit und deren Änderung durch Drehung des Sensors [23]

#### 6.3.2.2. Messaufbau

Für die Messung der Querempfindlichkeit und die spätere Kalibrierung der Sensoren wurde eine Aufspannplatte konstruiert. Als Material für die Adaptionen werden Aluminium oder Aluminiumlegierungen verwendet um eine möglichst hohe Resonanzfrequenz des Aufnehmers im montierten Zustand und eine möglichst leichte Adaption zu erzielen. Weiters wurden bei der Konstruktion die Vorgaben bezüglich Ebenheits- und Rauigkeitsspezifikationen der DIN EN ISO 16063-21 berücksichtigt.

Zusätzlich zur Aufspannplatte wurde ein Messaufbau konstruiert, auf den der Strahl des Laservibrometers gerichtet werden konnte. Die Fertigungszeichnung ist in Abbildung 72 ersichtlich. Um den Einfluss der Oberflächenqualität auf das Messergebnis der Querbewegungen zu minimieren wurde auf den Messaufbau ein Messspiegel mit einer Oberflächenrauigkeit von  $\lambda = \frac{1}{4}$  geklebt. Bei einer Wellenlänge von 632 nm des Laservibrometers ergibt sich somit eine Oberflächenrauigkeit von 2,528  $\mu\text{m}$ .

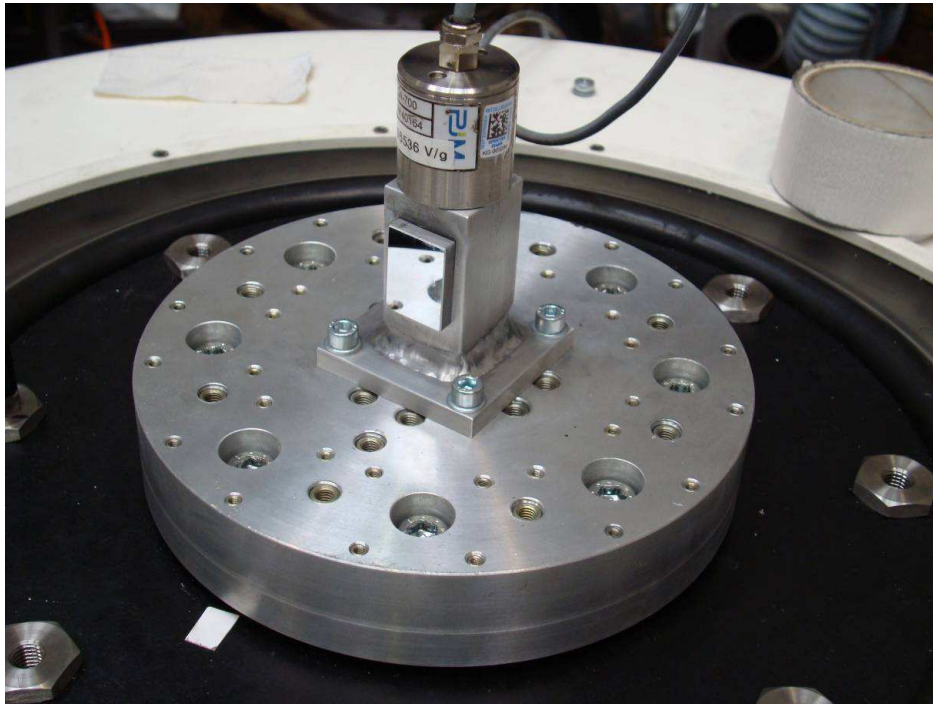


Abbildung 27: Aufspannplatte mit Messaufbau, Messspiegel und Referenzsensor

Die Querbewegungen wurden dann mithilfe eines Laservibrometers gemessen. Die Messwerte wurden für unterschiedliche Frequenzen und unterschiedliche Beschleunigungen aufgenommen. Der Amplitudenfrequenzgang entspricht jenem für die Ermittlung des Übertragungskoeffizienten bei der Kalibrierung der Sensoren (siehe Tabelle 3).

System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem  
Vergleichsverfahren

---

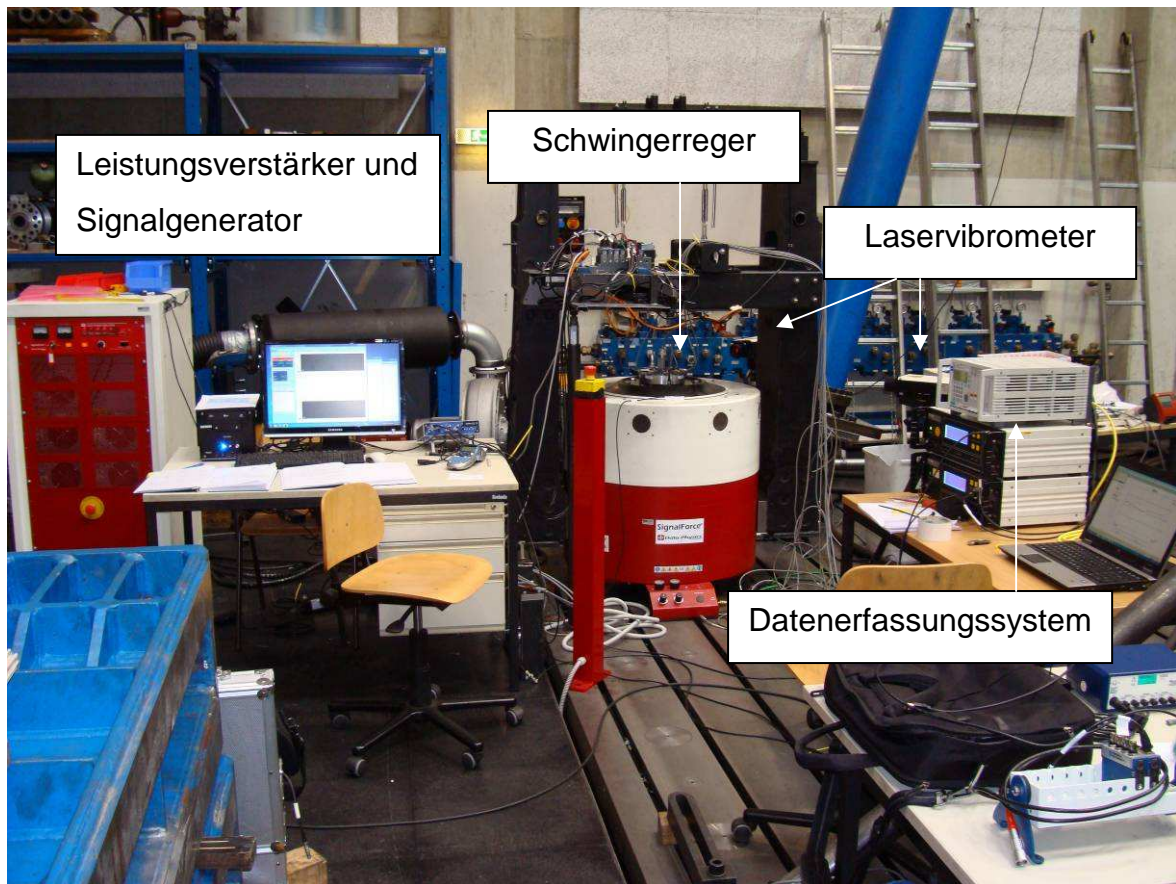


Abbildung 28: Messaufbau bei Messung der Querbewegung mittels Laservibrometer



System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem  
Vergleichsverfahren

---

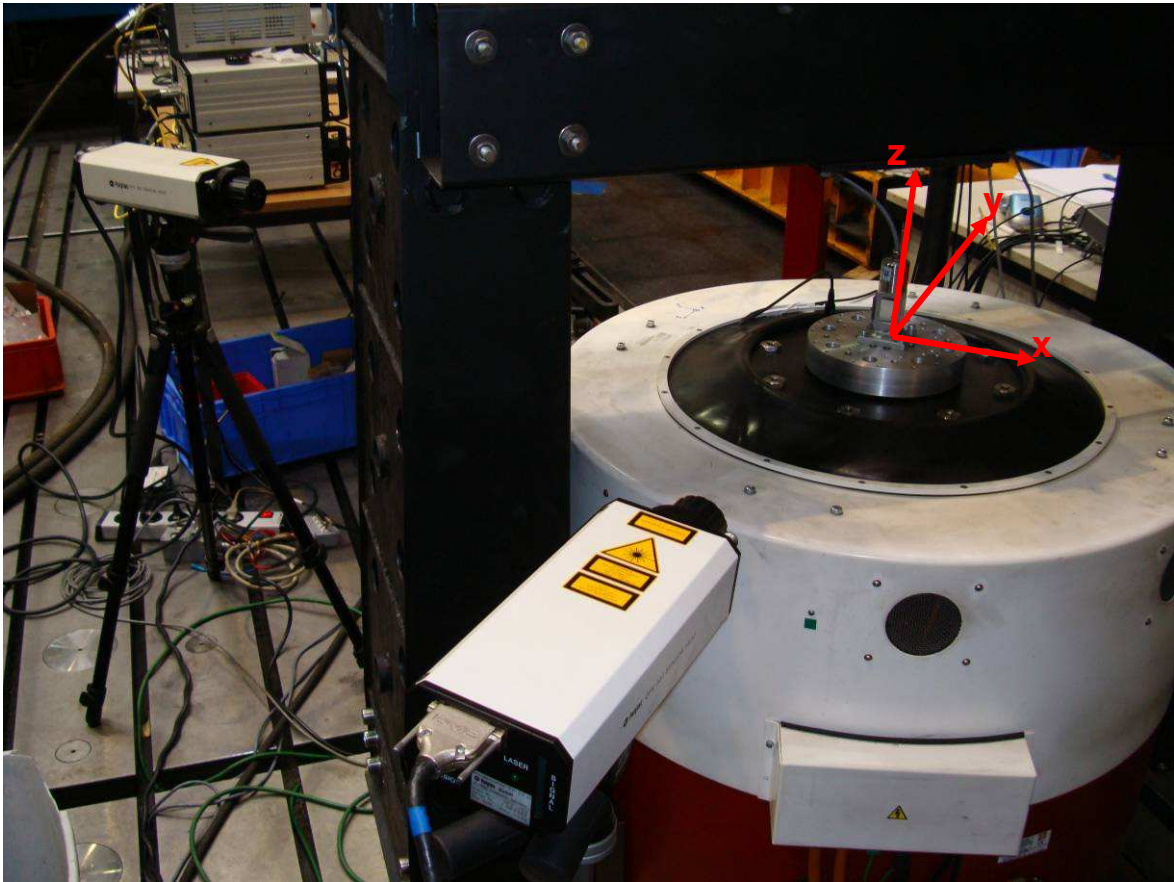


Abbildung 29: Detailansicht der Laservibrometer für die Messung der Querbewegungen des Schwingerregers

In der nachfolgenden Abbildung wird der Prüfaufbau schematisch dargestellt. Ebenso ist in der Darstellung das festgelegte Koordinatensystem eingezeichnet.

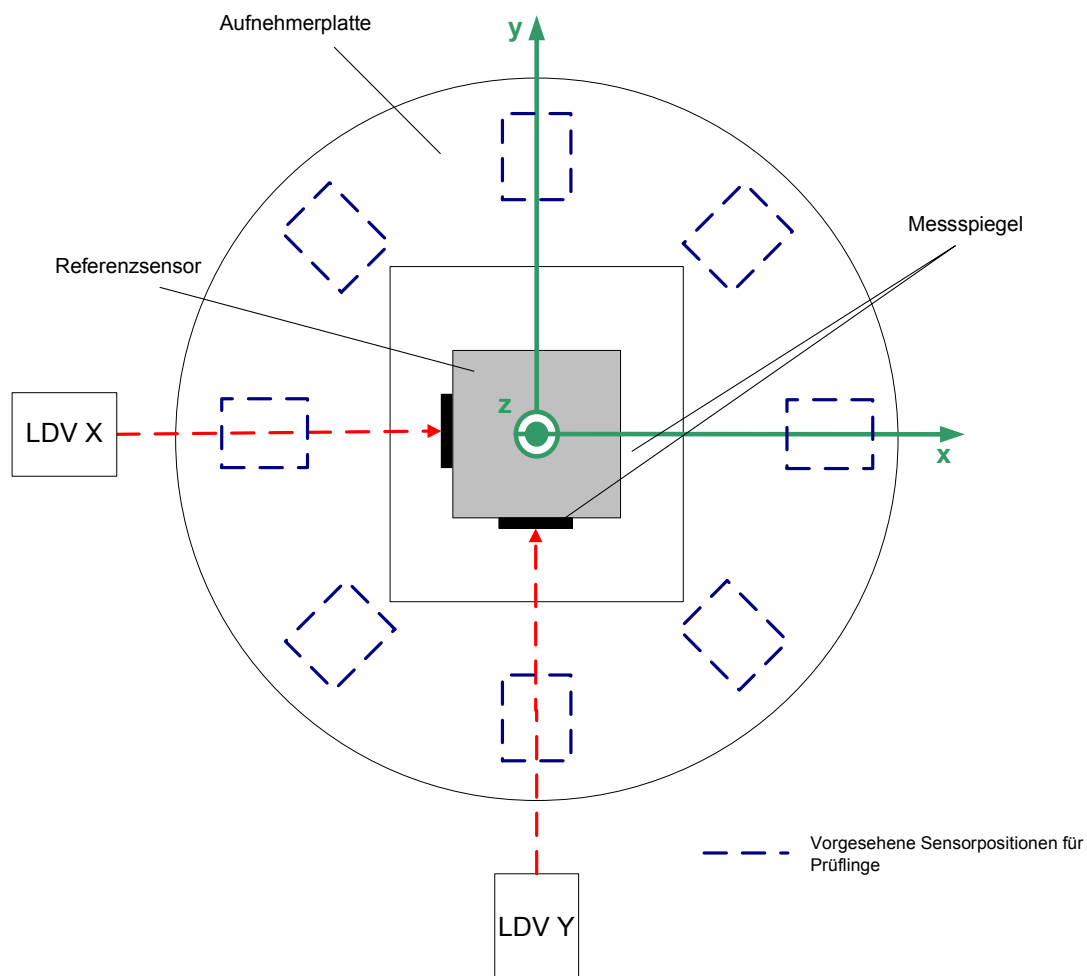


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus mit dem festgelegten Koordinatensystem

#### 6.3.2.3. Versuchsumfang

Da keine Unterlagen des Herstellers des Schwingerregers bezüglich der Bewegungen die der Schwingungserreger tatsächlich ausführt und wie groß der Klirrfaktor bei den betrachteten Frequenzen ist wurden die nachfolgenden Messungen durchgeführt. Diese Parameter, Querbewegung und Klirrfaktor, geben Aufschluss über die Qualität der erzeugten Sinusbewegung des Schwingerregers.

- a) Versuch 1 - Ermittlung des Klirrfaktors ohne Bestückung der Aufnehmerplatte mit Prüflingen (siehe Abbildung 30)
- b) Versuch 2 - Messung der Querbewegung ohne Bestückung von Prüflingen (siehe Abbildung 30)

- c) Versuche 3 bis 6 - Messung der Querbewegungen mit einem Prüfling befestigt an den Anschlusspositionen 1, 3, 5 und 7 (siehe Abbildung 31)

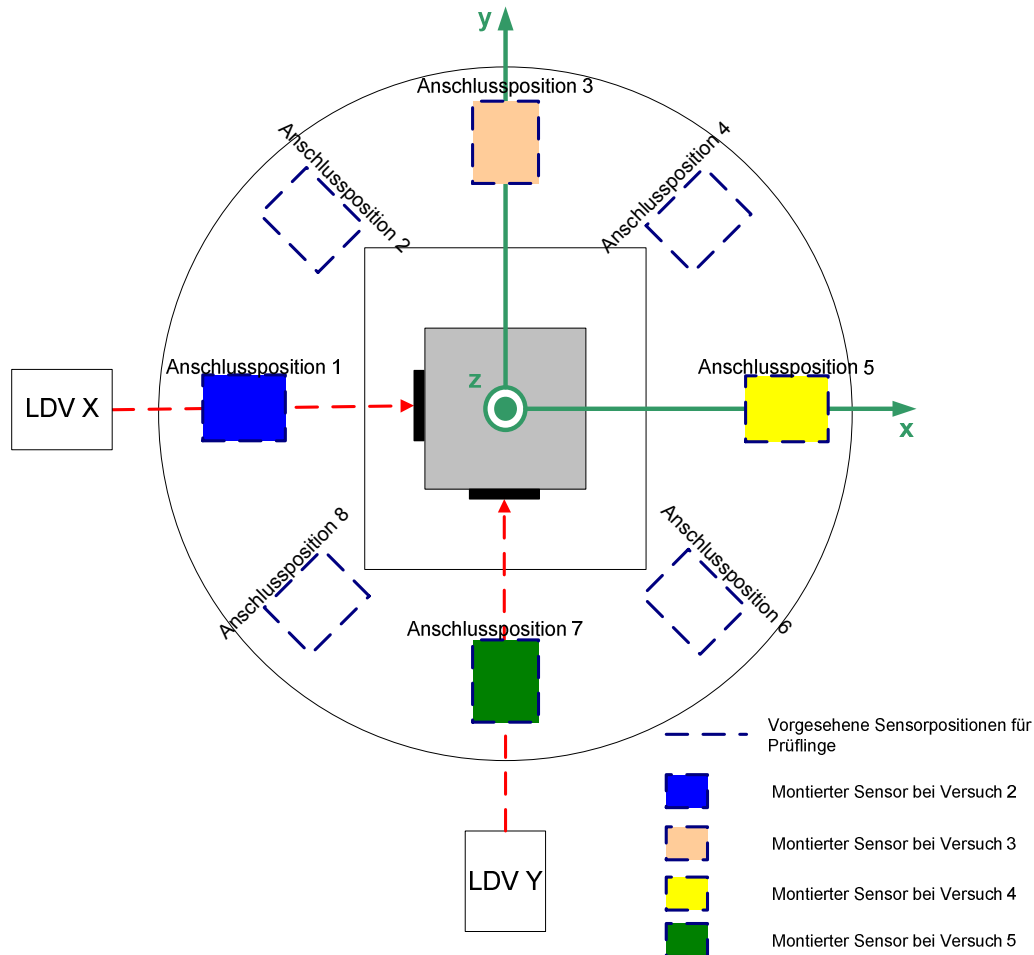


Abbildung 31: Anordnung der Prüflinge bei den Versuchen 3 bis 6

- d) Versuche 7 und 8 - Messung der Querbewegung bei Bestückung mit zwei Prüflingen gemäß Abbildung 32 und Abbildung 33



# System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

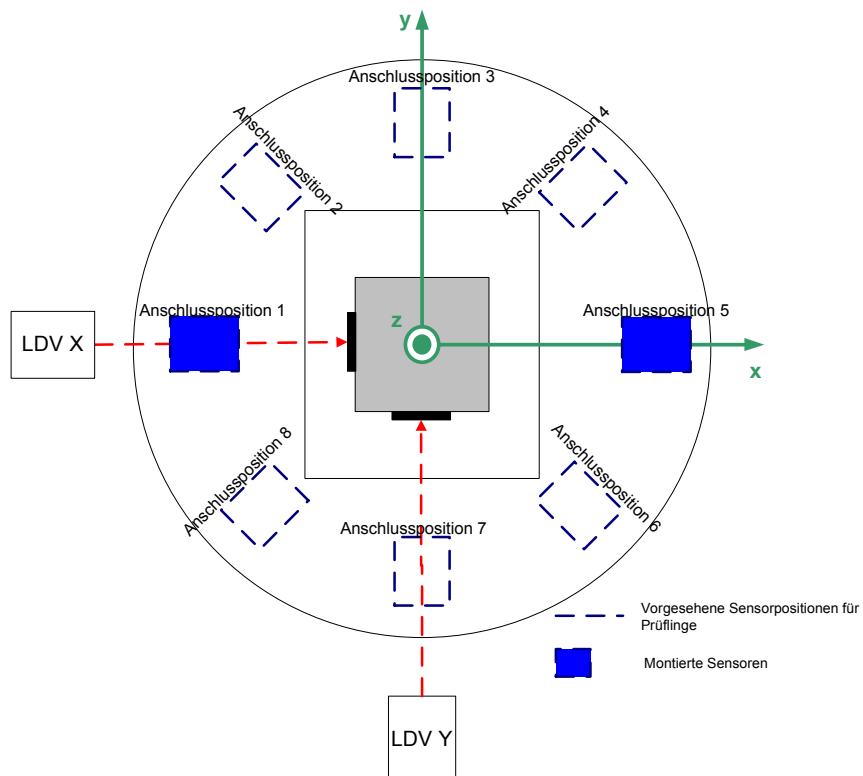


Abbildung 32: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 7

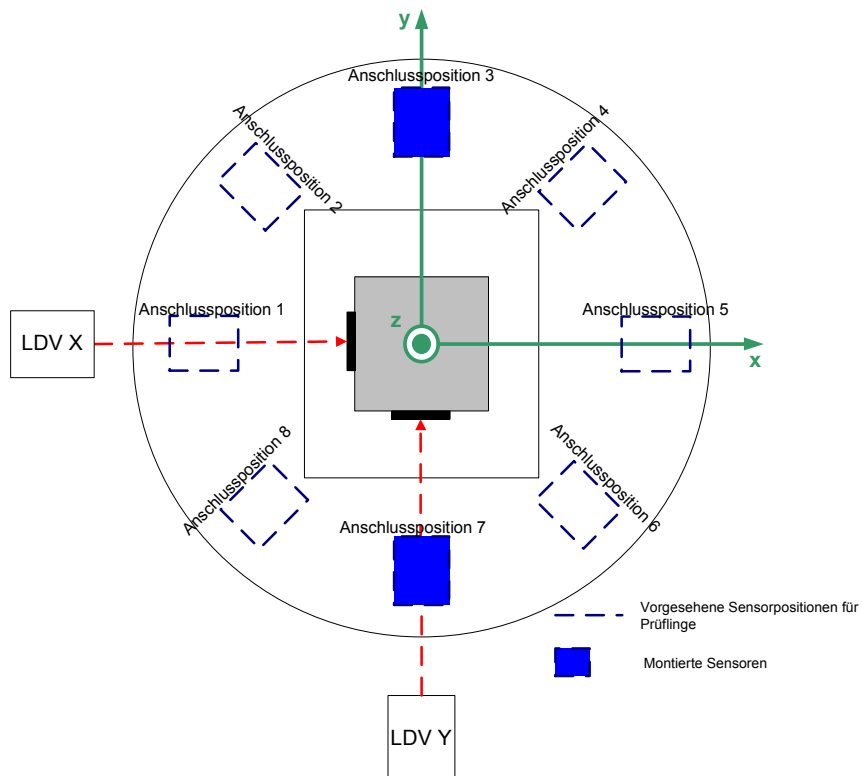


Abbildung 33: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 8

e) Versuch 9 - Messung der Querbewegungen bei Bestückung mit 4 Prüflingen

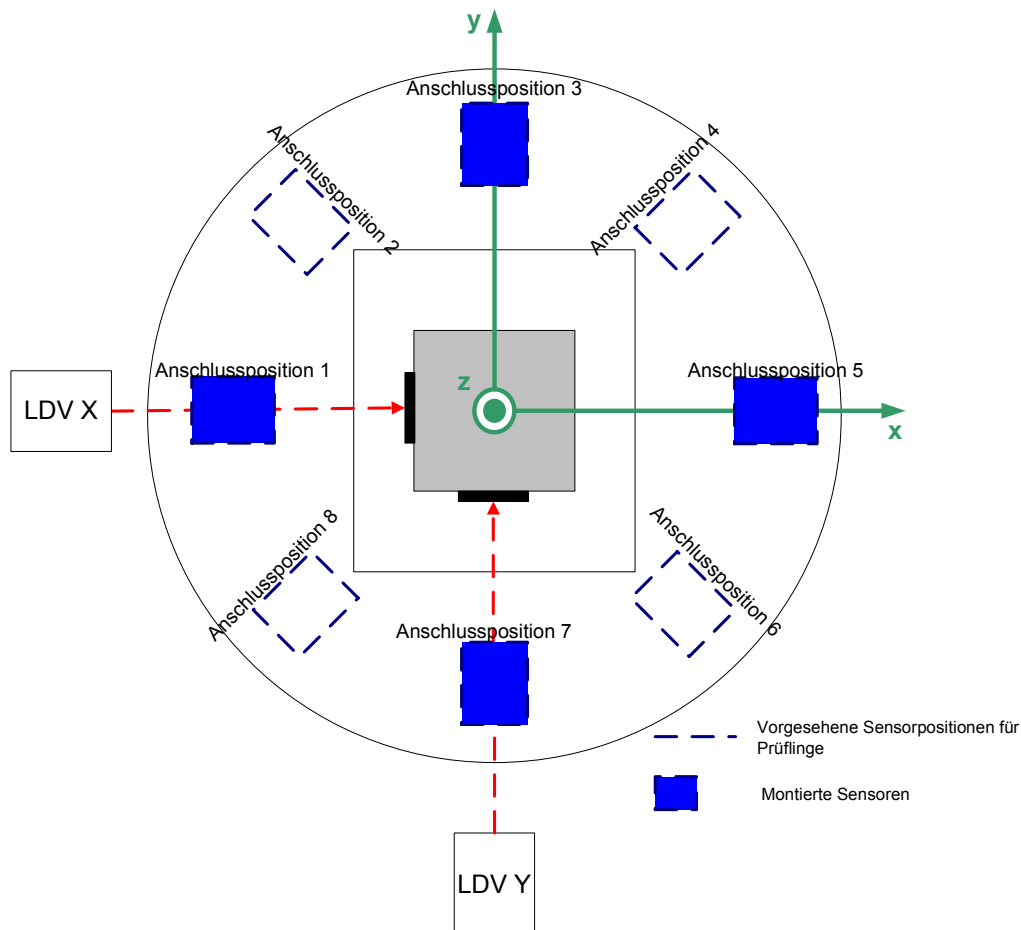


Abbildung 34: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 9

f) Versuch 10 - Messung der Querbewegungen bei voller Bestückung mit 8 Prüflingen

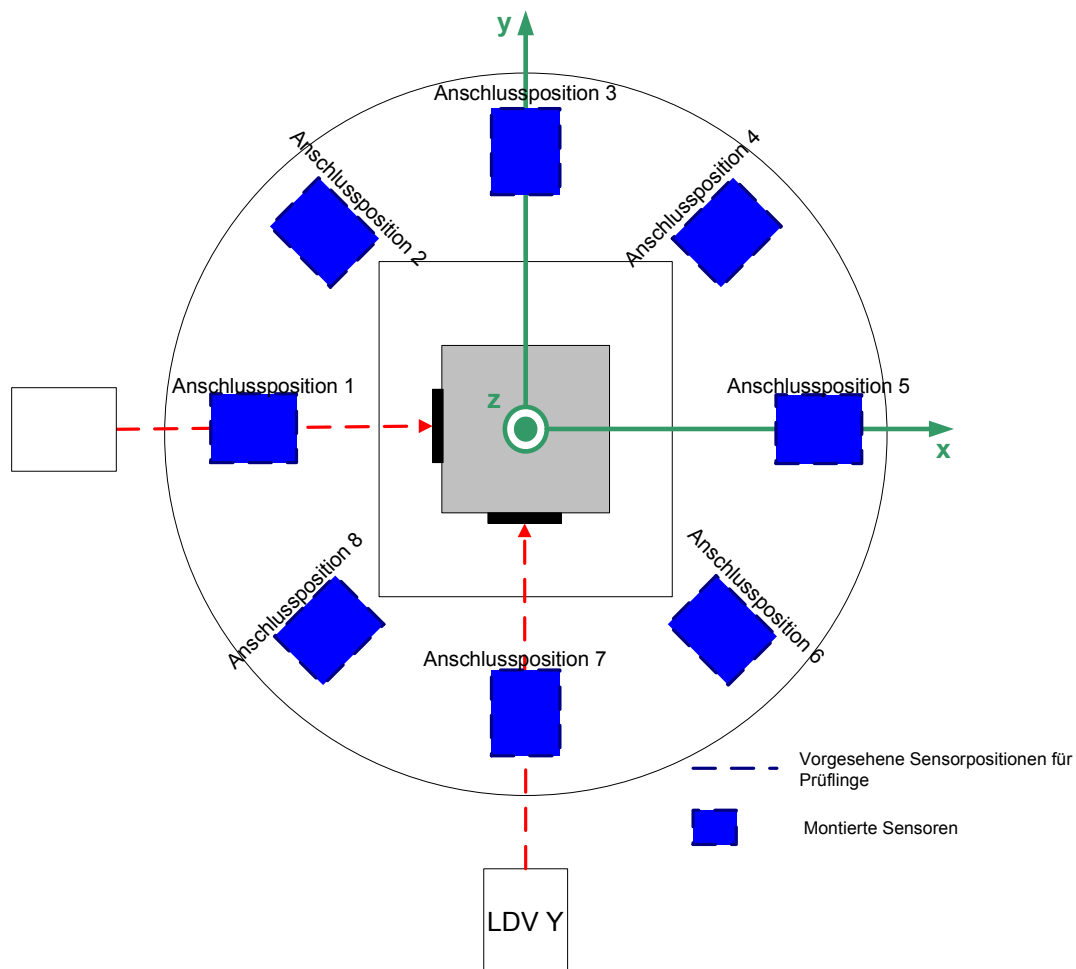


Abbildung 35: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 10

#### 6.3.2.4. Ermittelter Klirrfaktor aus Versuch 1

Der Schwingerregger erzeugt bei einer sinusförmigen Anregung nicht nur die gewünschte sinusförmige Schwingung sondern diese Schwingungen beinhalten ungewünschte Oberwellen, die auf die Unzulänglichkeiten des Schwingerreggers im speziellen auf die Führungseinrichtung zurückzuführen sind. Der wesentlicher Einfluss für die Entstehung von Oberwellen sind somit die mechanischen Eigenschaften des Schwingerreggers. Durch spezielle Ausführungen der Führungen des Schwingerreggers kann die Entstehung von Oberwellen verringert werden. Der Klirrfaktor gibt Aufschluss in welchem Ausmaß Oberwellen vorhanden sind und ist definiert als Verhältnis der Effektivwerte der Oberwellen zum Effektivwert des Gesamtsignals.

$$k_L = \sqrt{\frac{\hat{U}_{1,2}^2 + \hat{U}_{1,3}^2 + \hat{U}_{1,4}^2 + \dots}{\hat{U}_{1,1}^2 + \hat{U}_{1,2}^2 + \hat{U}_{1,3}^2 + \hat{U}_{1,4}^2 + \dots}} \cdot 100 \quad (6-7)$$

Dabei bezeichnen:

$\hat{U}_{1,1} \dots$  Amplitude der Grundwelle des Referenzsensors (in V)

$\hat{U}_{1,2}, \hat{U}_{1,3} \dots$ : Amplituden der Oberwellen des Referenzsensors (inV)

Dazu wurde eine Messung entsprechend des in Abbildung 30 dargestellten Versuchsaufbaus durchgeführt. Während der Messung wurde der Schwingerregger mit Frequenzen zwischen 5 und 200 Hz gemäß Tabelle 3 angeregt. Für die Auswertung der Messung wurde für jede betrachtete Frequenz ein Intervall von 1 s aus dem Messsignal ausgeschnitten und dafür eine Fourier-Transformation durchgeführt. Nähere Informationen zur Durchführung der Fourier-Transformation ist in Kapitel 8.1 ersichtlich. Der Unterschied zur Auswertung der Übertragungskoeffizienten ist, dass aus dem ermittelten Spektrum des Messsignals des Referenzsensors nach Versuch 1 mittels Gleichung (6-7) die Klirrfaktoren für die verschiedenen Frequenzen gemäß Tabelle 3 ermittelt werden.

Exemplarisch für die ermittelten Spektren des Sweeps wird in der nachfolgenden Abbildung das Spektrum bei einer 5 Hz Anregung mit einer Beschleunigungsamplitude von 5 m/s<sup>2</sup> des Schwingerreggers dargestellt. In der Abbildung werden zur besseren Übersicht die Frequenzen über 100 Hz nicht dargestellt. Weiters wird ein Ausschnitt in Abbildung 37 nochmals vergrößert dargestellt.

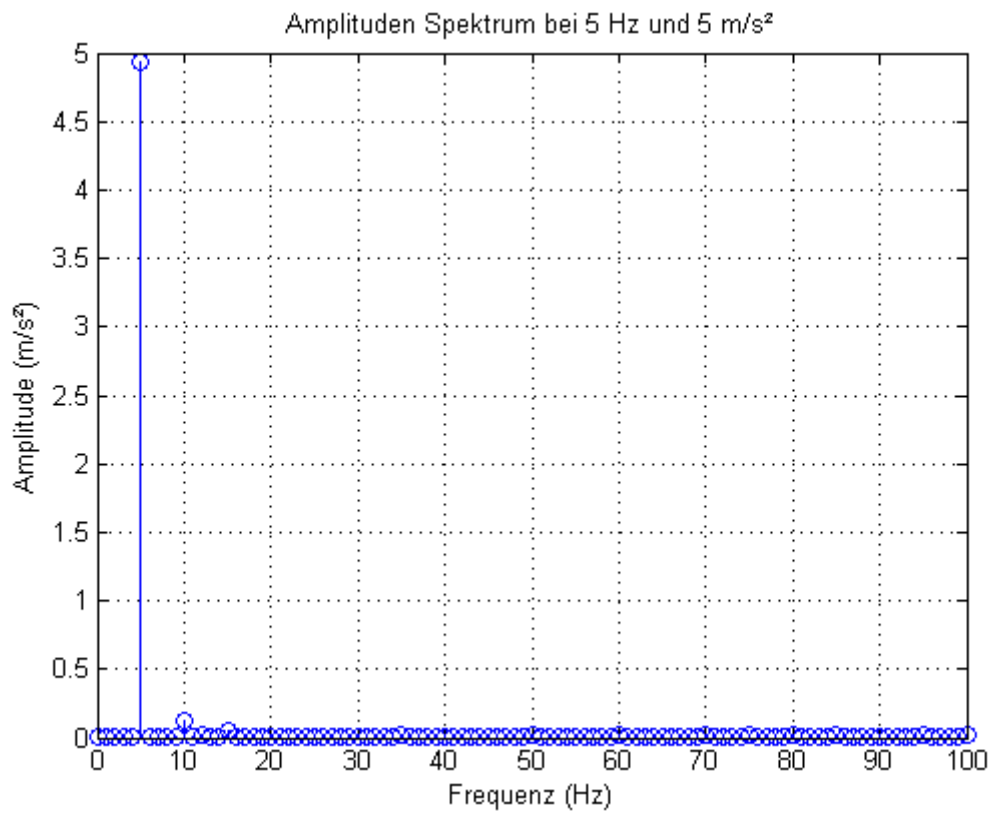


Abbildung 36: Spektrum bei Anregung des Schwingerregers mit 5 Hz und einer Beschleunigungsamplitude von 5 m/s<sup>2</sup>

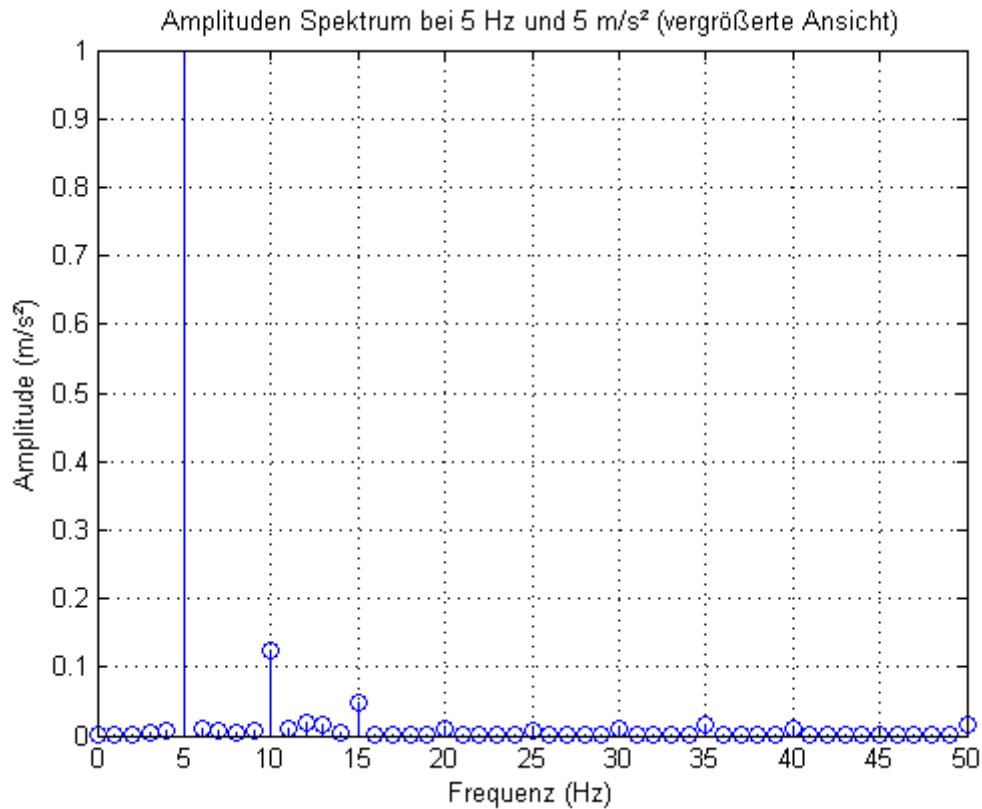


Abbildung 37: Spektrum bei Anregung des Schwingerregers mit 5 Hz und einer Beschleunigungsamplitude von 5 m/s<sup>2</sup> (vergrößerte Ansicht)

Aus den in der Spektralanalyse ermittelten und korrigierten Beschleunigungsamplituden wurden die Klirrfaktoren gemäß Gleichung (6-7) ermittelt. Das Ergebnis der Ermittlung der Klirrfaktoren ist in der nachfolgenden Tabelle und Abbildung ersichtlich.

Versuch Nr. 01 - Ermittlung des Klirrfaktors	
Frequenz (Hz)	Klirrfaktor (%)
5	16.390
8	4.110
16	0.165
40	0.166
60	0.167
80	0.167
100	0.169
120	0.170
140	0.171
160	0.173
200	0.177

Tabelle 4: Klirrfaktoren bei Anregung des Schwingerregers mit unterschiedlichen Frequenzen

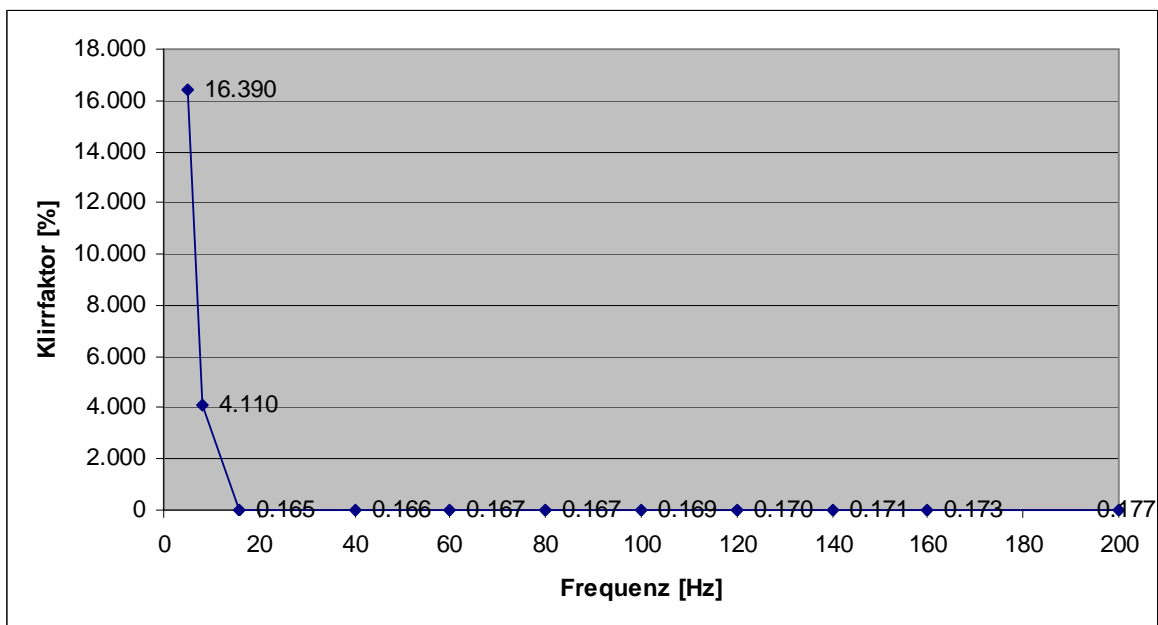


Abbildung 38: Graphische Darstellung der ermittelten Klirrfaktoren des Schwingerregers

## System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

Die Auswertung zeigt, dass der Schwingerreger bei Anregung von 5 und 8 Hz neben der geforderten Grundwelle einen hohen Anteil an Oberwellen durch Unzulänglichkeiten des Führungssystems generiert. Die Bewertung des Klirrfaktors bzw. der auftretenden Oberwellen bei den übrigen Frequenzen an der Messunsicherheit erfolgt in Kapitel 7.3.9.

### 6.3.2.5. Ergebnisse aus der Ermittlung der Quer- und Taumelbewegungen des Schwingerregers

Um die Quer- und Taumelbewegungen des Schwingerregers feststellen zu können wurden mehrere Versuche mit unterschiedlicher Bestückung der Aufnehmerplatte durchgeführt. Die durchgeführten Versuche sind in Kapitel 6.3.2.3 detailliert dargestellt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der ermittelten relativen Querbeschleunigungen dargestellt. Die Detailergebnisse der einzelnen Versuche sind in Kapitel 13.1 ersichtlich.

Zusammenfassung der Ergebnisse aus den ermittelten relativen Querbeschleunigungen bei den Versuchen 2 - 10		
Versuch Nr.	Maximale relative Querbeschleunigung $a_{qrel,max} (%)$	Frequenz $f (Hz)$
2	6.13	120
3	6.09	120
4	5.39	120
5	5.44	120
6	6.07	120
7	5.52	120
8	5.50	120
9	5.20	120
10	4.69	120

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den ermittelten relativen Querbeschleunigungen bei den Versuchen 2 – 10



Die Tabelle zeigt deutlich, dass die max. relative Querschleunigung nur bei der Frequenz  $f = 120$  Hz des Sweeps auftritt. Der Beitrag den dieses Ergebnis zur Gesamtmesseunsicherheit beiträgt wird in Kapitel 7.3.6 ermittelt. Weiters wird in dem genannten Kapitel geschlussfolgert was das Ergebnis für die vorgehensweise bei der Kalibrierung der Beschleunigungssensoren bedeutet.

## 6.4. Referenzsensor

Bei diesem handelt es sich um einen Servo-Beschleunigungssensor des Typs QA700 von der Fa. Honeywell. Die allgemeine Funktionsweise wurde bereits kurz in Kapitel 3.5 beschrieben. Hier wird nochmals vertiefend auf die spezielle Funktionsweise des verwendeten Sensors eingegangen um die speziellen Eigenschaften des Sensors besser verstehen zu können.

Das Gelenk und Pendel sind aus Quarzglas gefertigt (siehe Abbildung 41). Das Quarzglas ist ein sehr stabiles und nicht leitendes Material. Zusätzlich ist der Wärmeausdehnungskoeffizient um ca. den Faktor 20 kleiner als bei Stahl. Aus diesem Grund ändert sich die Pendelfähigkeit (pendulosity) bei Temperaturänderung nur sehr wenig und der Beitrag am Linearitätsfehler auf Grund von Temperaturänderung ist sehr gering [19].

Für die Erzeugung des Gelenks wurde der Quarz ringförmig bis auf zwei verbleibende Stege ausgeschnitten. Anschließend wird das für das Gelenk nötige Profil (siehe Abbildung 39) heraus geätzt. Die so erzeugte Form des Doppelgelenks bietet einen hohen Widerstand gegen Drehbewegungen und gegen Beschleunigungen normal zur Messrichtung. Durch diese Eigenschaften wird die Querempfindlichkeit des Sensors minimiert [19].

## System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

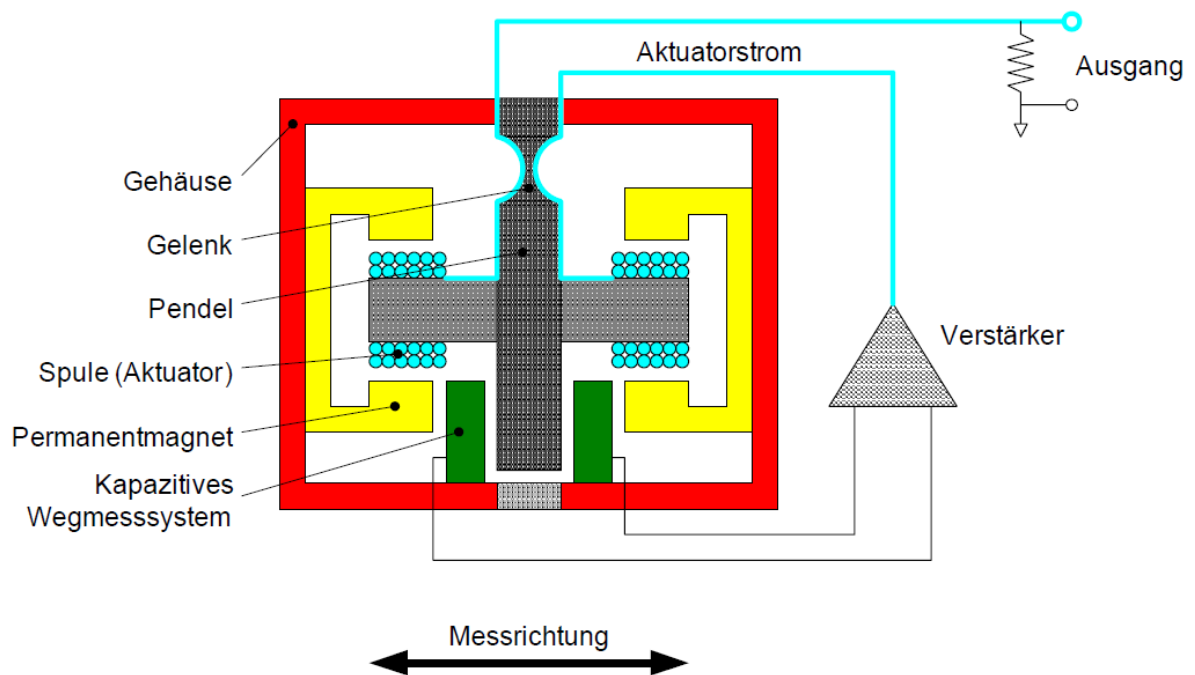


Abbildung 39: Funktionsprinzip eines QA700 Beschleunigungssensors [19]

Am beweglichen Teil der Pendelkonstruktion sind beidseitig Spule angebracht die mit dem magnetischen Feld der Permanentmagneten zusammenwirken. Teile des Pendels sind mit einem Metall überzogen. Befindet sich der Sensor im Ruhezustand ist der Abstand zwischen dem Pendel und dem oberen bzw. unteren Gehäuse gleich. Ebenso ist die Kapazität oben und unten gleich. Wird das Pendel infolge einer Beschleunigung ausgelenkt steigt an einer Seite die Kapazität während sie auf der anderen Seite sinkt. Der so gemessene Abstand zwischen dem Pendel und den Gehäusen wird nun genutzt um über den Verstärker bzw. das Regelsystem einen Strom einzustellen, der das Pendel wieder in die „Nulllage“ zurück bewegt. Dieser Strom ist ein Maß für die auftretende Beschleunigung [19].

In den nachfolgenden Bildern ist ein zerlegter QA700 Sensor gezeigt.

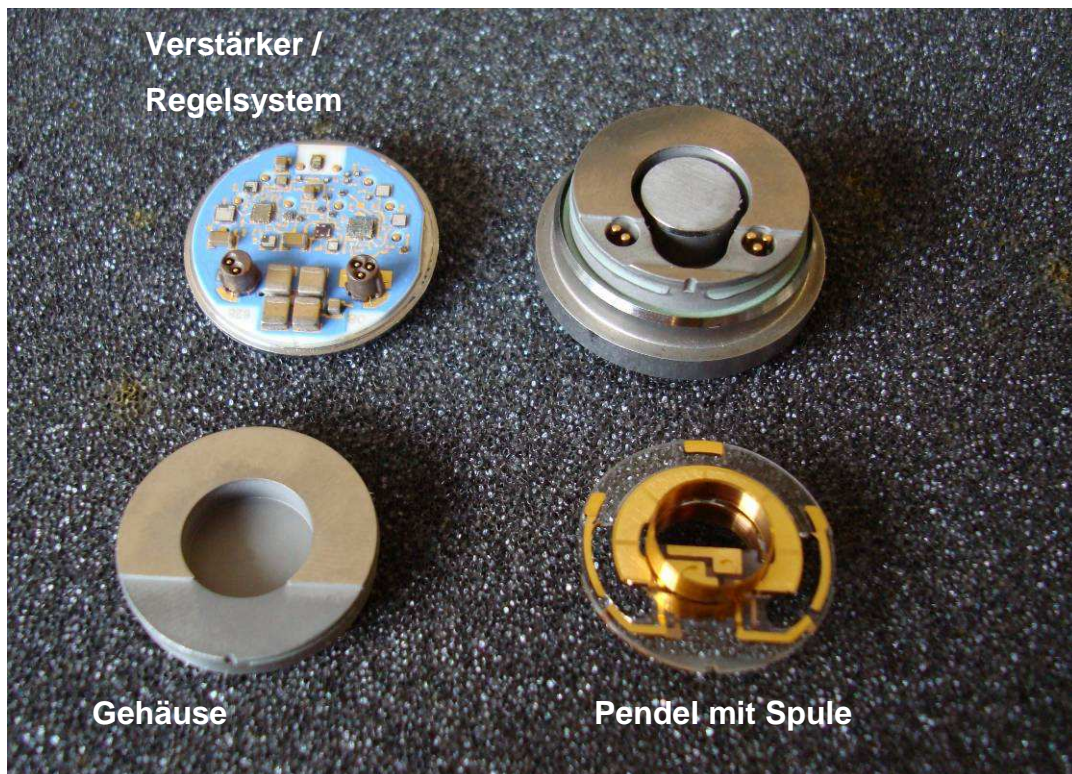


Abbildung 40: Bauteile eines QA700 Beschleunigungssensors

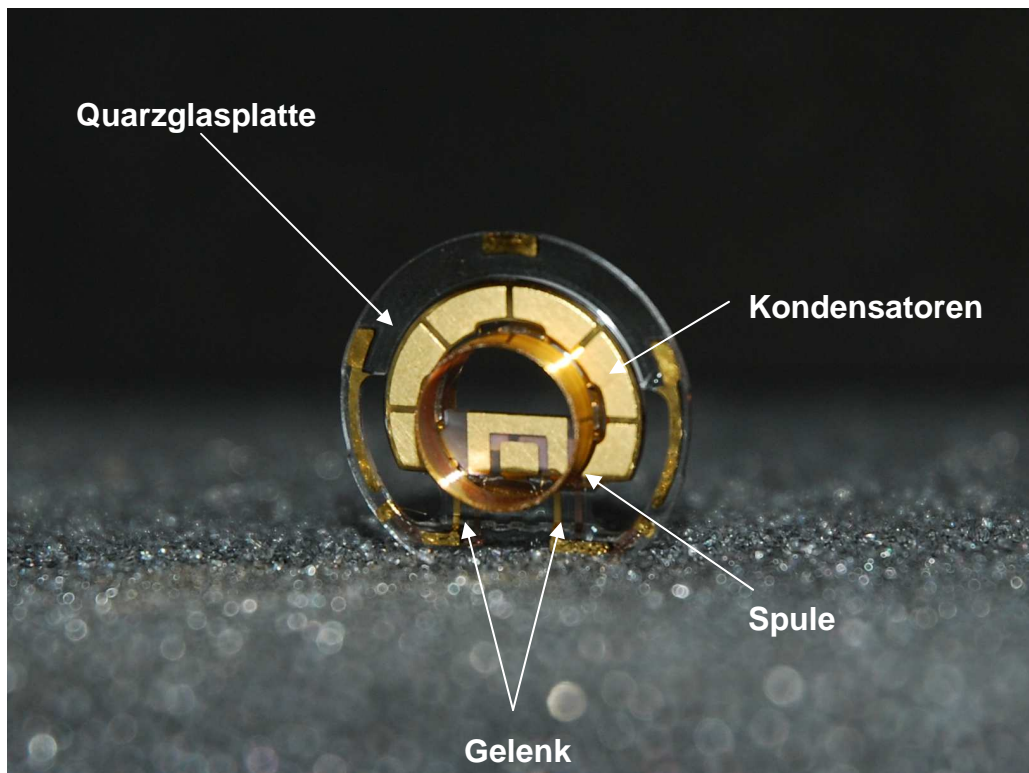


Abbildung 41: Pendel mit Spule

Bei höheren Frequenzen stößt das Regelsystem allmählich an seine Grenzen, wodurch sich der für diesen Sensortyp charakteristische Frequenzgang ergibt.

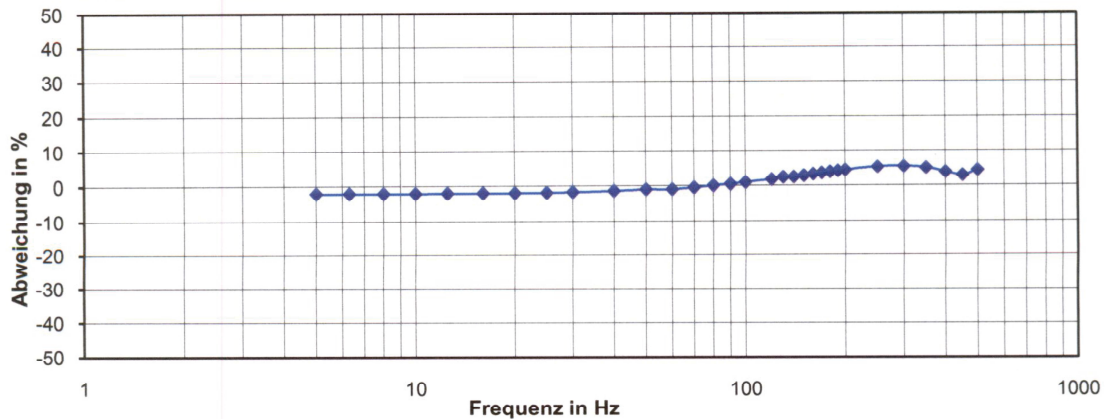


Abbildung 42: Frequenzgang des Referenzsensors nach der Primärkalibrierung

Der Sensor wurde von einem akkreditierten Kalibrierlabor primär kalibriert, damit er als Referenzsensor verwendet werden kann. Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Anhang 13.1 ersichtlich.

In der nachfolgenden Tabelle sind die technischen Eigenschaften des Sensors zusammengefasst. Es fällt u.a. dabei auf, dass der Achsausrichtungsfehler mit  $<2000\mu\text{rad}$  angegeben ist, was einem Winkel von  $0,1144^\circ$  entspricht. Umgerechnet auf die Querschleunigungsempfindlichkeit bedeutet dies einen Wert  $u_{\text{quer}} < 0,2\%$ . Auch die Angaben von anderen Herstellern solcher Sensortypen zeigen geben ähnliche Werte für die Querschleunigungsempfindlichkeit an. Z.B. gibt die Fa. Althen Mess- und Sensortechnik für ihren Sensor AAA210 eine Querschleunigungsempfindlichkeit von  $<0,2\%$  an. Typische Werte für andere Sensortypen sind 2-4%.

<b>Spezifikation Q - Flex QA-700</b>	
<i>Eigenschaften</i>	
Verstimmung des Nullpunktes	<8mg
Wiederholbarkeit innerhalb eines Jahres	<1200µg
Temperatureinfluss	<70µg/°C
Empfindlichkeit	1,33mA/g±10%
Wiederholbarkeit innerhalb eines Jahres	<1200ppm
Temperatureinfluss	<200ppm/°C
Ansprechtschwelle	<1µg
Achs-Ausrichtungsfehler	<2000µrad
<i>Zulässige Umgebungsbedingungen</i>	
Arbeitstemperatur	-55 bis 96°C
Schockfestigkeit	250g
Vibrationsfestigkeit	25g

Tabelle 6: Technische Daten Q-Flex QA-700

## 6.5. Prüflinge

Es ist vorgesehen Beschleunigungssensoren des Typs Q-Flex QA700 und PJM-LN Sensoren. Die Eigenschaften der QA700 Sensoren sind bereits in Punkt 6.4 beschrieben, daher wird hier nur mehr auf die kapazitiven PJM-LN Sensoren eingegangen.

Die PJM-LN Sensoren sind wie erwähnt kapazitive Sensoren. Das Prinzip beruht wie in 3.4 beschrieben auf der Kapazitätsänderung bei Auslenkung einer seismischen Masse infolge Beschleunigung. In Tabelle 7 sind die technischen Daten des Sensors dargestellt. Dieser Sensortyp besitzt eine nur sehr geringe, praktisch vernachlässigbare Basisdehnungsempfindlichkeit.

Der Messbereich der Sensoren variiert zwischen ±2g und ±400g. Daher muss die max. Beschleunigungsamplitude bei der Kalibrierung der Sensoren PJM-LN 2g und PJM-LN 5g auf den Messbereich angepasst werden.

<b>Spezifikation PJM LN 2g - 400g</b>	
<i>Eigenschaften</i>	
Querempfindlichkeit	max. 3%
Nullpunktsfehler	max. 2% v. Messbereich
Temperatureinfluss	250 ppm/°C
Empfindlichkeitsfehler	2%
Linearitätsabweichung	max. 2% v. Messbereich
<i>Zulässige Umgebungsbedingungen</i>	
Arbeitstemperatur	-55 bis 125°C
Schockfestigkeit	5000g

Tabelle 7: Technische Daten PJM LN 2g - 400g

Die Prüflinge haben keinen signifikanten Einfluss auf das Kalibriersystem und daher auch keinen Einfluss auf die Messunsicherheit. Es ist lediglich darauf zu achten, dass das Gewicht der bei den Messungen für die Ermittlung der Quer- und Taumelbewegungen verwendeten Massen höher ist als die Masse einzelner Sensoren, damit der Gewichtseinfluss infolge von Beladung mit Sensoren entsprechen erfasst wurde.

## 6.6. Messverstärker

Als Messverstärker wird das MGC+ von der Fa. HBM eingesetzt. Dieser ist modular aufgebaut und es können verschiedene Messgrößen durch unterschiedliche Verstärkereinschübe gemessen werden.

Jeder Messverstärker-Einschub arbeitet durch eine eigene CPU autark. Die Datenaufbereitung wie z.B. Filterung und Messbereichseinstellung erfolgt in digitaler Form. Die Nachteile der analogen Signalaufbereitung wie zeit- und temperaturabhängiges Driften, Fehler durch Bauteiltoleranzen und hoher Schaltungsaufwand treten hier nicht auf bzw. sind bei der digitalen Signalaufbereitung gering da auch hier z.B. elektronische Bauteile nötig sind. Das im Messverstärker angewandte Digitalisierungsverfahren (MPDM – Mehrfach Pulsdauer Modulation) ist ein erprobtes Verfahren und minimiert die Einflüsse auf

System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem  
Vergleichsverfahren

das tatsächliche Messsignal. Weiters ist die Digitalisierung heute Stand der Technik wodurch auf weitere Erläuterungen verzichtet wird [17].

Für die Messung des spannungsproportionalen Signals wird die Einschubkombination ML801 und AP801 verwendet. Die Eigenschaften der Mehrkanal-Verstärkereinschübe sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

<b>Technische Daten ML801B in Kombination mit AP801</b>	
Genauigkeitsklasse	0,05
Anzahl der Messstellen	8
Messgrößenaufnehmer	$\pm 10$ V
Maximale Messrate pro Kanal	2400 Hz
Messfrequenzbereich	0 ... 1 kHz
Effektive Auflösung	20 bit
Langzeitdrift über 48 Stunden mit Autokalibrierung	0,8 mV
Linearitätsabweichung	<0,03 %

Tabelle 8: Technische Daten Verstärkereinschub ML801B / AP801

In Anhang 13.4 ist der Kalibrierschein der verwendeten Verstärkereinschubkarten abgebildet.

In den zwei nachfolgenden Abbildungen ist die Messkette für die Kalibrierung der zwei unterschiedlichen Sensortypen dargestellt. Die Servo-Beschleunigungssensoren sind aktive Sensoren und benötigen daher eine Versorgungsspannung zwischen 9 und 24 V. Die zu kalibrierenden PJM-LN Sensoren müssen ebenfalls mit Gleichspannung versorgt werden. Die nötige Versorgungsspannung beträgt jedoch 5V und wird direkt vom Messverstärkersystem ausgegeben. Alle verwendeten Messkabel sind geschirmt um elektromagnetische Einstreuungen und Interferenzen auf die Leiter aus der Umwelt zu minimieren.



## System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

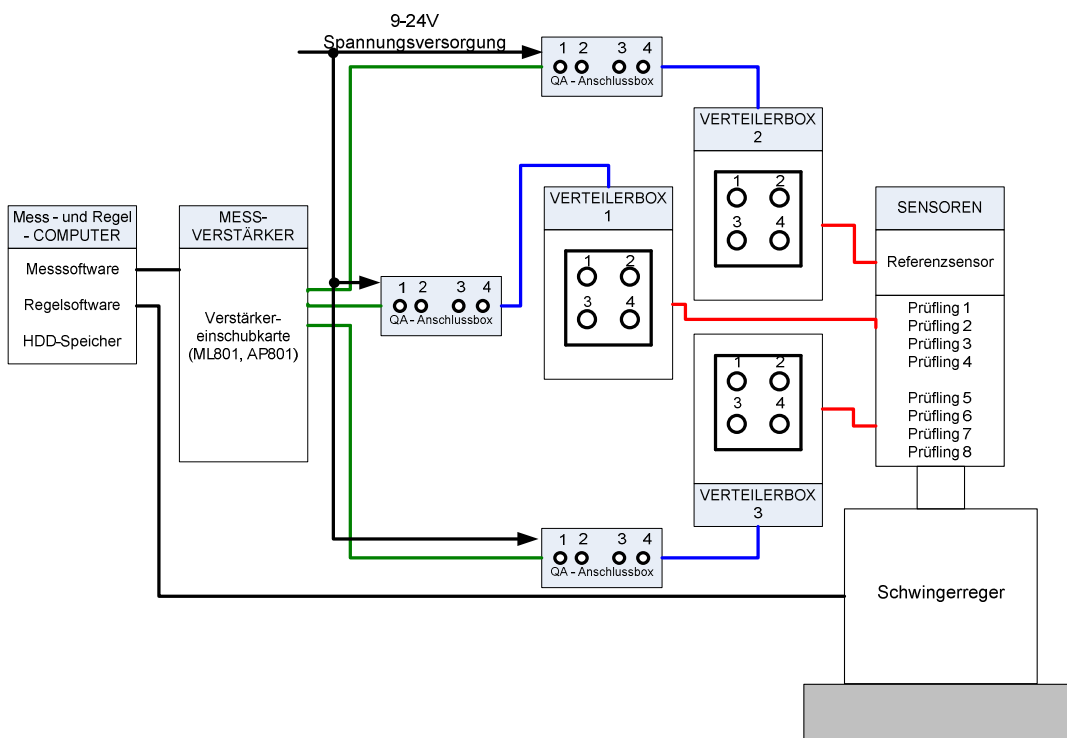


Abbildung 43: Messkette für die Kalibrierung von Sensoren des Typs QA700

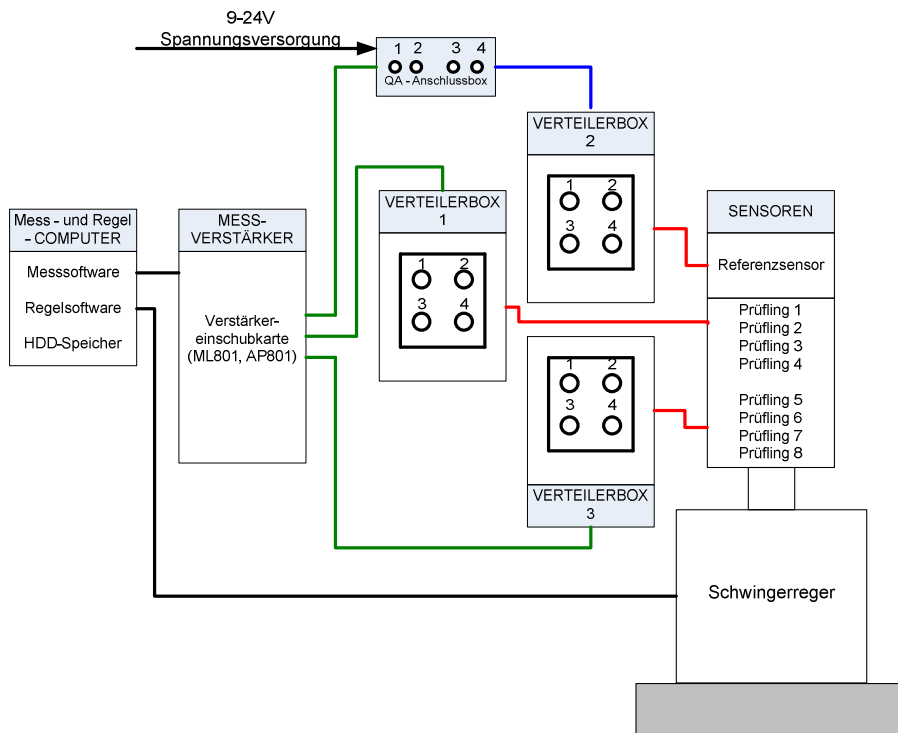


Abbildung 44: Messkette für die Kalibrierung von Sensoren des Typs PJM-LN



Die Sensoren werden über ihre Anschlusskabel (rot) direkt an Verteilerboxen angeschlossen. Diese Verteilerboxen können dann mit einem speziellen Verlängerungskabel (grün) mit dem Messverstärkersystem verbunden werden. Beim Referenzsensor ist noch eine zusätzliche QA-Anschlussbox zwischen der Verteilerbox und dem Messverstärker nötig, da dieser eine Versorgungsspannung von 9-24V benötigt. Der Messverstärker überträgt die Messdaten über ein Ethernetkabel an den Messrechner. Diese Messkette ist für die Kalibrierung von Sensoren des Typs QA700 ähnlich. In diesem Fall muss jedoch jeder Verteilerbox eine QA-Anschlussbox vorgeschaltet werden (siehe Abbildung 43).

## **6.7. Aufspannplatte**

Die Aufspannplatte dient zur Befestigung der Prüflinge und des Referenzsensors bei der Kalibrierung. Für die Ermittlung der Quer- und Taumelbewegungen des Schwingerregers wurde ein Messaufbau konstruiert und gebaut um diesen Einfluss messtechnisch zu ermitteln.

Die Aufspannplatte wurde gemäß den Vorschlägen der DKD Richtlinie DKD-R 3-1 Blatt 1 konstruiert. Die Fertigungszeichnung der Aufspannplatte ist 13.5 ersichtlich. Sie ist darauf ausgelegt bis zu acht PJM-LN oder QA700 Sensoren gleichzeitig zu kalibrieren. Der Referenzsensor ist dabei in der Mitte der Platte angeordnet und um ihn herum gleichförmig die Prüflinge (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46).

## **6.8. Abschätzung der Eigenschwingformen des Schwingungssystems**

Um Abschätzen zu können ob Eigenschwingformen oder Resonanzfrequenzen bei der Kalibrierung erreicht werden, musste das Schwingungssystem auf diese Problematik hin untersucht werden.

## System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem Vergleichsverfahren

Für die Untersuchung von möglichen Eigenformen während der Kalibrierung wurde eine Modalanalyse der Aufspannplatte durchgeführt. Diese zeigte, dass die erste Eigenform bei einer Frequenz  $>2500\text{Hz}$  (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46) auftritt. Die Shakerarmatur selbst ist vom Hersteller konstruktiv hinsichtlich möglicher Eigenformen optimiert. Bei den Tests ist die Aufspannplatte mit der Shakerarmatur durch neun Schrauben starr verbunden. Da die bei der Kalibrierung betrachteten Frequenzen wesentlich geringer (max.  $200\text{Hz}$ ) sind und da die Aufspannplatte mit der Shakerarmatur wie gesagt starr verbunden ist, ist davon auszugehen, dass die erste Eigenform der Schwingungssystem über der maximalen Kalibrierfrequenz liegt und somit keinen Einfluss auf die Kalibrierung auftritt.

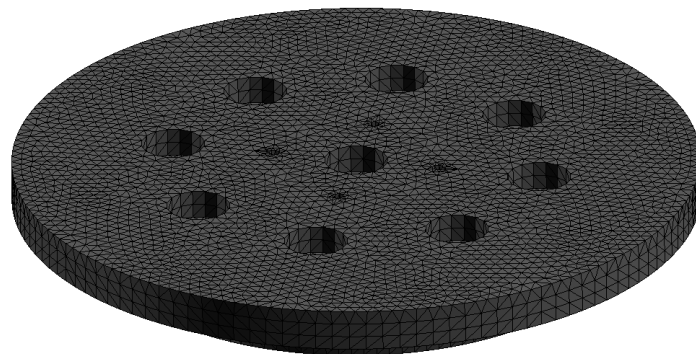


Abbildung 45: Aufspannplatte im Grundzustand



Abbildung 46: 1. Eigenform der Aufspannplatte

Weiters wurde untersucht inwieweit sich die Resonanzfrequenz der Shakerarmatur ändert wenn die Shakerarmatur zusammen mit der Aufspannplatte als 1-Massenschwinger betrachtet wird. Die Resonanzfrequenz der Shakerarmatur beträgt laut Datenblatt und durch ein Experiment bewiesen  $f = 2500$  Hz. Es soll nun untersucht werden, ob sich die Resonanzfrequenz der Shakerarmatur infolge der Montage der Aufspannplatte wesentlich ändert. Vereinfachend wird dazu von einem 1-Massenschwinger ausgegangen, d.h. es wird davon ausgegangen, dass die Aufspannplatte mit der Shakerarmatur starr verbunden ist.

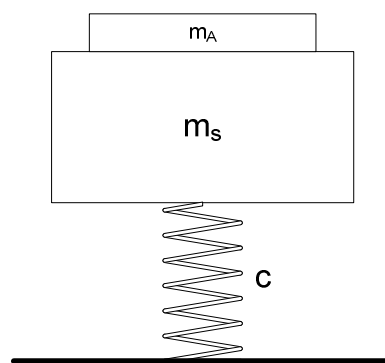


Abbildung 47: Darstellung der Shakerarmatur  $m_S$  mit der Aufspannplatte  $m_A$  als 1-Massenschwinger

In Abbildung 47 ist der erwähnte 1-Massenschwinger dargestellt. Die Masse der Shakerarmatur  $m_S$  beträgt laut Datenblatt 32,2 kg und die der Aufspannplatte  $m_A$  beträgt 2,6 kg. Durch den Zusammenhang

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m_S}} = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (6-8)$$

lässt sich die Eigenfrequenz der Shakerarmatur vereinfachend bestimmen. Bei Vernachlässigung der Dämpfung fällt die Eigenfrequenz und die Resonanzfrequenz zusammen wodurch der obige Ausdruck zu

$$c = \omega^2 \cdot m_S \quad (6-9)$$

System für die Kalibrierung von Beschleunigungssensoren nach dem  
Vergleichsverfahren

---

umgeformt werden kann. Betrachtet man nun das gesamte System von Shakerarmatur und Aufspannplatte gemeinsam, folgt aus Gleichung (6-9)

$$c = \omega^2 \cdot m_s = \omega_N \cdot (m_s + m_A) = 2 \cdot \pi \cdot f_N (m_s + m_A) \quad (6-10)$$

wobei  $f_N$  als Resonanz des Gesamtsystems betrachtet werden kann. Daher folgt für  $f_N$

$$f_N = f \sqrt{\frac{m_s}{m_s + m_A}} = 2397 \text{ Hz} \quad (6-11)$$

Das Ergebnis zeigt somit, dass die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems bestehend aus Shakerarmatur und Aufspannplatte um den Faktor 10 höher liegt als die betrachteten Frequenzen bei der Kalibrierung und somit diesbezüglich kein signifikanter Einfluss auf die Kalibrierung besteht. Es ist jedoch zu beachten, dass das verwendete Modell für die Einschätzung stark vereinfacht wurde. Es wurden die montierten Sensoren sowie die Verbindung zwischen Aufspannplatte und Shakerarmatur außer Acht gelassen. Sollte ein Verfahren in weiterer Folge in Betracht gezogen werden, welches Kalibrierungen bis zu einer Frequenz von >1000 Hz zulässt so ist ein neues detailliertes Modell zur Betrachtung der Eigenfrequenzen aufzustellen.

## **7. Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren**

### **7.1. Allgemeines**

Im Folgenden wird die Messunsicherheit bei der sinusförmigen Kalibrierung nach dem Vergleichsverfahren bestimmt. Als Referenzsensor dient hier ein Sensor des Typs QA700 der zuvor von einer akkreditierten Kalibrierstelle primärkalibriert wurde.

Die verwendeten Geräte für diesen Fall sind:

- Schwingungserreger - Data Physics GW-V2634 DSA5-15k
- Referenzsensor – Honeywell, QA700, SN 40164
- Kalibriergegenstand - Honeywell, QA700,
- Messverstärker – HBM, MGCplus
- Messverstärkereinschubplatten – ML801 (SN 114926023120), AP801 (SN 166671534)

Für die Aufstellung der Modellfunktion mussten die Einflussgrößen auf die Eingangsgrößen ermittelt werden. Dazu wurde als Hilfsmittel das Ishikawa - Diagramm verwendet.

Das Ishikawa – oder Ursache – Wirkungs – Diagramm ist eine sehr wirkungsvolle Methode zur Behebung von Problemen z.B. in Produktionsprozessen. Es kann aber auch bei der Fehlersuche in komplexen Problemstellungen oder zur Darstellung von Einflüssen auf Prozessabläufe eingesetzt werden. Die einzelnen möglichen Ursachen eines Problems werden dann im Rahmen eines Brainstormings gesammelt und an der Fischgrätstruktur aufgelistet [25].

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von  
Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

In der Nachfolgenden Abbildung ist das ermittelte Ishikawa – Diagramm für die sinusförmige Kalibrierung von Beschleunigungssensoren zu sehen.

## Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

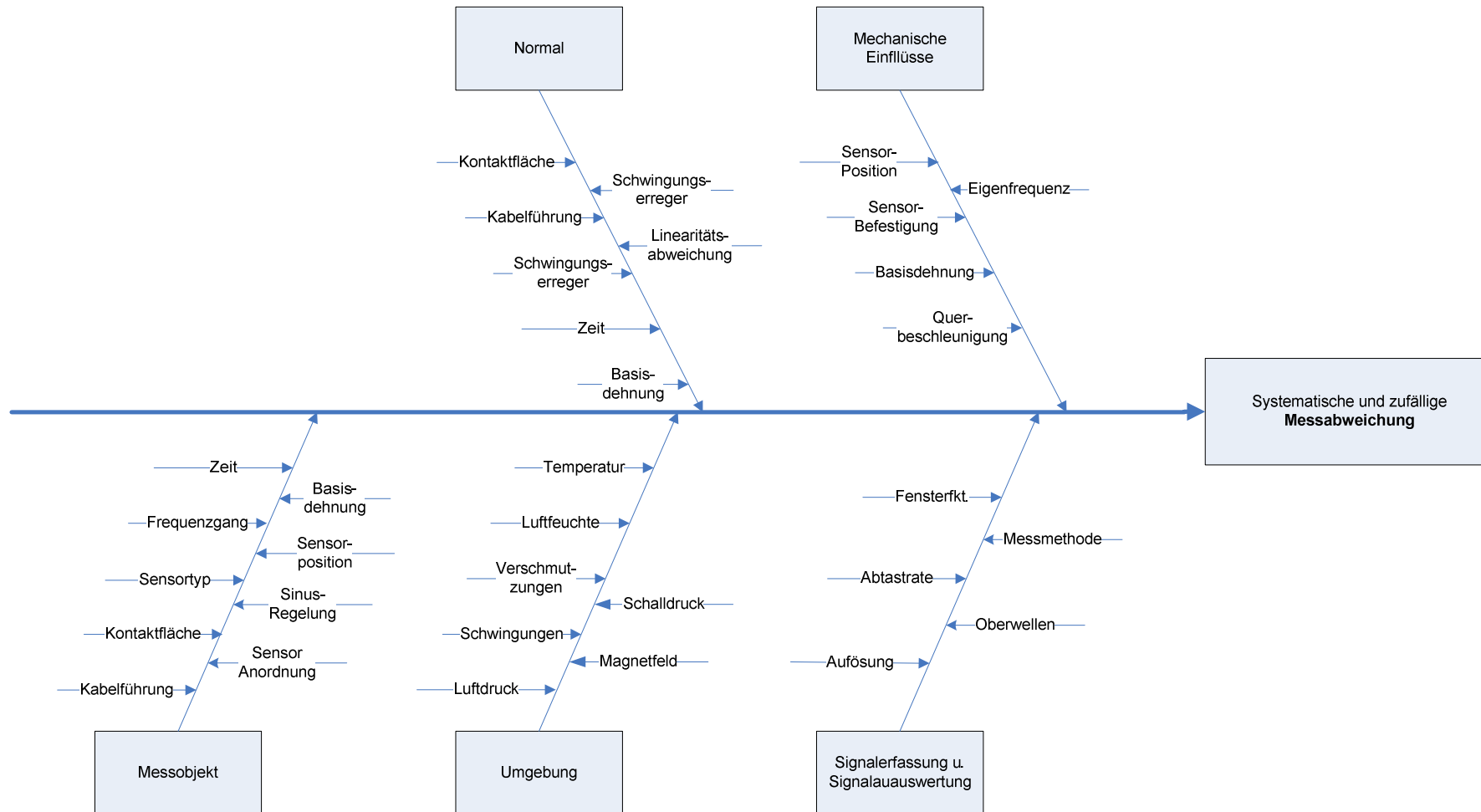


Abbildung 48: Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Ermittlung der Ursachen von Messabweichungen

## 7.2. Budgettabelle, allgemein

Hierbei werden in tabellarischer Form für alle Eingangsgrößen die wesentlichen Eigenschaften wie Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, Erwartungswert, Standardunsicherheit, Sensitivitätskoeffizient dargestellt. Daraus ist ersichtlich welchen Einfluss die Eingangsgrößen auf die erweiterte Messunsicherheit haben.

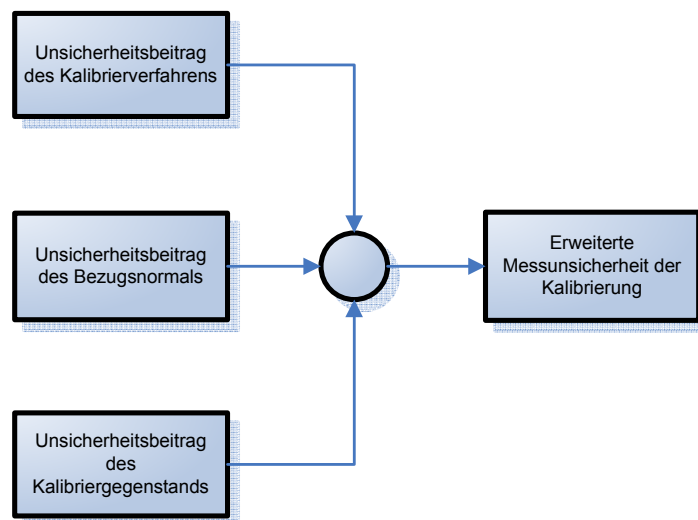


Abbildung 49: Einflüsse auf Messunsicherheitsbudget

Die Budgettabelle wurde nach dem Vorschlag der DKD – 3-1 Richtlinie bzw. der DIN ISO 16063-21 erstellt.



## Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

Nr.	Größe	Beschreibung	Relative Messunsicherheit $u(x_i)$ in %	Sensitivitätskoeffizient $c_i$	Relativer Unsicherheitsbeitrag $u_{rel,i}(y)$ in %	Varianz $u_{rel,i}(y)^2$
1	$S_1$	Übertragungskoeffizient des Referenzsensors	$u(S_1)$	1	$u_{S1}(S_2)$	$u_{S1}(S_2)^2$
2	$V_R$	Spannungsverhältnis der Verstärkerausgänge von KG-Verstärker und Bezugsnormal-Verstärker	$u(V_R)$	1	$u_{VR}(S_2)$	$u_{VR}(S_2)^2$
3	$K_{I,BN}$	Einflussfaktor zeitliche Instabilität des Bezugsnormal	$u(K_{I,BN})$	1	$u_{I,BN}(S_2)$	$u_{I,BN}(S_2)^2$
4	$K_{V1}$	Einflussfaktor zeitliche Instabilität des Bezugsnormal - Verstärkers	$u(K_{V1})$	1	$u_{V1}(S_2)$	$u_{V1}(S_2)^2$
5	$K_{V2}$	Einflussfaktor zeitliche Instabilität des Kalibriergegenstands - Verstärkers	$u(K_{V2})$	1	$u_{V2}(S_2)$	$u_{V2}(S_2)^2$
6	$K_T$	Einflussfaktor Temperatur der Sensoren	$u(K_T)$	1	$u_T(S_2)$	$u_T(S_2)^2$
7	$K_{QD}$	Einflussfaktor Querbewegung	$u(K_{QD})$	1	$u_{QD}(S_2)$	$u_{QD}(S_2)^2$
8	$K_{BD}$	Einflussfaktor Basisdehnung	$u(K_{BD})$	1	$u_{BD}(S_2)$	$u_{BD}(S_2)^2$
9	$K_{St}$	Einflussfaktor Signalstörung	$u(K_{St})$	1	$u_{St}(S_2)$	$u_{St}(S_2)^2$
10	$K_O$	Einfluss von Oberwellen	$u(K_O)$	1	$u_O(S_2)$	$u_O(S_2)^2$
11	$K_{Pos}$	Einflussfaktor Ankopplungsparameter (Kabel, Drehmoment)	$u(K_{pos})$	1	$u_{Pos}(S_2)$	$u_{Pos}(S_2)^2$
12	$K_{lin,R}$	Einfluss von Nichtlinearitäten des Referenzempfängers auf die Messung von $V_R$	$u(K_{lin,S})$	1	$u_{lin,S}(S_2)$	$u_{lin,S}(S_2)^2$
13	$K_{lin,V}$	Einfluss von Nichtlinearitäten des Signalverstärkers auf die Messung von $V_R$	$u(K_{lin,V})$	1	$u_{lin,V}(S_2)$	$u_{lin,V}(S_2)^2$
14	$K_{Mg}$	Einfluss des Magnetfeldes des Schwingungserregers auf die Messung	$u(K_{Mg})$	1	$u_{Mg}(S_2)$	$w_{Mg}(S_2)^2$
15	$K_{RE}$	Einfluss von Resteffekten auf die Messung von $V_R$ (z.B. zufallsbestimmte Effekte bei wiederholten Messungen)	$u(K_{RE})$	1	$u_{RE}(S_2)$	$u_{RE}(S_2)^2$

$$u(S_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_{rel,i}^2(y)}$$

Abbildung 50: Allgemeine Budgettabelle für die Ermittlung der relativen kombinierten Standardmessunsicherheit

## 7.3. Eingangsgroßen

### 7.3.1. Übertragungskoeffizient des Referenzsensors $S_1$

Der Referenzsensor des Typs QA700 mit der Seriennummer 40164 wurde von der Fa. Spektra Schwingungstechnik und Akustik GmbH entsprechend der Richtlinie ISO 16063-11 primär kalibriert. Der Sensor wurde dabei mit einer sinusförmigen Beschleunigung auf einem elektrodynamischen Schwingungserreger angeregt. Die Messung der Schwinggeschwindigkeit erfolgte mit einem Laservibrometer der Fa. Polytec.

Die ermittelte Übertragungsfunktion und die zugeordnete Messunsicherheit können dem Kalibrierschein (siehe Anhang 13.1) 0770-DKD-K-27801-2010-07 entnommen werden. Die Übertragungskoeffizienten sind stark Frequenzabhängig und daher wurde bei der Primärkalibrierung eine Vielzahl von Frequenzen zwischen 5 und 500 Hz betrachtet. Als Bezugsfrequenz dient jedoch der ermittelte Übertragungskoeffizient bei einer Beschleunigung von  $\hat{a} = 5 \text{ g}$  und bei einer Frequenz  $f = 80 \text{ Hz}$ . Dieser beträgt

$$S_1 = 33,924 \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2} \quad (7-1)$$

Dem Übertragungskoeffizient wird eine relative Gesamtmessunsicherheit von 0,5 % zugeordnet. Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  ergibt. Diese wurde vom Kalibrierlabor gemäß DKD 3 Richtlinie [7] ermittelt. Der Wert des Übertragungskoeffizienten liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Wertintervall.

Aus diesen Werten ergibt sich für den Referenzsensor eine relative Messunsicherheit von

$$u(S_1) = \frac{U(S_1)}{2} = \frac{0,5\%}{2} = 0,25\% \quad (7-2)$$

Diese relative Messunsicherheit gilt jedoch nur für die im 0770-DKD-K-27801-2010-07 [30] angegebenen Frequenzen und dem dazugehörigen

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

Sensitivitätskoeffizienten. In der Auswertung der Kalibrierung wird dies berücksichtigt, indem bei jeder betrachteten Frequenz der bei der Primärkalibrierung ermittelte Sensitivitätskoeffizient verwendet wird.

### 7.3.2. Zeitliche Instabilität der Sensoren $K_{I,BNG}$

Honeywell gibt für den Servo – Beschleunigungssensor im Datenblatt für den Sensortyp QA700 eine Langzeitstabilität von <0,12 % pro Jahr an. Da noch keine Kalibrierdaten aus anderen Jahren vorliegen geht der im Datenblatt angegebene Wert in die Berechnung der Messunsicherheit ein.

Aufgrund der Angaben aus dem Datenblatt wurde eine Grenzwert von

$$u_{I,BN,KG} = 0,12\% / \text{Jahr} \quad (7-3)$$

angenommen. Unter der Voraussetzung einer symmetrischen Rechteck-Verteilung und einer Re-Kalibrierfrist von zwei Jahren ergibt sich als relative Standardunsicherheit:

$$u(K_{I,BN}) = \frac{u_{I,Sn}}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 0,12\%}{\sqrt{3}} = 0,139\% \quad (7-4)$$

### 7.3.3. Verstärker-Übertragungskoeffizienten $V_R$

Als Schnittstelle zwischen Aufnehmer und anzeigenden Geräten haben Messverstärker die Aufgaben, die Ausgangssignale der Aufnehmer, ohne sie zu verfälschen, leistungsmäßig zu verstärken und ein geeignetes Signal für die nachfolgend angeschlossenen Geräte zu liefern. Bei passiven Aufnehmern müssen sie auch eine geeignete und stabile Betriebsspannung liefern. Außerdem besitzen sie häufig viele weitere Funktionen wie Filter, Brückenabgleich, oder Übersteuerungsanzeige. Die Grundlage der Messverstärker bilden Operationsverstärker, deren Ausgangssignale durch die Eingangssignale in

## Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

Verbindung mit verschiedenen äußeren Beschaltungen auf eine gewünschte Art beeinflusst werden [23].

Der Übertragungskoeffizient eines Verstärkers hängt u. a. von der Höhe und dem zeitlichen Verlauf der Eingangssignale ab. Um diese Einflüsse gering zu halten, sollten die Verstärker in einem linearen Bereich ihres Frequenzgangs betrieben werden. Des Weiteren führen Exemplarstreuungen zu Unterschiedlichen Abweichungen der realen von den nominellen Übertragungskoeffizienten. Daher sollten die Verstärker für genaue Messungen unter Messbedingungen kalibriert werden [23].

Die Verstärkereinschubkarten werden mit einem treppenförmigen Signal (0 bis +10 V und 0 bis -10 V) alle zwei Jahre kalibriert. Als Referenz wird dabei der Precision Calibrator 726 der Fa. Fluke verwendet. Dieser wird vom ÖKD in den geforderten Abständen kalibriert.

Die Messkette der Kalibrierung ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich.

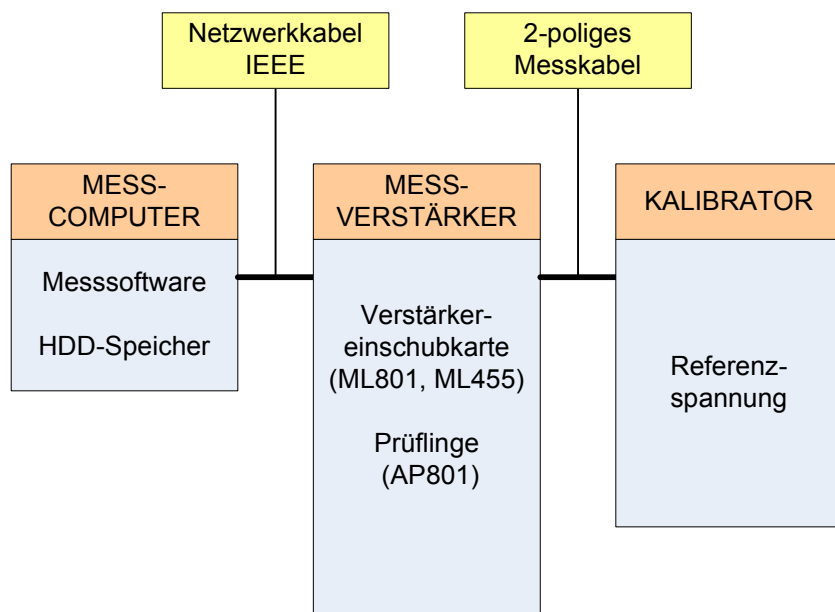


Abbildung 51: Messkette bei der Kalibrierung der Verstärkereinschubkarten

Die erweiterte Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Einschubkarten beträgt laut Kalibrierschein

## Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

$$U(S_A) \leq 0,06\% \quad (7-5)$$

Die angegebene erweiterte Messunsicherheit ergibt sich durch Multiplikation der Standardmessunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ .

Als Beitrag zum Messunsicherheitsbudget ergibt sich die relative Standardmessunsicherheit der Verstärkereinschubkarten zu:

$$u(S_A) = \frac{U(S_A)}{2} = \frac{0,06\%}{2} = 0,03\% \quad (7-6)$$

Da für die Kalibrierung je eine Verstärkereinschubkarte für den Referenzsensor und eine für den Kalibriergegenstand notwendig ist muss dies im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

### **7.3.4. Zeitliche Instabilität der Verstärker Übertragungskoeffizienten**

#### **K<sub>V1</sub>**

Wie bei Beschleunigungsaufnehmern können sich bei den Messverstärkern die Eigenschaften der verwendeten Bauteile mit der Zeit geringfügig verändern und damit eine Änderung der Verstärker-Übertragungskoeffizienten verursachen [23].

Als Messverstärkersystem wird das in Kapitel 6.6 beschriebene MGC+ von HBM mit der Einschubkombination ML801 / AP801 verwendet. Es gibt keine Datenblattangaben der Fa. HBM über die zeitliche Instabilität und es existieren auch noch keine langfristigen vergleichbaren Kalibrierergebnisse. Daher wird hier auf die Erkenntnisse aus der Dissertation „Stoßförmige Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren“ (siehe [23]) zurückgegriffen. Diese unterscheidet jedoch zwischen Normal – Verstärker und Kalibriergegenstand – Verstärker, was in diesem Fall nicht zutrifft da sowohl für den Referenzsensor als auch für den Kalibriergegenstand als Messverstärkersystem dasselbe Produkt verwendet wird.

Somit wird für den Messverstärker

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von  
Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

$$u_{I,V_1} = 0,1\% / \text{Jahr} \quad (7-7)$$

$$u_{I,V_2} = 0,1\% / \text{Jahr} \quad (7-8)$$

angesetzt. Es wird hier zwar zwischen Messverstärker für das Bezugsnormale bzw. den Kalibriergegenstand unterschieden, jedoch nur weil eine Mehrkanal – Einschubkarte bis zu acht Messkanäle besitzt und bis zu acht Sensoren gleichzeitig geprüft werden können und somit eine zweite Einschubkarte notwendig ist.

Unter der Voraussetzung einer Rechteck – Verteilung und einer Kalibrierung alle zwei Jahre für den Verstärker ergibt sich für die zeitliche Instabilität als relative Standardunsicherheit:

$$u(K_{I,V_1}) = \frac{u_{I,V_1}}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 0,1\%}{\sqrt{3}} = 0,115\% \quad (7-9)$$

$$u(K_{I,V_2}) = \frac{u_{I,V_2}}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 0,1\%}{\sqrt{3}} = 0,115\% \quad (7-10)$$

### 7.3.5. Temperatureinfluss der Sensoren $K_T$

Bei der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren gibt es unter anderem einen Temperatureinfluss, weil der Übertragungskoeffizient von der Temperatur abhängig ist. Bei den verwendeten Sensoren (QA700) ist laut Datenblatt eine Temperatur–Sensitivität von 0,02 %/°C gegeben. Geht man von einem maximalen Temperaturunterschied von  $\pm 5$  °C der Umgebungstemperatur bei der Kalibrierung gegenüber der Temperatur bei der Primärkalibrierung aus, errechnet sich die Höhe der Abweichung aus dem Produkt des Temperaturunterschieds und der Empfindlichkeit des Sensortyps gegenüber Temperaturänderung. Damit ergibt sich für die Abweichung bei Annahme einer Rechteckverteilung eine relative Spanne von

$$u_{T_1} = \Delta T * E_{T,S} = \pm 5 \cdot 0,02 = \pm 0,1\% \quad (7-11)$$

und eine Standardmessunsicherheit von

$$u(K_{I,T}) = \frac{u_T}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 0,1\%}{\sqrt{3}} = 0,115\% \quad (7-12)$$

Da dies sowohl für den Referenzsensor als auch für den Kalibriergegenstand gilt muss die Standardmessunsicherheit im Messunsicherheitsbudget doppelt berücksichtigt werden. Es wird davon ausgegangen, dass zwischen dem Bezugsnorm und dem Kalibriergegenstand kein Temperaturunterschied besteht. Dieser mögliche Einfluss wird im Messunsicherheitsbudget daher nicht berücksichtigt.

### 7.3.6. Einflussfaktor der Querbewegung $K_{QD}$

Beschleunigungssensoren besitzen wie in Kapitel 6.3.2.1 beschrieben eine Querbeschleunigungsempfindlichkeit  $E_{\%Qmax}$ , die in Kombination mit den Querbewegungen (Querbeschleunigungen  $\hat{a}_{QD}$ ) des Schwingerregers zu Messabweichungen bei der Ermittlung des Übertragungskoeffizienten führen. Die Messabweichungskomponente kann somit wie folgt beschrieben werden:

$$e_{QD} = E_{\%Q} \cdot \hat{a}_{QD} = E_{\%Qmax} \cdot \hat{a}_{QD,max} \cdot \cos \beta \quad (7-13)$$

Wobei  $\beta$  wie bereits in Kapitel 6.3.2.1 beschrieben, der Winkel zwischen der Richtung der maximalen Querempfindlichkeit  $E_{\%Qmax}$  und der Richtung der Queranregung ist. Da aber der Winkel  $\beta$  unbekannt ist kann laut [5] eine Gleichverteilung von  $\beta$  im Intervall  $[-\pi; \pi]$  angenommen werden. Die Einflussgröße  $K_{QD}$  führt, wie in [5] beschrieben mit rechteckverteilterm Phasenwinkel  $\beta$  zu der Messabweichungskomponente  $e_{QD}$  und deren Wahrscheinlichkeitsdichte durch

$$p(e_{QD}) = \frac{1}{b\pi \sqrt{1 - \left(\frac{e_{QD}}{b}\right)^2}} \quad (7-14)$$

mit  $-b < e_{QD} < b$  und  $b = E_{\%Qmax} \cdot \hat{a}_{QDmax}$  beschrieben wird. Um diesen Beitrag möglichst konservativ in die Messunsicherheitsbetrachtung einfließen zu lassen, wird als maximale Querbeschleunigung die bei den Versuchen aufgetretene

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von  
Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

maximale Querschleunigung plus 10% Reserve angesetzt. Der zugehörige relative Unsicherheitsbeitrag ist somit

$$u(K_{QD,BN,KG}) = \frac{b}{\sqrt{2}} = \frac{E_{\%Qmax} \cdot (1,1 \cdot \hat{a}_{QDmax})}{\sqrt{2}} \quad (7-15)$$

Diese Zusammenhänge gelten sowohl für den Kalibriergegenstand als auch für den Referenzsensor.

$$u(K_{QD,KG}) = \frac{E_{\%Qmax,KG} \cdot \hat{a}_{QDmax}}{\sqrt{2}} = \frac{0,03 \cdot 1,1 \cdot 0,0613}{\sqrt{2}} = 0,14\% \quad (7-16)$$

$$u(K_{QD,BN}) = \frac{E_{\%Qmax,BN} \cdot \hat{a}_{QDmax}}{\sqrt{2}} = \frac{0,002 \cdot 1,1 \cdot 0,0613}{\sqrt{2}} = 0,01\% \quad (7-17)$$

Für den Schätzwert des in Gleichung (5-13) einzusetzenden Einflussfaktor gilt

$$K_{QD} = (1 - e_{QD,BN} + e_{QD,KG}) = 1 \quad (7-18)$$

da die Schätzwerte  $e_{QD,BN}$  und  $e_{QD,KG}$  gleich null sind. Der zugehörige Messunsicherheitsanteil beträgt

$$u(K_{QD}) = \sqrt{u(K_{QD,BN})^2 + u(K_{QD,KG})^2} = 0,14\% \quad (7-19)$$

Diese relative Messunsicherheit gilt bei der max. auftretenden Querschleunigung die durch Messungen ermittelt wurde. Die minimal auftretende Messunsicherheit würde nach Berechnung gemäß Formel (7-15) einen Wert von  $u(K_{QD})_{min} = 0,1\%$  ergeben. Daraus folgt, dass keine Einschränkungen für die Anordnung der Prüflinge auf der Aufnehmerplatte getroffen werden müssen, da der Beitrag an der relativen Gesamtmessunsicherheit eher gering gegenüber anderen Einflüssen ist.

### 7.3.7. Einflussfaktor Basisdehnung $K_{BD}$

Wird die Befestigungsfläche eines Beschleunigungssensors z. B. durch eine Biegebeanspruchung gedehnt oder gestaucht, so wird im Sensor in Abhängigkeit



## Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

von der Bauweise ein Ausgangssignal erzeugt, welches eine nicht vorhandene Beschleunigung vortäuscht. In welcher Höhe die Basisdehnung den eigentlichen Messwert verfälscht, hängt einerseits von der maximalen Basisdehnungsempfindlichkeit des Beschleunigungssensors, andererseits von der in Richtung der maximalen Basisdehnungsempfindlichkeit wirkenden Dehnung ab [16].

Piezoresistive und Piezoelektrische Beschleunigungssensoren geben ein Ausgangssignal ab obwohl keine Beschleunigung vorliegt. Diese Beschleunigung ergibt sich aus der Basisdehnungsempfindlichkeit dieser Sensoren bei wirkender Dehnung. Da die Fa. PJM ausschließlich Kapazitive und Servo Beschleunigungssensoren einsetzt und diese Typen keine Basisdehnungsempfindlichkeit aufweisen ist keine Berücksichtigung im Messunsicherheitsbudget notwendig. Sollen in späterer Folge Piezoresistive oder Piezoelektrische Sensoren kalibriert werden so ist der Einfluss der Basisdehnung dann zu berücksichtigen.

### 7.3.8. Einflussfaktor Signalstörungen $K_{St}$

Bei der Kalibrierung können natürlich störende Einflüsse in die Messung eingehen. Diese störenden Einflüsse können sein:

- Resonanzen am Messaufbau
- Schlecht befestigte Kabel
- Masseschleifen und Einstreuungen aller Art (Rauschen, Brummen, usw.) durch schlecht verlegte Kabel

Teile dieser Störungen wie z.B. das Rauschen können durch geeignete Maßnahmen wie etwa durch Tiefpassfilterung oder das Verhindern von Masseschleifen verringert werden. Da diese Effekte nicht restlos verhindert werden können wird als Einfluss für die relative Standardmessunsicherheit der Signalstörungen der folgende Wert geschätzt.

$$u_{St} = 0,3\% \quad (7-20)$$

Daraus ergibt sich bei Annahme einer symmetrischen Rechteckverteilung ein relativer Unsicherheitsbeitrag von

$$u(K_{st}) = \frac{0,3\%}{\sqrt{3}} = 0,173\% \quad (7-21)$$

### 7.3.9. Einfluss von Oberwellen $K_o$

Ein weiterer wichtiger störender Einfluss der in die Messung eingeht sind Oberwellen. Wesentlicher Einfluss für die Entstehung von Oberwellen sind die mechanischen Eigenschaften der Führungseinrichtungen des Schwingerregers. Durch spezielle Ausführungen der Führungen des Zylinders kann die Entstehung von Oberwellen verringert werden. Der Klirrfaktor gibt Aufschluss in welchem Ausmaß Oberwellen vorhanden sind und ist definiert als Verhältnis der Effektivwerte der Oberwellen zum Effektivwert des Gesamtsignals.

$$k_L = \sqrt{\frac{\hat{U}_{1,2}^2 + \hat{U}_{1,3}^2 + \hat{U}_{1,4}^2 + \dots}{\hat{U}_{1,1}^2 + \hat{U}_{1,2}^2 + \hat{U}_{1,3}^2 + \hat{U}_{1,4}^2 + \dots}} \cdot 100 \quad (7-22)$$

Dabei bezeichnen:

$\hat{U}_{1,1} \dots$  Amplitude der Grundwelle des Referenzsensors (in V)

$\hat{U}_{1,2}, \hat{U}_{1,3} \dots$ : Amplituden der Oberwellen des Referenzsensors (in V)

Diese Oberwellen zeigen ein verzerrtes Bild des Grundsignals und müssen somit entweder als relative Messunsicherheit berücksichtigt oder rechnerisch eliminiert werden. Diese Art Signalaufbereitung ist heute im Postprocessing durchaus üblich und wird in diesem Fall auch bei der Datenauswertung angewandt, indem eine Fourier-Transformation auf das betrachtete Messsignalintervall angewandt wird und somit die maximal auftretende Amplitude der betrachteten Frequenz ohne die Anteile der überlagerten Oberwellen betrachtet werden kann. Detaillierte Informationen über die Ermittlung der tatsächlich auftretenden maximalen Amplitude bei der betrachteten Frequenz sind in Kapitel 8.1 näher beschrieben.

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von  
Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

Obwohl dieser Einfluss somit weitgehend eliminiert wird, wird für die in Kapitel 8.1 beschriebenen Unzulänglichkeiten in der Berechnung der Fourier-Transformation eine relative Standardmessunsicherheit von

$$u_o = 0,2\% \quad (7-23)$$

abgeschätzt. Unter Annahme einer symmetrischen Rechteck-Verteilung ergibt sich ein relativer Unsicherheitsbeitrag von

$$u(K_o) = \frac{0,2\%}{\sqrt{3}} = 0,115\% \quad (7-24)$$

### 7.3.10. Einflussfaktor der Ankopplungsparameter $K_{Pos}$

Die Ankopplungsflächen (Ebenheit und Rauheit) sollten wie in DIN ISO 16063-21 Kapitel 4.4 gefordert ausgeführt sein. Zusätzlich müssen alle Montagehinweise der Arbeitsanweisung wie z.B. Montagedrehmoment oder Kabelführung eingehalten werden. Die Bedingungen die bei der Montage der Sensoren eingehalten werden müssen sind in Kapitel 8.2 beschrieben. Der Einfluss auf die Messunsicherheit wird für die Ankopplung des Prüflings und des Referenzsensor in Summe mit einer relativen Messunsicherheit ( $k = 2$ ) von

$$u_{Pos} \leq 0,05\% \quad (7-25)$$

abgeschätzt. Die Höhe der abgeschätzten relativen Messunsicherheit wurde aus der DIN ISO 16063-21 Tabelle D1 „Einfluss von Ankopplungsparametern“ übernommen, da in diesem Fall von den selben Ankopplungsvoraussetzungen ausgegangen wird. Unter Annahme einer symmetrischen Rechteck-Verteilung ergibt sich ein relativer Unsicherheitsbeitrag von

$$u(K_{Pos}) = \frac{2 * 0,05\%}{\sqrt{3}} = 0,058\% \quad (7-26)$$

### 7.3.11. Einfluss von Nichtlinearitäten des Referenzsensors $K_{lin, R}$

Bei der Kalibrierung von Beschleunigungssensoren wird der Übertragungskoeffizient des Prüflings in Abhängigkeit von der Höhe der

## Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

Beschleunigung ermittelt. Die Übertragungskoeffizienten bei unterschiedlichen Beschleunigungen liegen meist nur angenähert auf einer Geraden. Um zu einem einzigen Übertragungskoeffizient zu kommen, wird ein linearer Ausgleich durchgeführt. Ein Kennwert für die Unzulänglichkeiten von Sensoren ist die Linearitätsabweichung. Die Linearitätsabweichung beschreibt die Abweichung des Ausgangssignals von der Bezugsgeraden, und wird meist in % angegeben.

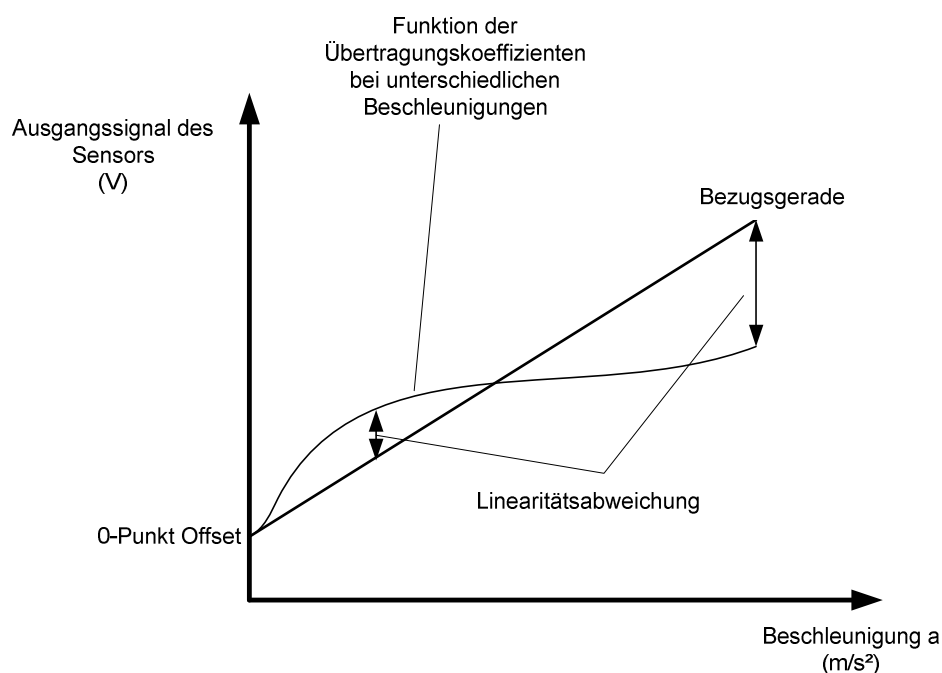


Abbildung 52: Linearitätsabweichung von der Funktion der Übertragungskoeffizienten bei unterschiedlichen Beschleunigungen

Weiters ändert sich der Übertragungskoeffizient bei gleicher Beschleunigung in Abhängigkeit von der Frequenz. Wodurch der Frequenzgang ebenfalls keine Gerade aufweisen wird (siehe Abbildung 42).

Der Kalibrierschein 0770-DKD-K-27801-2010-07 [30] der Primär-Kalibrierung enthält die Übertragungskoeffizienten für alle betrachteten Frequenzen. Diese werden in der Auswerteroutine für die Auswertung und Erstellung des Kalibrierscheins entsprechend berücksichtigt. Dafür werden die bei der Primär-

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von  
Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

---

Kalibrierung ermittelten Übertragungskoeffizienten in der Auswerterroutine hinterlegt.

Somit kann der Einfluss der Nichtlinearität verkleinert werden. Als minimal anzusetzender Wert bleibt die relative Gesamtmessunsicherheit bei der Primärkalibrierung des Referenzsensors und muss somit aus dem Kalibrierschein 0770-DKD-K-27801-2010-07 [30] entnommen werden.

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  ergibt.

Aus diesen Werten ergibt sich für den Referenzsensor eine relative Messunsicherheit von

$$u(K_{lin,R}) = \frac{U(a_{lin,R})}{2} = \frac{0,5\%}{2} = 0,25\% \quad (7-27)$$

### 7.3.12. Einfluss von Nichtlinearitäten des Messverstärkers $K_{lin,v}$

Laut Datenblatt von HBM arbeitet die Kombination der Verstärkereinschubkarten ML801 / AP801 mit einer Linearitätsabweichung  $<0,03\%$ . Da für die Kalibrierung zwei Kartenpaare notwendig sind ergibt sich eine gesamt Linearitätsabweichung von max.  $0,06\%$ . Unter Voraussetzung einer symmetrischen Rechteck-Verteilung ergibt sich also eine relative Standardmessunsicherheit von:

$$w(K_{lin,v}) = \frac{u_{lin,v}}{\sqrt{3}} = \frac{0,06}{\sqrt{3}} = 0,035\% \quad (7-28)$$

### 7.3.13. Einfluss des Magnetfeldes des Schwingungserregers auf die Messung $K_{MG}$

Beschleunigungsaufnehmer reagieren grundsätzlich auf Magnetfelder. Quellen dieser Magnetfelder können neben dem Magnetfeld des Schwingungserregers

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

auch andere Anlagen, Computer oder Bildschirme in der Nähe sein. Sowohl für die Sensoren des Typs Q-Flex als auch für die Sensoren des Typs PJM-LN sind keine Informationen über den Einfluss von Magnetfeldern auf den Sensor verfügbar. Daher wird dem Vorschlag der DIN ISO 16063-21 gefolgt und eine relative Messunsicherheit von

$$u_{Mg} = 0,03\% \quad (7-29)$$

angenommen. Daraus ergibt sich ein relativer Unsicherheitsbeitrag bei einer angenommenen Rechteckverteilung von

$$u(K_{Mg}) = \frac{0,03\%}{\sqrt{3}} = 0,017\% \quad (7-30)$$

#### 7.3.14. Einfluss von Resteffekten $K_{RE}$

Unter diesem Punkt wurden alle Einflüsse zusammengefasst, die nur schwer quantifizierbar bzw. vernachlässigbar sind. Dazu gehören unter anderem zufallsbestimmte Effekte bei wiederholten Messungen oder die Auswirkung der übrigen Umgebungseinflüsse (Verschmutzungen, Schwingungen, Luftdruck, ...).

Ein Anteil für das Messunsicherheitsbudget aufgrund dieser Einflüsse wird mit einer relativen Messunsicherheit von

$$u_{RE} = 0,3\% \quad (7-31)$$

gewertet. Dies ergibt einen Unsicherheitsbeitrag bei angenommener Rechteckverteilung von:

$$u(K_{RE}) = \frac{0,3\%}{\sqrt{3}} = 0,173\% \quad (7-32)$$

Der Wert wird deutlich höher eingeschätzt als in der DIN ISO 16063-21 da das Kalibriersystem nicht in einem Labor sondern in einer Prüfhalle aufgestellt ist.

#### **7.4. Messunsicherheitsbudget bei der Kalibrierung**

Nachdem alle nötigen Informationen über die Eingangsgrößen ermittelt wurden können diese nun in die Budgettabelle eingetragen werden. Durch kombinieren der einzelnen Unsicherheitsbeiträge kann nun die kombinierte Standardunsicherheit bestimmt werden. Tabelle 9 zeigt das Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung der Beschleunigungssensoren. Weiters wird in der Tabelle die erweiterte Messunsicherheit  $U$  berechnet, die ein Wertintervall angibt das den Wert der gemessenen Größe mit hoher Wahrscheinlichkeit überdeckt.

Die erweiterte Messunsicherheit errechnet sich dabei durch Multiplikation der relativen kombinierten Messunsicherheit  $u(S_2)$  mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ . Standardmäßig ist laut [12] der Erweiterungsfaktor mit  $k = 2$  zu wählen, wenn der Messgröße eine Normalverteilung zugeordnet werden kann und die dem Schätzwert der Ergebnisgröße beigeordnete Standardmessunsicherheit ausreichend zuverlässig ist. Diese Bedingungen werden i.a. bei Kalibrierungen erfüllt. [12]

Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Beschleunigungsverfahren nach dem Vergleichsverfahren

Nr.	Größe $X_i$	Schätzwert $x_i$	Relative erweiterte Messunsicherheit $u(x_i)\%$	Verteilung	Teilung	Sensitivitätskoeffizient $c_i$	Relativer Unsicherheitsbeitrag $u_{rel,i}(y)\%$	Varianz $u_{rel,i}(y)^2$
1	$S_1$	33,924 [mV/ms <sup>-2</sup> ]	0,50	Normal	2	1,000	0,250	0,063
2	$V_R=V_2/V_1$	1	0,06	Normal	2	1,000	0,030	0,001
3	$K_{I,BN}$	1	0,24	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,139	0,019
4	$K_{V1}$	1	0,20	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,115	0,013
5	$K_{V2}$	1	0,20	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,115	0,013
6	$K_T$	1	0,10	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,115	0,013
7	$K_{QD}$	1	0,20	U-förmig	$\sqrt{1}$	1,000	0,140	0,020
8	$K_{BD}$	1	0,00	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,000	0,000
9	$K_{St}$	1	0,30	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,173	0,030
10	$K_O$	1	0,20	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,115	0,013
11	$K_{Pos}$	1	0,10	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,058	0,003
12	$K_{lin,R}$	1	0,50	Normal	2	1,000	0,250	0,063
13	$K_{lin,V}$	1	0,06	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,035	0,001
14	$K_{Mg}^{1)}$	1	0,03	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,017	0,000
15	$K_{RE}^{1)}$	1	0,30	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,000	0,173	0,030
							$\sum_{i=1}^N u_{rel,i}^2$	0,283
						$u(S_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_{rel,i}^2}$	0,532	
$U(S_2) = k * u(S_2)$						1,1 %	mit k=2	

Tabelle 9: Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung



Im Kalibrierschein ist laut [7] das vollständige Messergebnis anzugeben. Es besteht aus dem Schätzwert  $y$  der Messgröße und der beigeordneten erweiterten Messunsicherheit  $U$  und ist in folgender Form anzugeben:  $y \pm U$

Die erweiterte Messunsicherheit wird dabei wie erwähnt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  ermittelt, was einem Grad des Vertrauens (Überdeckungswahrscheinlichkeit) von 95% entspricht. Im Kalibrierschein ist die Angabe des vollständigen Messergebnisses laut [12] mit der folgenden Anmerkung zu versehen:

Die angegebene erweiterte Messunsicherheit ist das Produkt der Standardmessunsicherheit und dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ . Sie entspricht bei einer Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95%. Die Standardmessunsicherheit ist gemäß EAL-R2 [13] ermittelt worden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Einflüsse gemäß dem Vorschlag des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) und der ISO 16063-21 (Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger) in einem Messunsicherheitsbudget zusammengefasst wurden. Auf diese Weise wurde ein Wert von 1,1% für die kleinste, angebbare erweiterte Messunsicherheit die dem ermittelten Übertragungskoeffizienten der betrachteten Sensorentypen zugeordnet werden kann ermittelt.

## 8. Kalibrierung eines Beschleunigungssensors

### 8.1. Auswertung der Messsignale

Die Signalauswertung im Frequenzbereich ist ein wichtiger Punkt für die Auswertung periodischer Messsignale. Daher wird nachfolgend kurz auf die Berechnung von diskreten Spektren mit Hilfe der Fourier-Transformation eingegangen.

#### 8.1.1. Signalauswertung im Frequenzbereich

Bei der Messdatenaufzeichnung werden die Messsignale bei der Digitalisierung zeitlich abgetastet und wertquantisiert gespeichert. Für die Erstellung von Spektren aus Messsignalen muss eine Fourier-Analyse durchgeführt werden. Je nach den Eigenschaften der Signale stehen unterschiedliche Varianten für die Analyse zur Verfügung. Da im Falle der Kalibrierung ein diskretes, endliches und periodisches Signal auftritt ist die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) anzuwenden. Berechnet wird die DFT meist mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT). Für die Berechnung der DFT stehen neben Fast-Fourier-Transformation (FFT) Algorithmen prinzipiell auch andere Algorithmen wie z.B. Winograd-Algorithmus oder Goertzel-Algorithmus zur Verfügung.

Bei DFT Auswertungen tritt sehr oft ein Phänomen das man als „Leakage“ bezeichnet auf. Darunter versteht man die Verbreiterung der Spektrallinien und das Auftauchen von Seitenbändern. Bei der DFT Auswertung wird ein diskretes Spektrum berechnet, was bedeutet, dass das Spektrum nur für diskrete Frequenzwerte berechnet wird. Das sind alle die Frequenzen, bei denen eine ganze Anzahl von Perioden innerhalb des Berechnungsintervalls liegt. Ein wichtiges Prinzip in diesem Zusammenhang ist, dass ein diskretes Spektrum das Spektrum eines periodischen Signals ist. Bei der Berechnung des diskreten Spektrums eines Signals mit Hilfe der DFT wird das Signal so interpretiert, als wäre es unendlich oft nach vorn und hinten aneinandergereiht.

Bei einem sinusförmigen Signal mit keiner ganzen Anzahl von Perioden ergibt sich je nach Fensterlänge eine Unstetigkeit oder ein Sprung zwischen Ende und Anfang des Signals (siehe Abbildung 54). Das dadurch entstandene erweiterte Signal ist somit nicht mehr harmonisch (die mittlere Spalte zeigt das Signal im Rechteckfenster plus eine Wiederholung – es gibt unendlich viele Wiederholungen in positiver wie negativer Richtung). Dies führt zu dem erwähnten Leakage Phänomen. D.h. das Spektrum enthält neben der Hauptfrequenz  $f_0$  auch andere Frequenzen (siehe Abbildung 54 rechts).

Wird ein bei einem sinusförmiges Signal mit einer ganzen Anzahl von Perioden innerhalb des Berechnungsintervalls das Spektrum mit Hilfe der FFT ermittelt so tritt im Spektrum für das harmonische Signal ein einzelner Wert größer Null auf (einzelner Spitzenwert – Peak, siehe Abbildung 53) und der Leakage Effekt tritt somit nicht auf.

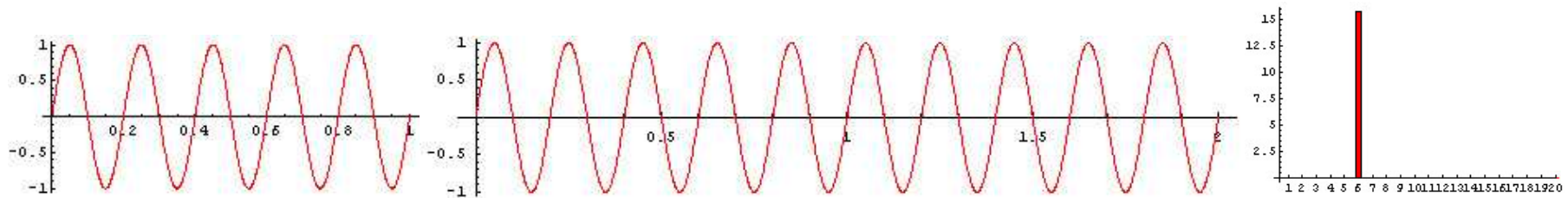


Abbildung 53: Ausgangsmesssignal (links) wird durch FFT periodisch wiederholt (rechts); die untere Ansicht zeigt das Spektrum des Ausgangsmesssignals [33]

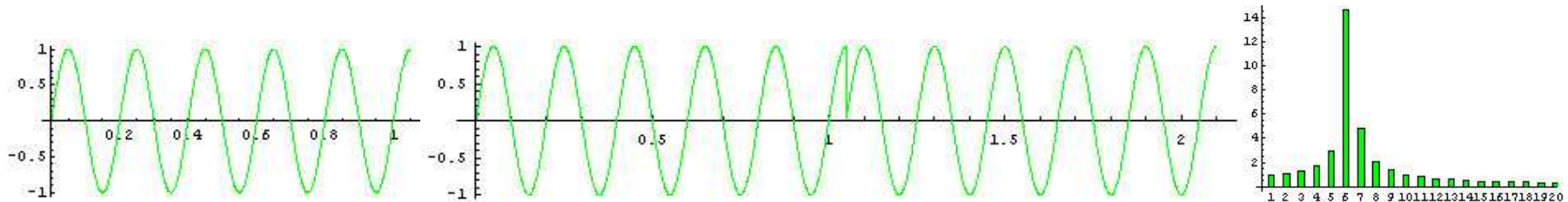


Abbildung 54: Ausgangsmesssignal (links) wird durch FFT periodisch wiederholt (rechts) jedoch tritt in diesem Fall eine Unstetigkeit durch die Fensterlänge auf wodurch neben der Hauptfrequenz auch andere Frequenzen im Spektrum (unten) auftreten [33]

Um das Leakage Phänomen zu vermindern, besteht die Möglichkeit das Messsignal mit einer Gewichtungsfunktion zu multiplizieren. Als Gewichtungsfunktion, auch als Fensterfunktion bekannt, steht eine Reihe von Funktionen zur Verfügung (z.B. Rechteck-, Dreieck-, Gauß'sches- oder Hamming-Fenster), die die Werte des Messsignals unterschiedlich stark gewichten. Berechnet man die Fourier-Transformation der gewichteten Daten, so sieht man, dass die Spektrallinien wieder schmaler werden. In den beiden nachfolgenden Abbildungen ist sowohl die Hamming- als auch die Rechteck-Fensterfunktion dargestellt.

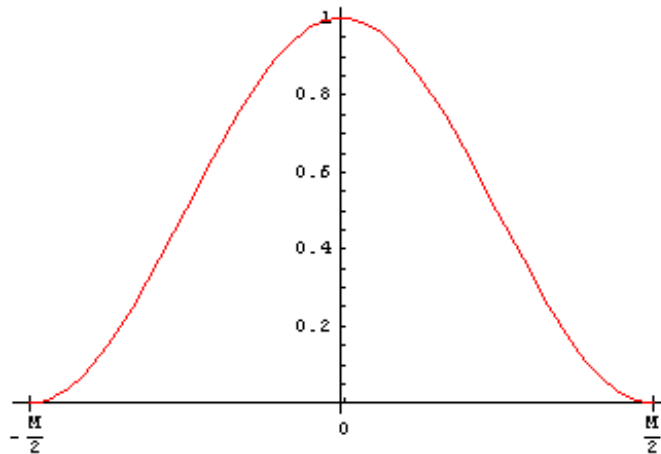


Abbildung 55: Graphische Darstellung der Hamming-Fensterfunktion

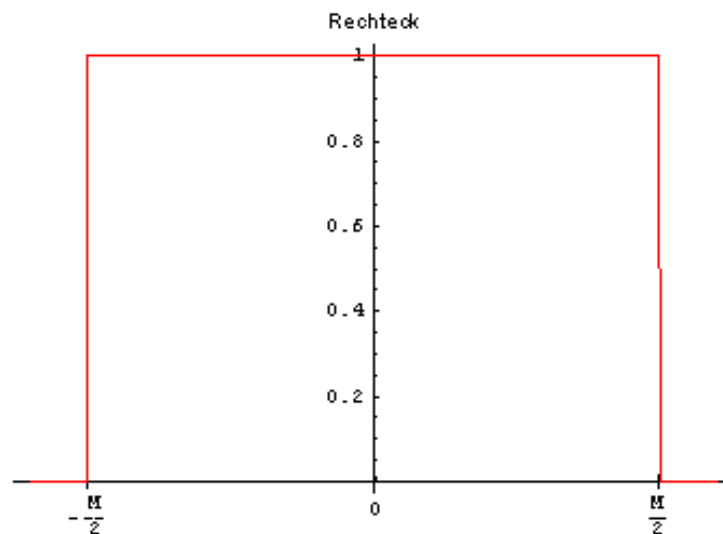


Abbildung 56: Graphische Darstellung der Rechteck-Fensterfunktion

### **8.1.2. Signalauswertung bei der Kalibrierung**

Im Regelkreis wird ein zuvor definiertes Sinussignal an den Prüfling angelegt, auf das dann nach Testablaufplan in Echtzeit geregelt wird. Der Testablaufplan besteht aus mehreren Kalibrierschritten mit definierten, konstanten Signalparametern (sinusförmige Signalform, Frequenz  $f$ , Amplitude  $A$ , und Dauer). Die gesamte Kalibrierung wird in einem Experiment durch sequentielles Abfahren aller Testschritte durchgeführt. Das Sinussignal hat für den jeweiligen Kalibrierschritt die festgelegte Frequenz und Beschleunigungsamplituden (siehe Tabelle 3). Die Frequenz bzw. Beschleunigungsamplitude des Sinussignals wird gemäß dem Testlaufplan geregelt. Für die Ermittlung des jeweiligen Übertragungskoeffizienten werden jedoch nicht die gesamten Messdaten jedes Testschritts verwendet. Es wird nur ein Intervall (Teil 3) von 1 s von Teil 2 ausgeschnitten und zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten verwendet (siehe Abbildung 57).

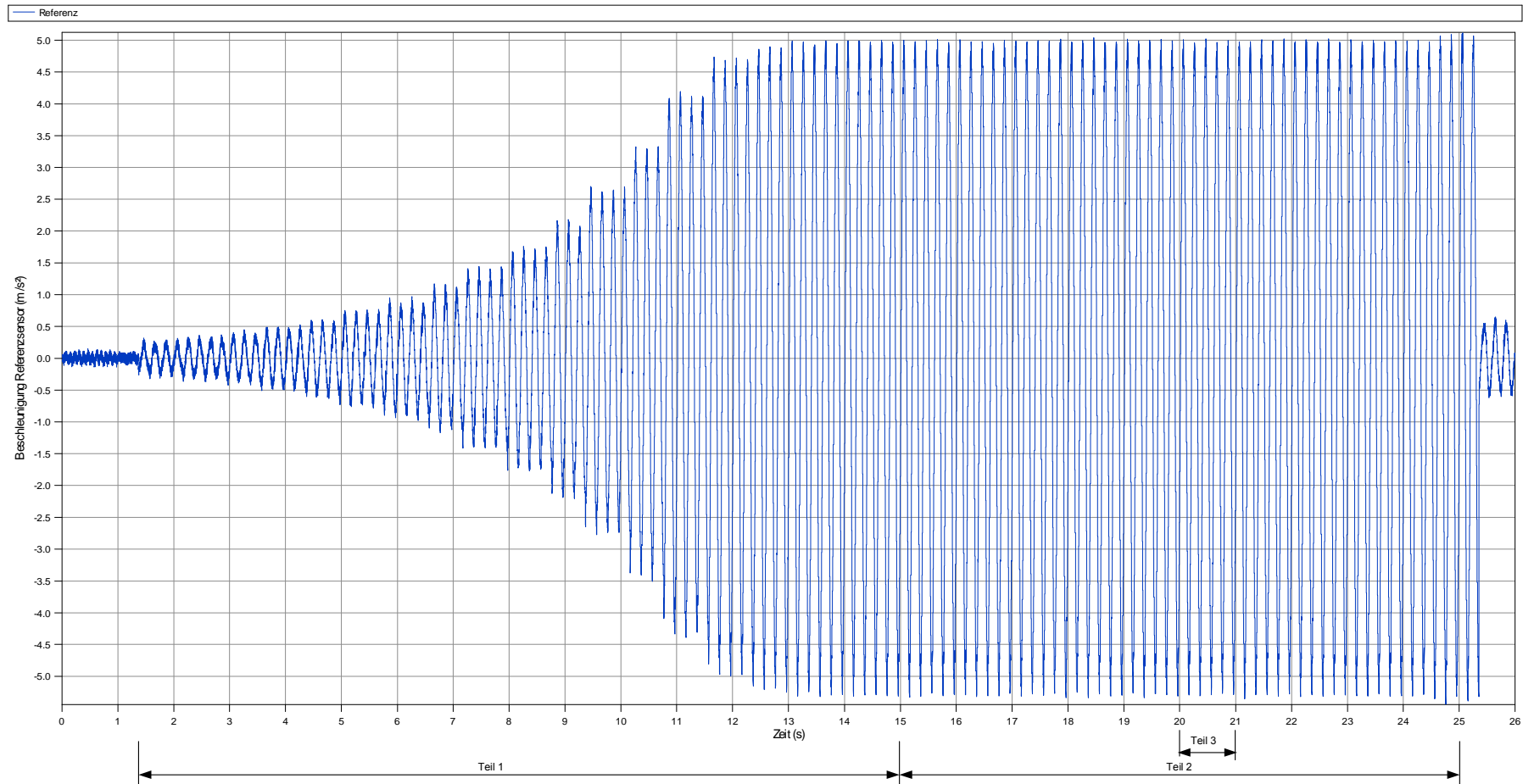


Abbildung 57: Ausschnitt zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten (Teil 1 – Einschwingphase, Teil 2 – Auswertbarer Bereich zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten, Teil 3 – für die Auswertung betrachteter Intervall)

Bei der Ermittlung des Übertragungskoeffizienten müssen zuerst Maßnahmen getroffen werden, um Signalstörungen (Oberwellen, Rauschen, ...) korrigieren zu können. Die Korrektur erfolgt wie die Ermittlung des Übertragungskoeffizienten bei jedem Testschritt des Sweep. Daher gilt die nachfolgende Beschreibung für alle Testsequenz

Der erste Schritt bei der Auswertung der Messsignale ist das Ausschneiden von Teil 3 der Messsignale des Referenzsensors und des Prüflings. Anschließend wird bei den Signalen eine Fourier-Transformation durchgeführt.

Beim Ausschneiden der Intervalle wird darauf geachtet, dass das Intervall mit einer Nullstelle beginnt und eine ganze Anzahl von Anzahl von Perioden ausgeschnitten wird, da die DFT nur dann das korrekte Spektrum des Signals liefert, wenn das Intervall gleich dem natürlichen Vielfachen der betrachteten Periodenlänge ist. Ist dies nicht möglich, treten die erwähnten Leakage-Effekte auf. Abhilfe bringt wie gesagt bei solchen Problemen die Anwendung von einer anderen Fensterfunktion als der Rechteck-Fensterfunktion. In dem betrachteten Fall tritt dieses Problem nicht auf, da wie gesagt ein Intervall von einer ganzen Anzahl von Perioden beginnend mit einer Nullstelle ausgeschnitten wird. Daher kann auch auf die Rechteckfensterfunktion zurück gegriffen werden. Ein Beispiel für ein ausgeschnittenes Intervall wird in Abbildung 58 dargestellt.

Das in Abbildung 58 dargestellte Signal weist „Zacken“ in den Umkehrpunkten auf. Dies ist damit zu erklären, dass der Schwingerreger speziell im unteren Frequenzbereich durch Unzulänglichkeiten des Führungssystems ein hoher Anteil an Oberwellen bei der Hubbewegung generiert werden.



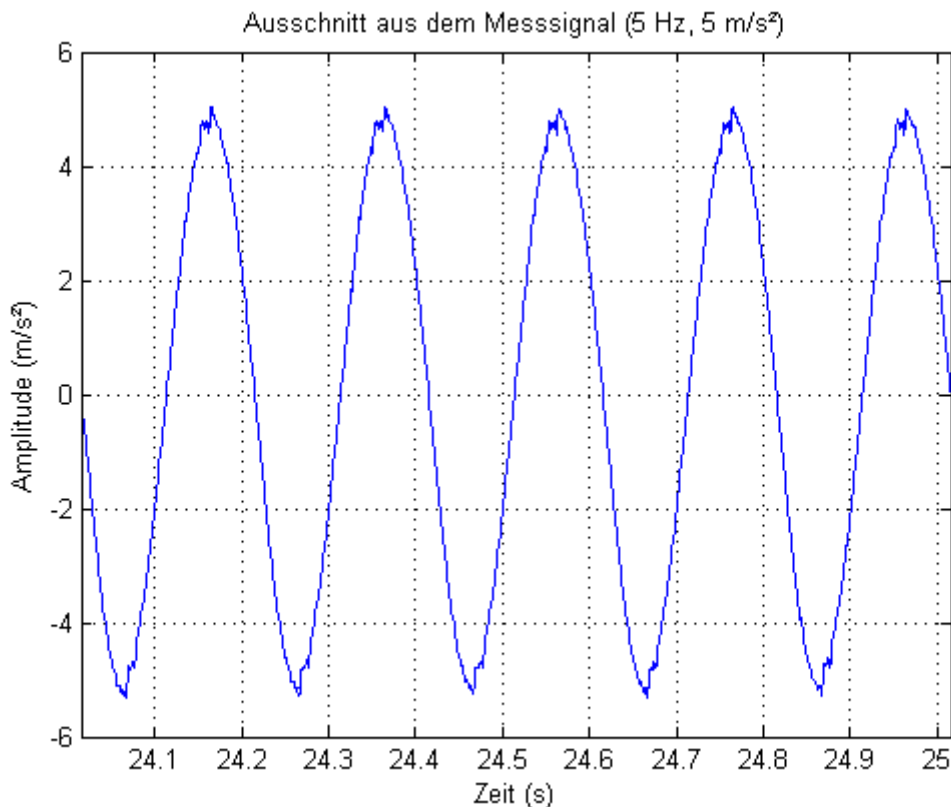


Abbildung 58: Intervall mit einer ganzen Anzahl von Perioden aus dem Messsignal bei 5 Hz und 5 m/s<sup>2</sup> für die Ermittlung des Klirrfaktors

Auf das ausgeschnittene Intervall wurde dann mittels MATLAB die FFT angewandt und das Ergebnis daraus ist ein Spektrum des betrachteten Intervalls. Bevor das Ergebnis graphisch dargestellt wurde, mussten die Werte der Amplituden noch korrigiert werden, um den Einfluss des verwendeten Fensters rückgängig zu machen und um die Transformation zu normieren. Nun kann die Beschleunigungsamplitude für den Prüfling und den Referenzsensor aus dem amplitudenkorrigierten Datensatz herausgelesen werden. In Abbildung 59 wird das ermittelte Spektrum für das in Abbildung 58 dargestellte Messsignal graphisch dargestellt.

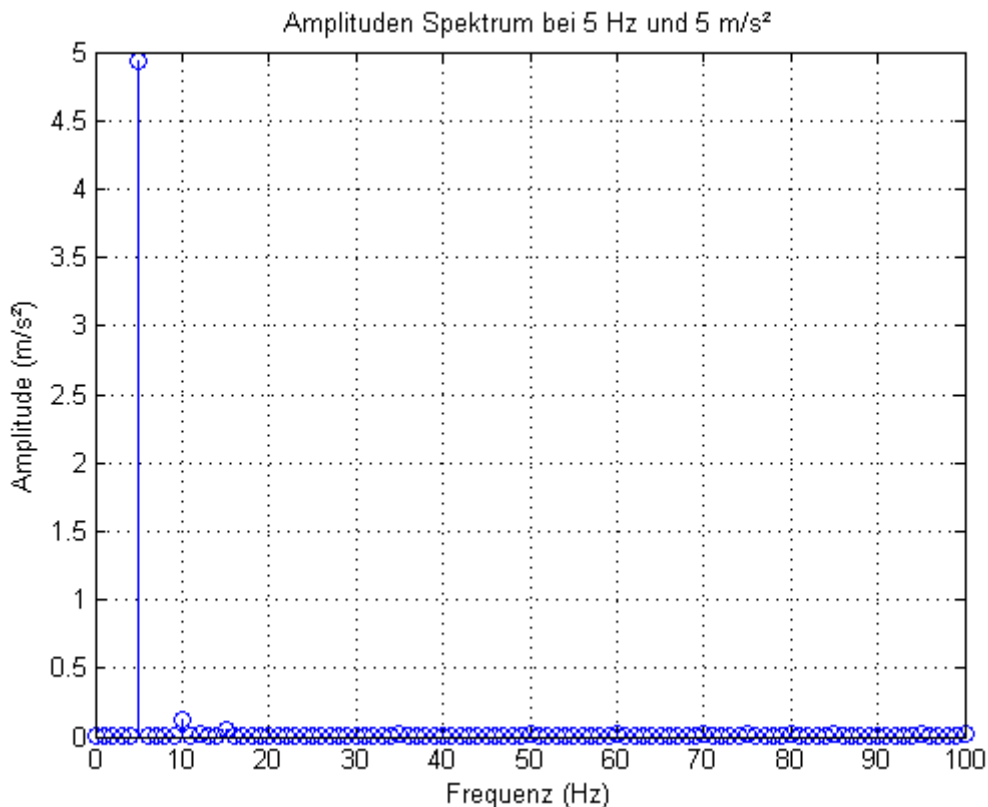


Abbildung 59: Ergebnis einer FFT Analyse eines sinusförmigen Messsignals

Mit den so ermittelten Beschleunigungsamplituden werden die Sensitivitätskoeffizienten des Kalibriergegenstands für jede der betrachteten Frequenzen  $S_2^a(f)$  und der Beschleunigungen  $S_2^f(a)$  gemäß den folgenden Gleichungen berechnet.

$$S_2(f, a) \Big|_{a=const.} = S_2^a(f) = S_1^a(f) \frac{X_{II}^a(f)}{X_I^a(f)} \quad (8-1)$$

$$S_2(f, a) \Big|_{f=80Hz} = S_2^f(a) = S_1^f(a) \frac{X_{II}^f(a)}{X_I^a(a)} \quad (8-2)$$

Der Sensitivitätskoeffizient  $S_1^a(f)$  wird dabei für die jeweilig betrachtete Frequenz aus dem Kalibrierschein des Referenzsensors [30] entnommen. Zusätzlich wird die Linearitätsabweichung  $d_{S_2(f)}$  (in %) für den Frequenzgang ausgehend von der Bezugsfrequenz von 80 Hz nach Empfehlung der DKD 3-1 Blatt 3 Richtlinie [10]

errechnet. Für den Amplitudengang wird ebenfalls die Abweichung vom Bezugswert  $d_{S_2(a)}$  (in %) errechnet. Die Gleichungen dafür lauten:

$$d_{S_2(f)} = \frac{S_2(80\text{Hz}) - S_2(f)}{S_2(80\text{Hz})} * 100 \quad (8-3)$$

$$d_{S_2(a)} = \frac{S_2(80\text{Hz}) - S_2(a)}{S_2(80\text{Hz})} * 100 \quad (8-4)$$

Die so ermittelten Ergebnisse werden zusammen mit den für die Kalibrierung notwendigen Informationen (z.B. Umgebungsbedingungen, ...) in den dafür vorgesehenen Kalibrierschein eingetragen. Exemplarisch wurde ein Sensor kalibriert und dafür ein gültiger Kalibrierschein gemäß den Vorgaben der ISO 16063-21 erstellt. Dieser Kalibrierschein ist in Kapitel 13.2 dargestellt.

## 8.2. Kalibrierbedingungen

Die Angabe der errechneten erweiterten Messunsicherheit ist nur dann gültig, wenn die unten beschriebenen Bedingungen eingehalten werden. Wird von den Bedingungen abgewichen, sind diese neu zu bewerten und die erweiterte Messunsicherheit für diese Bedingungen zu ermitteln.

### 8.2.1. Zu kalibrierende Sensoren

Bei der Ermittlung der Messunsicherheit wurde vom Einsatz der Sensortypen Q-Flex QA700 und PJM-LN als Kalibriergegenstände ausgegangen. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Sensoren wie Basisdehnungsempfindlichkeit oder Querbeschleunigungsempfindlichkeit wurde der entsprechende relative Unsicherheitsbeitrag für die Einflüsse ermittelt. Daher ist vorerst die ermittelte erweiterte Messunsicherheit nur für diese Sensortypen gültig.

### 8.2.2. Einsatz der Verstärkereinschubplatten

Bei der Kalibrierung dürfen nur Verstärkereinschubplatten verwendet werden, die über eine gültige Kalibrierung verfügen bzw. wird vorgeschlagen zwei

Einschubplattenkombinationen speziell für den Einsatz der Kalibrierung vorzusehen und bei diesen Platten auf einen Einsatz im Feld zu verzichten, da durch die Re-Kalibrierfrist von zwei Jahren eine Veränderung durch den Einsatz erst sehr spät erkannt wird.

### **8.2.3. Montage der Sensoren**

Bei der Montage der Sensoren ist besonders darauf zu achten, dass die vorgeschriebenen Anzugsmomente eingehalten werden. Vor der Befestigung am Shaker sind die Prüflinge auf die folgende Punkte hinzu überprüfen:

- Lesbarkeit von Beschriftungen
- Sauberkeit des Kalibriergegenstands
- Gängigkeit des Anschlussgewindes
- Optische Überprüfung des Messkabels hinsichtlich Beschädigungen

Neben den Prüflingen ist auch die Grundplatte des Shakers auf mögliche Oberflächenbeschädigungen, Verformungen oder Verschmutzung zu untersuchen.

Vor der Kalibrierung dürfen keine der oben genannten Fehler am Prüfling, der Referenz oder der Anschlussplatte auftreten. Diese sind unbedingt vor der Kalibrierung zu beheben. Nachdem die Grundplatte auf Mängel überprüft wurde ist diese auf die Montageebene des Shakers zu schrauben. Die Schrauben zur Befestigung sind mit einem Drehmoment von 5Nm kreuzweise anzuziehen.

Bei der Montage der Sensoren soll als erstes der Referenzsensor eingeschraubt werden. Die Position des Referenzsensors ist in der Mitte der Anschlussplatte. Anschließend werden die Prüflinge beginnend an Position 1 (siehe Beschriftung an Anschlussplatte) eingebaut. Die Kabel aller Sensoren müssen wie in der nachfolgenden Abbildung gezeigt befestigt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass keine mechanische Beanspruchung (Zugkraft) auf das Sensorkabel wirkt. Es ist eine Zugentlastung des Kabels vorzusehen.

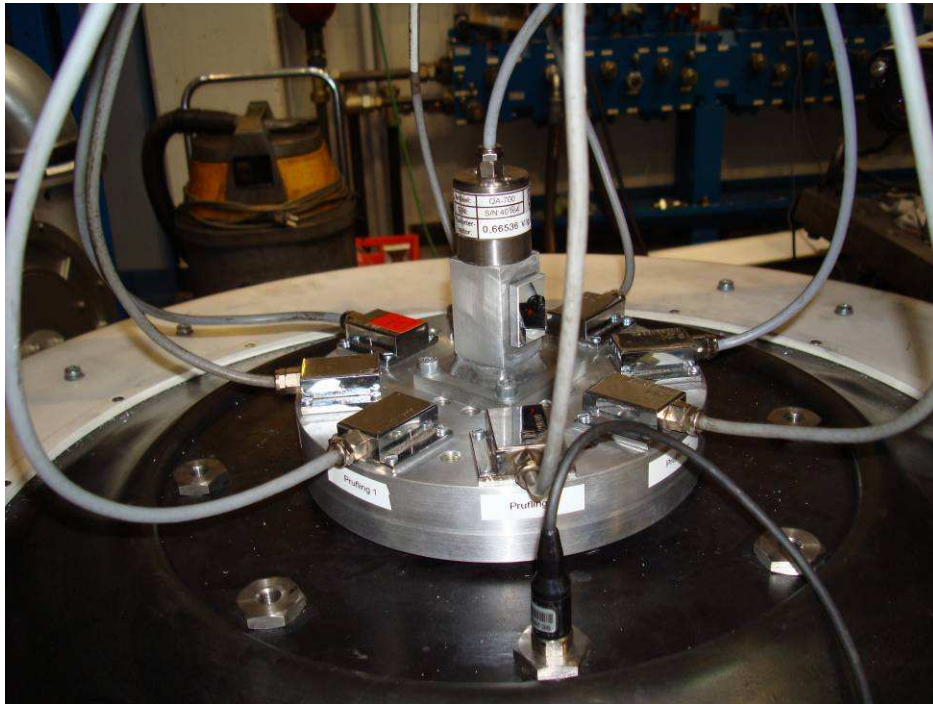


Abbildung 60: Vorgeschriebene Verlegung der Anschlusskabel der Sensoren bei der Kalibrierung

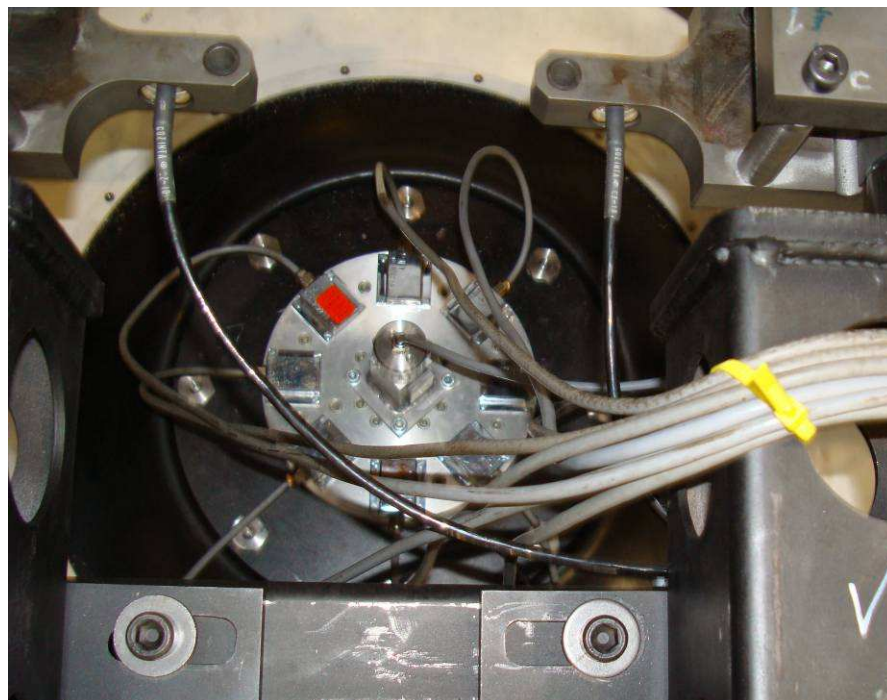


Abbildung 61: Vorgeschriebene Verlegung der Anschlusskabel der Sensoren bei der Kalibrierung (Draufsicht)

#### **8.2.4. Beachtung der Umgebungsbedingungen**

Als Grenzen bei den Umgebungsbedingungen sind eine Raumtemperatur von  $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$  und eine Luftfeuchtigkeit von max. 75% festgelegt worden. Weiters ist darauf zu achten, dass sich kein starkes elektrisches Feld oder der Erreger eines Feldes in unmittelbarer Nähe befindet.

## 9. Fazit / Ausblick

Um gleichbleibende Qualität bei den Messungen sicherzustellen und rückführbare Messergebnisse zu erzeugen, ist es notwendig die verwendeten Messmittel regelmäßig zu kalibrieren. Um das Ergebnis bei der Kalibrierung vollständig darstellen zu können, ist eine Analyse der Messunsicherheit des Kalibriersystems notwendig. Die vorhandenen Normen geben zwar Anhaltspunkte für die Ermittlung der Messunsicherheit, da aber jedes System unter anderen Rahmenbedingungen eingesetzt wird bzw. anders aufgeführt ist, muss für jedes System eine kritische Betrachtung Einflussgrößen durchgeführt werden.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde für den Fall der sinusförmigen Vergleichskalibrierung ein Messunsicherheitsbudget mit allen Einflussgrößen aufgestellt und daraus die erweiterte Messunsicherheit berechnet. Die Messunsicherheit für das Kalibriersystem beträgt 1,1 %. Der tatsächliche Wert der Kalibriergröße, die Sensitivität  $S$  des Prüflings, liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im zugeordneten Werteintervall.

Bei den ermittelten Messunsicherheitsbeiträgen handelt es sich um Ergebnisse, die ausschließlich für die Kalibrierung von kapazitiven und Servo-Beschleunigungssensoren herangezogen werden dürfen. Sollten andere Sensortypen verwendet werden so ist die Messunsicherheit dafür zu berechnen. Die in 5.3 beschriebene Modellfunktion kann dafür als Grundlage verwendet werden. Dafür muss jedoch erneut jede Einflussgröße neu bewertet werden. Es wurde somit die Grundlage geschaffen um die Messunsicherheit bei der sinusförmigen Kalibrierung der diversen Sensortypen ermitteln zu können.

Das erstellte Verfahren deckt derzeit einen Frequenzbereich von 5 – 200 Hz ab, da 5 Hz die tiefste erzeugbare Frequenz des Schwingerregers ist. Für verschiedene Anwendungen kann auch der Messbereich von 0 – 5 Hz interessant sein. Sinnvoll wäre somit aufbauend auf diesen Ergebnissen ein Verfahren zu entwickeln, mit welchem auch diese Frequenzen betrachtet werden können.

Weiters ist in manchen Fällen die tatsächliche Querschleunigungsempfindlichkeit der Sensoren interessant. Für diesen Parameter des Sensors gibt es üblicherweise nur Datenblattangaben die vom Hersteller einmalig bei der Erprobung neuer Sensortypen ermittelt werden. Daher wäre es durchaus sinnvoll die Möglichkeit vorzusehen, die Sensoren auf hinsichtlich ihrer Querschleunigungsempfindlichkeit überprüfen zu können, da diese Aufschluss auf eine etwaige mechanische Beschädigung des Sensorelements geben kann.



## 10. Quellenverzeichnis

- [1] BECK, ROGGENSACK: Der Mess- und Prüfmittelbeauftragte; WEKA Praxislösungen; Ausgabe 05/2004
- [2] BECK, ROGGENSACK: Der Mess- und Prüfmittelbeauftragte; WEKA Media GmbH & Co. KG; Mai 2004
- [3] BÜHN/NICKLICH; Primäre Schwingungs-Kalibrierung mittels Laser-Interferometrie in: Polytec LM Info Special Ausgabe 1/2003
- [4] CZICHOS, Horst: Mechatronik; Vieweg; 2006
- [5] DIN ISO 16063-21: Verfahren zur Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern; Teil 21: Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger; Ausgabe 01/2004
- [6] DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik – Teil 1: Grundbegriffe; Ausgabe 01/1995
- [7] DKD-3: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen; Deutscher Kalibrierdienst; Ausgabe 01/1998
- [8] DKD-R 3-1 Blatt 1: Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren - Grundlagen; Deutscher Kalibrierdienst; Ausgabe 3/2003
- [9] DKD-R 3-1 Blatt 2 : Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren – Stoßanregung; Deutscher Kalibrierdienst; Ausgabe 03/2002
- [10] DKD-R 3-1 Blatt 3: Kalibrierung von Beschleunigungsmessgeräten nach dem Vergleichsverfahren - Sinus- und Multisinus-Anregung; Deutscher Kalibrierdienst; Ausgabe 3/2003

- [11] DKD-R 3-1 Blatt 4: Primärkalibrierung von Schwingungsmessgeräten mit sinusförmiger Anregung und interferometrischer Messung der Schwingungsgröße; Ausgabe 2/2005
- [12] DKD-4: Rückführung von Mess- und Prüfmitteln auf nationale Normale; Deutscher Kalibrierdienst; Ausgabe 01/1998
- [13] EAL-R2; Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration; European cooperation for Accreditation of Laboratories; 1. Ausgabe; EAL 1997
- [14] FARVRE-BULLE B.: Automatisierung komplexer Industrieprozesse; 1. Auflage; Springer 2004
- [15] GABRIEL M.: Quantifizierung von Einflüssen zur Bestimmung von Messunsicherheitsbeiträgen bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern; FH Braunschweig; 2005
- [16] GEVATTER/GRÜNHAUPT: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion; 2. Auflage; Springer 2006
- [17] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK; Bedienungsanleitung Messverstärkersystem MGCplus; B0526-19.0
- [18] JOCH M.; W., Daxinger: Bauwerksanalyse und -überwachung mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (2005) 4, S. 159 – 164.
- [19] LAWRENCE A.: Modern Inertial Technology; Navigation, Guidance, and Control; 2. Auflage, Springer 2001
- [20] LERCH R.: Elektrische Messtechnik; Analoge, digitale und computergestützte Verfahren; 3. Auflage; Springer 2006
- [21] MARTENS H.-J.: Evaluation of interferometric vibration measurement; SPIE 4072; 2000

- [22] MESCHEDER U.: Mikrosystemtechnik; Konzepte und Anwendungen; 2. Auflage; Teubner 2004
- [23] MÜLLER H.: Stoßförmige Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren; Dissertation; Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2000
- [24] MÖSER M.: Technische Akustik; 7. Auflage; Springer 2007
- [25] OPHEY L.; Entwicklungsmanagement: Methoden in der Produktentwicklung; Springer 2005
- [26] ÖNORM ENV 13005; Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Ausgabe 1999-07-01;
- [27] PARTHIER R.: Messtechnik; Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure; 4. Auflage; Vieweg 2008
- [28] Physikalisch Technische Bundesanstalt 2007: Physikalisch Technische Bundesanstalt Homepage, [www.ptb.de](http://www.ptb.de) 19.05.2011
- [29] PRIEBSCHE H., OFFNER G.; Strukturdynamik, Akustik und numerische Methoden; Skriptum Institut für Maschinendynamik und Thermische Turbomaschinen; Technische Universität Graz 2010
- [30] SPEKTRA GmbH; Kalibrierschein ; 0770-DKD-K-27801-2010-07; 27.10.2010
- [31] SOMMER K.D.-: Das GUM – Verfahren praxisgerecht angewandt; Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen; VDI Bereich 1805/2003
- [32] SOMMER, SIEBERT: Grundlagen und praktische Umsetzung der Messunsicherheitsbestimmung nach GUM; Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen; VDI Bereich 1805/2003

- [33] WIKIPEDIA 2011; Digitale Signalverarbeitung;  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Leck-Effekt>; 07.06.2011
- [34] WIKIPEDIA 2011; Kinematik – Physikalische Größe;  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigung>; 22.06.2011

# 11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kalibrierhierarchie [12].....	2
Abbildung 2: Gliederung üblicher Kalibrierverfahren für Beschleunigungsaufnehmer [23] .....	5
Abbildung 3: Mechanisches Ersatzschaubild eines Beschleunigungssensors [22] ....	9
Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau des Kompressionstyps (links) und des Schertyps (rechts) [16] .....	11
Abbildung 5: Prinzip eines piezoresistiven Beschleunigungssensors [16].....	12
Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven Wandlers ( $C$ – Kapazität, $A$ – Elektrodenfläche, $\epsilon$ – Dielektrizitätskonstante, $d$ – Luftspaltweite, $x$ – Auslenkung der seismischen Masse) [24] .....	13
Abbildung 7: Schematischer Aufbau der interferometrischen Schwingungs-Messung [3] .....	15
Abbildung 8: Messsignal - Vertikalbeschleunigung am Achslager des Radsatzes ...	18
Abbildung 9: Campbell Diagramm der Vertikalbeschleunigungen am Achslager des Radsatzes.....	18
Abbildung 10: Primärkalibriersystem CS18P-HF [3] .....	20
Abbildung 11: Blockschaltbild einer Bezugsnormalmesseinrichtung (BNME) zur Primärkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern [11].....	21
Abbildung 12: Prinzip der Vergleichskalibrierung [8] .....	23
Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau des Stoßpendels [9] .....	26
Abbildung 14: Zusammenhang zwischen dem Beschleunigungsspitzenwert und der Dauer des Impulses bei Variation der Hammerpendelauslenkung [9] .....	26
Abbildung 15: Methoden zur quantitativen Einschätzung der Eingangsgrößen [32].	31
Abbildung 16: Möglichkeiten zur Berechnung des Erwartungswertes und der Standardunsicherheit [32].....	32
Abbildung 17: Graphische Darstellung des Ablaufs zur Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit nach GUM [31].....	35
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen angeregter Beschleunigung $a$ , elektrische Ausgangsgröße des Prüflings $X_{II}(t)$ und des Referenzsensor $X_I(t)$ .....	36
Abbildung 19: Modellfunktion mit allen Eingangsgrößen .....	40
Abbildung 20: Bestandteile der Kalibriereinrichtung .....	43
Abbildung 21: Prinzipieller Aufbau eines Schwingerregers.....	46

---

Abbildung 22: Biegeelement.....	47
Abbildung 23: Vektorielle Darstellung <b>a</b> des Übertragungsverhaltens von Beschleunigungssensoren, <b>b</b> der effektiven Querschleunigungsempfindlichkeit [16] .....	48
Abbildung 24: Effektive Querschleunigungsempfindlichkeit als Funktion des Winkels $\gamma$ , [23] .....	50
Abbildung 25: Darstellung der vorliegenden Beschleunigungen und des Übertragungsverhaltens bei der Kalibrierung [23] .....	51
Abbildung 26: Darstellung der effekt. Querschleunigungsempfindlichkeit und deren Änderung durch Drehung des Sensors [23].....	52
Abbildung 27: Aufspannplatte mit Messaufbau, Messspiegel und Referenzsensor..	53
Abbildung 28: Messaufbau bei Messung der Querbewegung mittels Laservibrometer .....	54
Abbildung 29: Detailansicht der Laservibrometer für die Messung der Querbewegungen des Schwingerregers.....	55
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus mit dem festgelegten Koordinatensystem .....	56
Abbildung 31: Anordnung der Prüflinge bei den Versuchen 3 bis 6.....	57
Abbildung 32: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 7 .....	58
Abbildung 33: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 8 .....	58
Abbildung 34: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 9 .....	59
Abbildung 35: Anordnung der Prüflinge bei Versuch 10 .....	60
Abbildung 36: Spektrum bei Anregung des Schwingerregers mit 5 Hz und einer Beschleunigungsamplitude von $5 \text{ m/s}^2$ .....	62
Abbildung 37: Spektrum bei Anregung des Schwingerregers mit 5 Hz und einer Beschleunigungsamplitude von $5 \text{ m/s}^2$ (vergrößerte Ansicht).....	63
Abbildung 38: Graphische Darstellung der ermittelten Klirrfaktoren des Schwingerregers.....	64
Abbildung 39: Funktionsprinzip eines QA700 Beschleunigungssensors [19] .....	67
Abbildung 40: Bauteile eines QA700 Beschleunigungssensors .....	68
Abbildung 41: Pendel mit Spule.....	68
Abbildung 42: Frequenzgang des Referenzsensors nach der Primärkalibrierung....	69
Abbildung 43: Messkette für die Kalibrierung von Sensoren des Typs QA700.....	73
Abbildung 44: Messkette für die Kalibrierung von Sensoren des Typs PJM-LN .....	73

---

Abbildung 45: Aufspannplatte im Grundzustand.....	75
Abbildung 46: 1. Eigenform der Aufspannplatte .....	75
Abbildung 47: Darstellung der Shakerarmatur $m_S$ mit der Aufspannplatte $m_A$ als 1-Massenschwinger.....	76
Abbildung 48: Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Ermittlung der Ursachen von Messabweichungen.....	80
Abbildung 49: Einflüsse auf Messunsicherheitsbudget.....	81
Abbildung 50: Allgemeine Budgettabelle für die Ermittlung der relativen kombinierten Standardmessunsicherheit .....	82
Abbildung 51: Messkette bei der Kalibrierung der Verstärkereinschubkarten.....	85
Abbildung 52: Linearitätsabweichung von der Funktion der Übertragungskoeffizienten bei unterschiedlichen Beschleunigungen.....	93
Abbildung 53: Ausgangsmesssignal (links) wird durch FFT periodisch wiederholt (rechts); die untere Ansicht zeigt das Spektrum des Ausgangsmesssignals [33]...	101
Abbildung 54: Ausgangsmesssignal (links) wird durch FFT periodisch wiederholt (rechts) jedoch tritt in diesem Fall eine Unstetigkeit durch die Fensterlänge auf wodurch neben der Hauptfrequenz auch andere Frequenzen im Spektrum (unten) auftreten [33] .....	101
Abbildung 55: Graphische Darstellung der Hamming-Fensterfunktion .....	102
Abbildung 56: Graphische Darstellung der Rechteck-Fensterfunktion .....	102
Abbildung 57: Ausschnitt zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten (Teil 1 – Einschwingphase, Teil 2 – Auswertbarer Bereich zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten, Teil 3 – für die Auswertung betrachteter Intervall).....	104
Abbildung 58: Intervall mit einer ganzen Anzahl von Perioden aus dem Messsignal bei 5 Hz und 5 m/s <sup>2</sup> für die Ermittlung des Klirrfaktors.....	106
Abbildung 59: Ergebnis einer FFT Analyse eines sinusförmigen Messsignals.....	107
Abbildung 60: Vorgeschriebene Verlegung der Anschlusskabel der Sensoren bei der Kalibrierung .....	110
Abbildung 61: Vorgeschriebene Verlegung der Anschlusskabel der Sensoren bei der Kalibrierung (Draufsicht) .....	110
Abbildung 62: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 2.....	123
Abbildung 63: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 3.....	124
Abbildung 64: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 4.....	125
Abbildung 65: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 5.....	126

Abbildung 66: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 6.....	127
Abbildung 67: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 7.....	128
Abbildung 68: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 8.....	129
Abbildung 69: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 9.....	130
Abbildung 70: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 10.....	131
Abbildung 71: Fertigungszeichnung Grundplatte.....	143
Abbildung 72: Fertigungszeichnung des Messaufbaus .....	144



---

## 12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normalmesseinrichtungen der PTB bei sinusförmiger Anregung.....	7
Tabelle 2: Normalmesseinrichtungen der PTB bei stoßförmiger Anregung .....	7
Tabelle 3: Frequenzen und Beschleunigungsamplituden für die Sinusregelung .....	45
Tabelle 4: Klirrfaktoren bei Anregung des Schwingerregers mit unterschiedlichen Frequenzen .....	64
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den ermittelten relativen Querbeschleunigungen bei den Versuchen 2 – 10.....	65
Tabelle 6: Technische Daten Q-Flex QA-700 .....	70
Tabelle 7: Technische Daten PJM LN 2g - 400g .....	71
Tabelle 8: Technische Daten Verstärkereinschub ML801B / AP801 .....	72
Tabelle 9: Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung .....	97
Tabelle 10: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 2 .....	123
Tabelle 11: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 3 .....	124
Tabelle 12: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 4 .....	125
Tabelle 13: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 5 .....	126
Tabelle 14: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 6 .....	127
Tabelle 15: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 7 .....	128
Tabelle 16: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 8 .....	129
Tabelle 17: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 9 .....	130
Tabelle 18: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 10 .....	131

## 13. Anhang

### 13.1. Detailergebnisse der Versuche 2 bis 10 für die Ermittlung der Querbewegung des Schwingerregers

#### 13.1.1. Detailergebnis von Versuch Nr. 2

Versuch Nr. 02 - Messung der Querbewegung ohne Beladung			
Frequenz	Querbewegung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbewegung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.07	5.21	1.34
8	0.07	10.22	0.68
16	0.65	49.82	1.30
40	0.67	48.49	1.38
60	0.36	48.46	0.74
80	0.83	48.90	1.70
100	1.59	49.18	3.23
120	3.03	49.46	6.13
140	1.23	49.58	2.48
160	0.97	49.70	1.95
200	0.89	49.70	1.79

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbewegung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbewegung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.22	9.95	2.21
20	0.35	19.67	1.78
30	0.5	29.33	1.70
50	0.82	48.92	1.68
80	1.13	48.96	2.31

Bezugsfrequenz f = 80 Hz

Tabelle 10: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 2

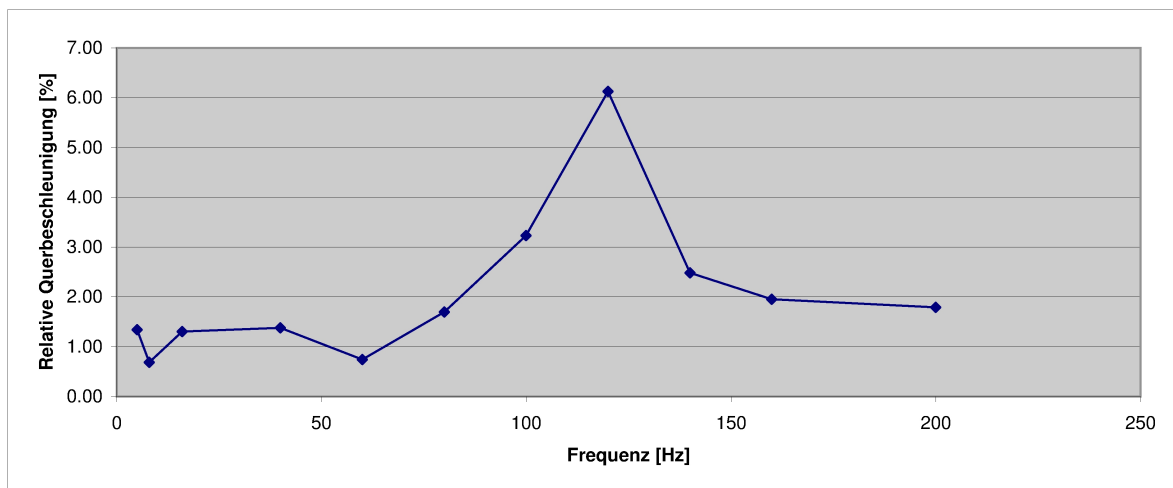


Abbildung 62: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 2

## 13.1.2. Detailergebnis von Versuch Nr. 3

Versuch Nr. 03 - Messung der Querbeschleunigung mit außermittiger Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.09	5.12	1.76
8	0.09	10.16	0.89
16	0.79	49.85	1.58
40	0.47	48.51	0.97
60	0.37	48.48	0.76
80	0.91	48.88	1.86
100	1.59	49.25	3.23
120	3.01	49.46	6.09
140	1.27	49.59	2.56
160	1.02	49.81	2.05
200	0.88	49.73	1.77

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.26	9.96	2.61
20	0.40	19.67	2.03
30	0.56	29.30	1.91
50	0.91	48.95	1.86
80	1.46	79.19	1.84

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 11: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 3

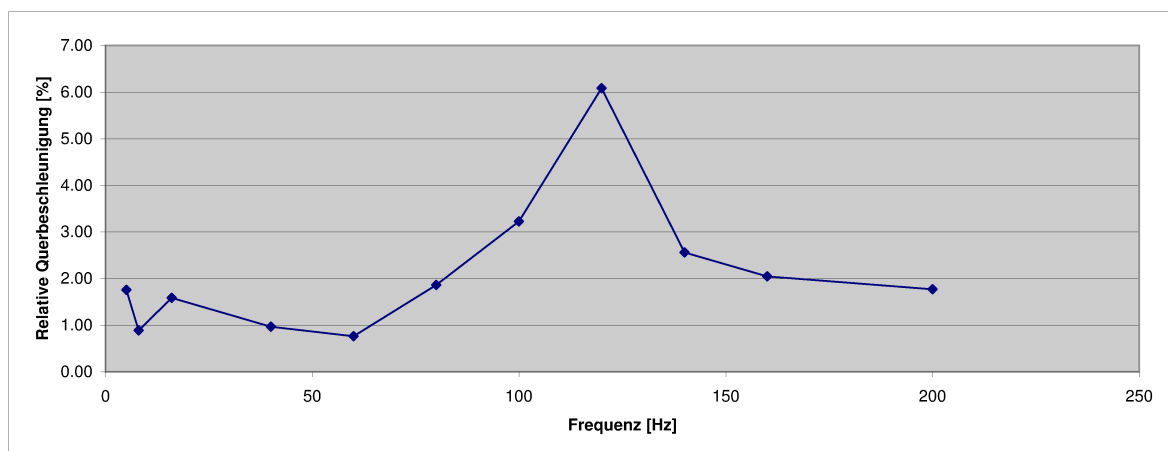


Abbildung 63: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 3

## 13.1.3. Detailergebnis von Versuch Nr. 4

Versuch Nr. 04 - Messung der Querbeschleunigung mit außermittiger Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.09	5.21	1.73
8	0.09	10.15	0.89
16	0.71	49.87	1.42
40	0.48	48.52	0.99
60	0.39	48.52	0.80
80	0.85	48.88	1.74
100	1.50	49.22	3.05
120	2.66	49.44	5.38
140	1.08	49.59	2.18
160	0.86	49.78	1.73
200	0.83	49.78	1.67

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.26	9.95	2.61
20	0.38	19.67	1.93
30	0.52	29.32	1.77
50	0.82	48.88	1.68
80	1.32	79.13	1.67

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 12: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 4

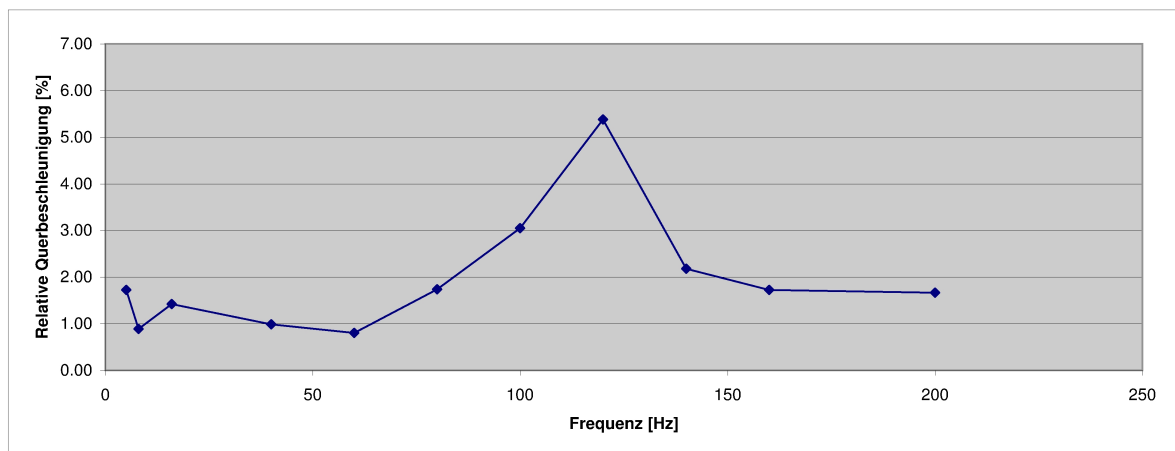


Abbildung 64: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 4

## 13.1.4. Detailergebnis von Versuch Nr. 5

Versuch Nr. 05 - Messung der Querbeschleunigung mit außermittiger Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.11	5.26	2.09
8	0.11	10.18	1.08
16	0.66	49.85	1.32
40	0.48	48.52	0.99
60	0.46	48.48	0.95
80	0.87	48.89	1.78
100	1.75	49.18	3.56
120	2.69	49.41	5.44
140	1.08	49.59	2.18
160	0.86	49.76	1.73
200	0.88	49.75	1.77

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.3	9.95	3.02
20	0.4	19.66	2.03
30	0.55	29.36	1.87
50	0.85	48.89	1.74
80	1.4	79.21	1.77

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 13: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 5

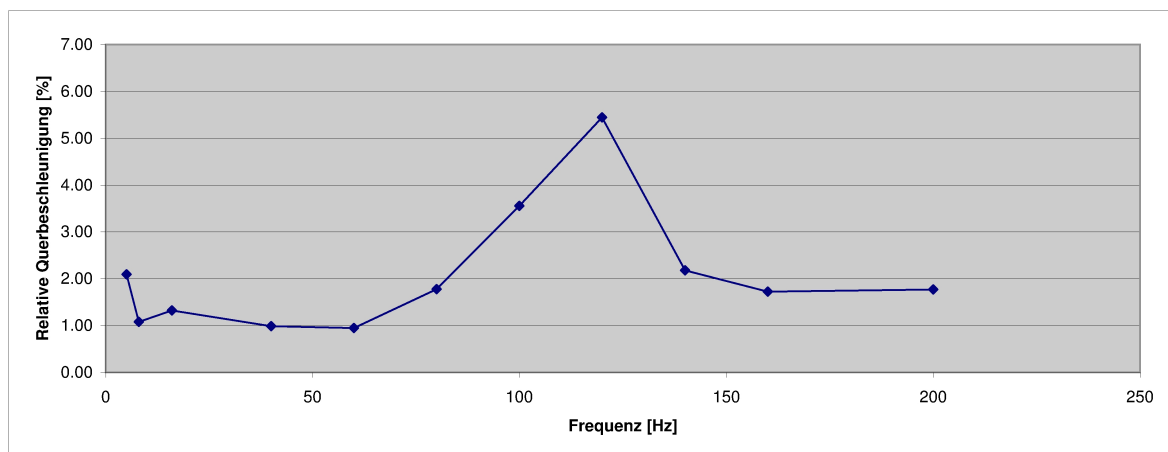


Abbildung 65: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 5

## 13.1.5. Detailergebnis von Versuch Nr. 6

Versuch Nr. 06 - Messung der Querbeschleunigung mit außermittiger Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.10	5.19	1.93
8	0.10	10.17	0.98
16	0.63	49.89	1.26
40	0.58	48.56	1.19
60	0.45	48.47	0.93
80	0.98	48.90	2.00
100	1.95	49.19	3.96
120	3.00	49.45	6.07
140	1.26	49.59	2.54
160	1.00	49.80	2.01
200	0.90	49.72	1.81

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.28	9.95	2.81
20	0.43	19.66	2.19
30	0.59	29.31	2.01
50	0.97	48.92	1.98
80	1.58	79.16	2.00

Bezugsfrequenz f = 80 Hz

Tabelle 14: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 6

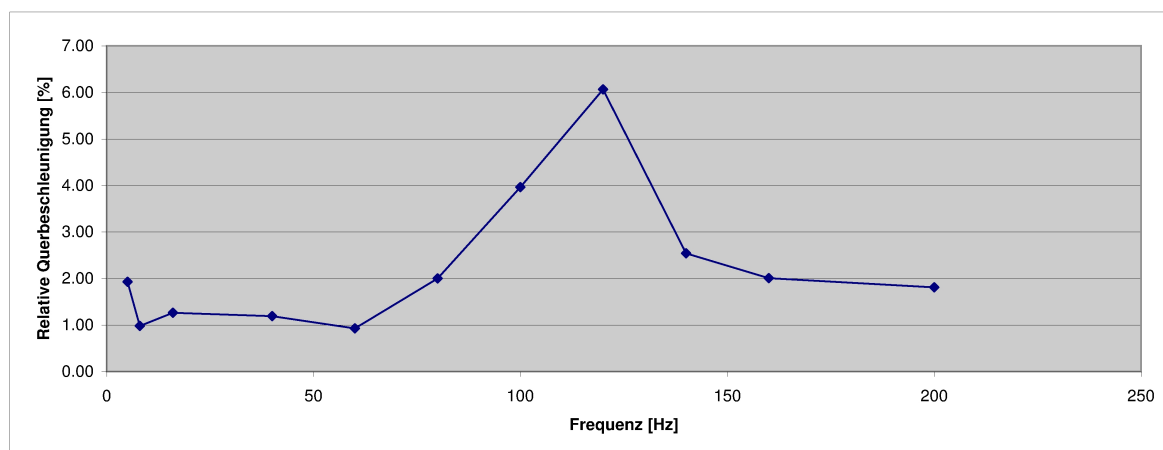


Abbildung 66: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 6

## 13.1.6. Detailergebnis von Versuch Nr. 7

Versuch Nr. 07 - Messung der Querbeschleunigung mit außermittiger Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.08	5.21	1.54
8	0.08	10.17	0.79
16	0.69	49.82	1.38
40	0.43	48.51	0.89
60	0.4	48.46	0.83
80	0.92	48.93	1.88
100	1.75	49.21	3.56
120	2.73	49.45	5.52
140	1.14	49.60	2.30
160	0.91	49.80	1.83
200	0.85	49.78	1.71

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.24	9.98	2.40
20	0.39	19.67	1.98
30	0.55	29.28	1.88
50	0.9	48.91	1.84
80	1.48	79.23	1.87

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 15: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 7

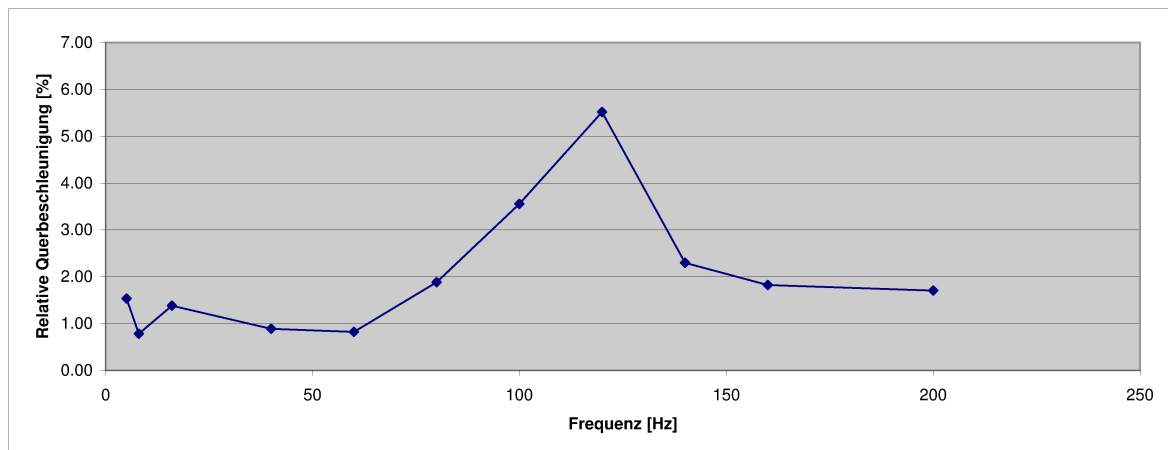


Abbildung 67: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 7

## 13.1.7. Detailergebnis von Versuch Nr. 8

Versuch Nr. 08 - Messung der Querbeschleunigung mit außermittiger Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.09	5.23	1.72
8	0.09	10.18	0.88
16	0.75	49.87	1.50
40	0.68	48.52	1.40
60	0.42	48.49	0.87
80	0.95	48.92	1.94
100	1.71	49.24	3.47
120	2.72	49.46	5.50
140	1.14	49.58	2.30
160	0.92	49.79	1.85
200	0.86	49.84	1.73

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.26	9.96	2.61
20	0.4	19.65	2.04
30	0.56	29.32	1.91
50	0.91	48.91	1.86
80	1.53	79.25	1.93

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 16: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 8

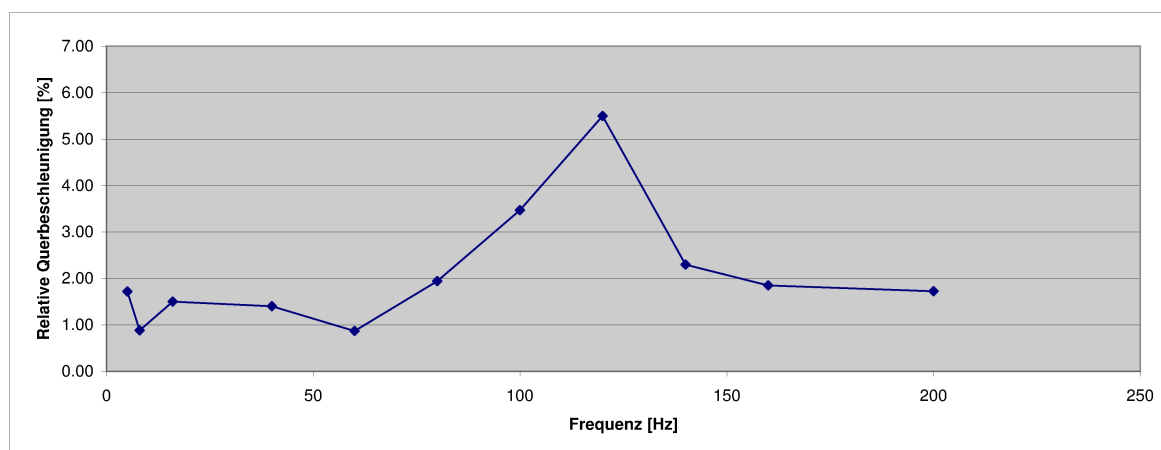


Abbildung 68: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 8



## 13.1.8. Detailergebnis von Versuch Nr. 9

Versuch Nr. 09 - Messung der Querbeschleunigung mit halber Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.12	5.25	2.29
8	0.12	10.21	1.18
16	0.9	49.82	1.81
40	0.54	48.55	1.11
60	0.49	48.5	1.01
80	0.99	48.92	2.02
100	1.89	49.21	3.84
120	2.57	49.47	5.20
140	1.1	49.59	2.22
160	0.88	49.77	1.77
200	0.88	49.73	1.77

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.33	9.93	3.32
20	0.46	19.66	2.34
30	0.62	29.31	2.12
50	0.97	48.89	1.98
80	1.59	79.07	2.01

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 17: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 9

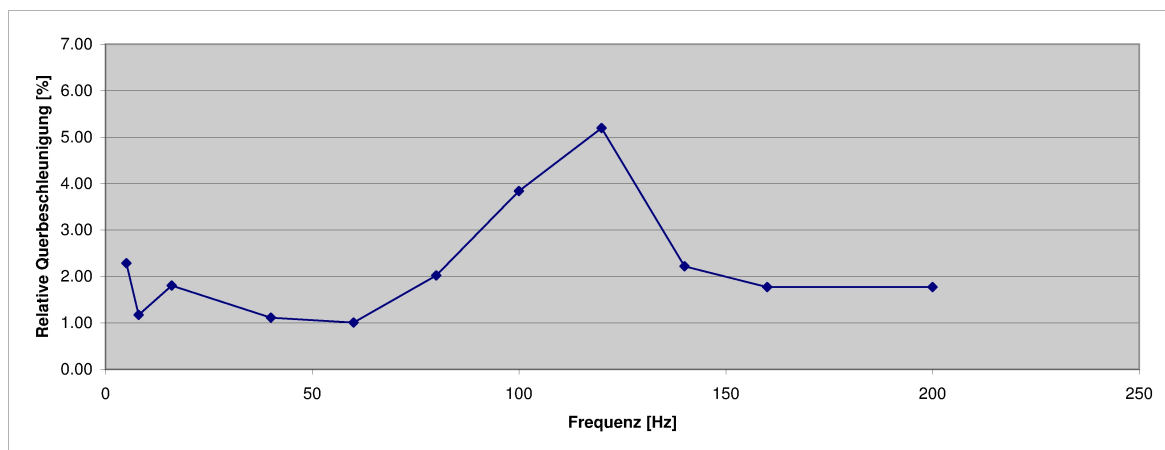


Abbildung 69: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 9

## 13.1.9. Detailergebnis von Versuch Nr. 10

Versuch Nr. 10 - Messung der Querbeschleunigung mit voller Beladung			
Frequenz	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
f [Hz]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
5	0.10	5.22	1.92
8	0.10	10.20	0.98
16	0.58	49.89	1.16
40	0.48	48.51	0.99
60	0.48	48.47	0.99
80	1.02	48.90	2.09
100	2.09	49.19	4.25
120	2.32	49.47	4.69
140	1.04	49.59	2.10
160	0.85	49.75	1.71
200	0.85	49.78	1.71

Nennbeschleunigung  $a_N = 5 \text{ m/s}^2$  (5 Hz),  $a_N = 10 \text{ m/s}^2$  (8 Hz),  $a_N = 50 \text{ m/s}^2$  (16-200 Hz)

Nennbeschleunigung	Querbeschleunigung	Beschleunigung am Referenzsensor	relative Querbeschleunigung
$a_N$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_q$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_z$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{qrel}$ [%]
10	0.31	9.95	3.12
20	0.45	19.66	2.29
30	0.63	29.3	2.15
50	1.01	48.91	2.07
80	1.67	79.24	2.11

Bezugsfrequenz  $f = 80 \text{ Hz}$

Tabelle 18: Ergebnisse aus den Messungen von Versuch Nr. 10

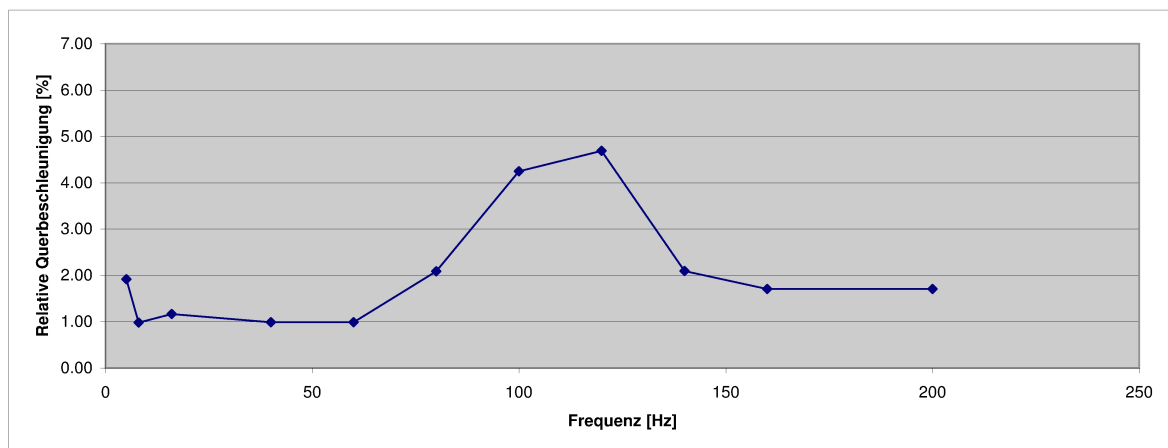


Abbildung 70: Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch Nr. 10

## 13.2. Ergebnis der Kalibrierung eines Sensors des Typs PJM-LN



PJ Messtechnik GmbH

### Kalibrierschein

*calibration certificate*

Kalibrierschein Nummer (Number of calibration certificate): 2011-06-17\_PJM\_10g\_213407

Gegenstand <i>Object</i>	<b>Beschleunigungssensor</b>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	<b>PJM</b>
Typ <i>Type</i>	<b>PJM-LN</b>
Messbereich <i>Measuring range</i>	<b>10g</b>
Fabrikat / Serien-Nr. <i>Serial number</i>	<b>213407</b>
Interne Serien-Nr. <i>Internal Serial number</i>	<b>213407</b>
Anzahl der Seiten <i>Number of pages</i>	<b>4</b>
Prüfschein Nummer <i>Number of verification certificate</i>	<b>2011-06-17_PJM_10g_213407</b>
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	<b>17.06.2011</b>

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weitergegeben werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen unserer ausdrücklichen Genehmigung. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

*This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with our permission. Calibration certificates without signature are not valid.*

Prüfer <i>Tester</i>	KLADE Gerhard	Abnahme <i>Release</i>	JOCH Martin
Datum <i>Date</i>	17.06.2011		



PJ Messtechnik GmbH

## Kalibrierschein

calibration certificate

Kalibrierschein Nummer (Number of calibration certificate): 2011-06-17\_PJM\_10g\_213407

### Verwendete Referenzmittel / Verification equipment

Referenzsensor: <i>Reference sensor:</i>	Q-Flex QA-700	Überprüft von: <i>Checked by:</i>	Spektra GmbH Dresden
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	HONEYWELL	Kalibrierung gültig bis: <i>Calibration valid until:</i>	07/2012
Fabrikat / Serien-Nr.: <i>Serial Number:</i>	40134		

### Umgebungsbedingungen / Ambient Conditions

Umgebungstemperatur: <i>Ambient temperature:</i>	22 °C	Luftfeuchte <i>Humidity:</i>	32 % rel.
---	-------	---------------------------------	-----------

### Prüfkonfiguration / Verification Configuration

#### Messverstärker Referenz / Amplifier reference:

Anschlussplatte: <i>Connector plate:</i>	ML801
AP - Seriennummer: <i>Connector plate serial number:</i>	2253887536
Verstärker: <i>Amplifier:</i>	AP801
Verstärker Seriennummer: <i>Amplifier serial number:</i>	2253887536

#### Messverstärker Prüfung / Amplifier test object:

Anschlussplatte: <i>Connector plate:</i>	ML801
AP - Seriennummer: <i>Connector plate serial number:</i>	2253887536
Verstärker: <i>Amplifier:</i>	AP801
Verstärker Seriennummer: <i>Amplifier serial number:</i>	2253887536

### Schwingerreger / Shaker system

Hersteller: <i>Producer:</i>	Data Physics	Typ: <i>Type:</i>	GW-V2634 DSA5-15k
Seriennummer: <i>Serial number:</i>		Befestigung des Prüflings: <i>Mounting of test object:</i>	geschraubt (2,5 Nm)
Lage des Prüflings im Erdfeld: <i>Position of test object relative to earth's field:</i>	vertikal		

### Nächste Überprüfung / Next Verification

Ende (Monat / Jahr) <i>End of (month/year)</i>	06/2013
---	---------

PJ Messtechnik GmbH  
Waagner-Biro-Straße 125  
A-8010 Graz

Seite/Page 2/4



PJ Messtechnik GmbH

## Kalibrierschein

calibration certificate

Kalibrierschein Nummer (Number of calibration certificate): 2011-06-17\_PJM\_10g\_213407

### Messunsicherheit / Uncertainty of measurement

Die relativen Gesamtmessunsicherheiten für die ausgewiesenen Werte betragen:

- bei der Ermittlung des Übertragungskoeffizienten bei 80 Hz 1.1%
- bei Ermittlung des Amplitudenfrequenzganges im Frequenzbereich 5 Hz bis 500 Hz 1.1%

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k=2$  ergibt. Sie wurde gemäß DIN ISO 16063-21 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im zugeordneten Werteintervall.

### Kalibrierverfahren / Calibration method

Die Kalibrierung erfolgt entsprechend der Norm ISO 16063-21 "Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzempfänger", nach Arbeitsanweisung AW\_7\_6\_14 "Kalibrieren Beschleunigungssensoren QA700".

### Ergebnisse / Results

#### Ermittlung des Übertragungskoeffizienten (Erdbeschleunigung $g = 9,808 \text{ m/s}^2$ )

Evaluation of sensitivity

Frequenz: 80 Hz

Frequency:

Beschleunigung: 50  $\text{m/s}^2$

Acceleration:

(Erdbeschleunigung  $g = 9,808 \text{ m/s}^2$ )

Standardabweichung: 0.0001  $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$  % Nullpunkt vor Kalibrierung 343.67  $\text{mV}$

Standard deviation:

Zero point before calibration

Mittelwert: 40.280  $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$   $\text{mV/g}$  Nullpunkt nach Kalibrierung 343.34  $\text{mV}$

Mean:

Zero point before calibration

### Tabelle Frequenzgang aus Festfrequenzen (bezogen auf 80 Hz)

Table frequency response (based on 80 Hz)

Frequenz Frequency	Beschleunigung Acceleration	Übertragungskoeffizient Sensitivity		Abweichung v. Bezugswert Conventional error
Hz	$\text{m/s}^2$	$\text{mV}/(\text{m/s}^2)$	$\text{mV/g}$	%
5	3	40.20	394.2	0.2
8	10	40.20	394.3	0.1
16	50	40.20	394.4	0.1
40	50	40.20	394.8	0.0
60	50	40.20	394.5	0.1
80	50	40.30	394.8	0.0
100	50	40.30	395.3	-0.1
120	50	40.40	396.5	-0.4
140	50	40.30	395.5	-0.2
160	50	40.40	395.9	-0.3
200	50	40.30	394.8	-0.0

PJ Messtechnik GmbH  
Wagner-Biro-Straße 125  
A-8010 Graz

Seite/Page 3/4



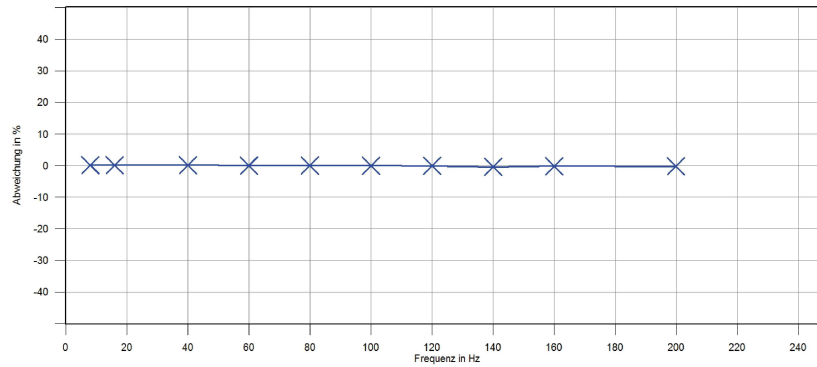
PJ Messtechnik GmbH

## Kalibrierschein

calibration certificate

Kalibrierschein Nummer (Number of calibration certificate): 2011-06-17\_PJM\_10g\_213407

Diagramm Frequenzgang / Diagram frequency response

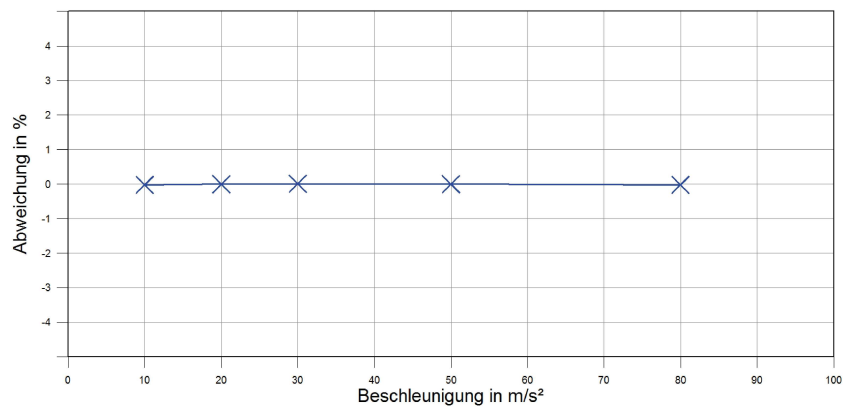


### Tabelle Amplitudengang (bei Bezugsfrequenz 80 Hz)

Table amplitude response

Frequenz <i>Frequency</i>	Beschleunigung <i>Acceleration</i>	Übertragungskoeffizient <i>Sensitivity</i>		Abweichung v. Bezugswert <i>Conventional error</i>
Hz	m/s <sup>2</sup>	mV/(m/s <sup>2</sup> )	mV/a	%
80	10	40.30	395.0	-0.0
80	20	40.30	395.0	0.0
80	30	40.30	394.9	0.0
80	50	40.30	394.9	0.0
80	80	40.27	394.9	-0.0

Diagramm Amplitudengang / Diagram amplitude response



### 13.3. Kalibrierschein Referenzsensor

## DEUTSCHER KALIBRIERDIENST

**DKD**

Kalibriertlaboratorium für Beschleunigung und Schalldruckpegel  
*Calibration laboratory for acceleration and sound pressure level*  
 Akkreditiert durch die / accredited by the

Akkreditierungsstelle des DKD


**SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden**

Kalibriersysteme · Spezialausrüstungen · DKD-Laboratorium · Umweltprüfungen


**Kalibrierschein**  
*Calibration Certificate*
**Kalibrierzeichen**  
*Calibration label*

0770
DKD-K-27801
2010-07

Gegenstand <i>Object</i>	<b>Beschleunigungsaufnehmer</b>	Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI). Der DKD ist Unterzeichner der multi-lateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich. <i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).          The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.          The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.</i>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	<b>Sundstrand</b>	
Typ <i>Type</i>	<b>QA700</b>	
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	<b>40164</b>	
Auftraggeber <i>Customer</i>	<b>PJ Messtechnik GmbH AT-8020 Graz</b>	
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	<b>100664</b>	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	<b>4</b>	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	<b>28.07.2010</b>	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums.  
 Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.  
*This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.*

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Stellv. Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Deputy head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	29.07.2010	 Heiko Deierlein	 Sabine Göbel

SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden  
 Gostritzer Straße 61, DE-01217 Dresden - Telefon (0351) 4 00 24 31 - Fax (0351) 4 00 24 99

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 29.07.2010  
 Page of calibration certificate dated

0770
DKD-K- 27801
2010-07

## 1. Kalibriergegenstand

Gegenstand: **Beschleunigungsaufnehmer**  
 Hersteller: **Sundstrand**  
 Typ: **QA700**  
 Serien-Nr.: **40164**

## 2. Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung erfolgte nach dem Primärverfahren entsprechend der Richtlinie ISO 16063-11. Der Aufnehmer wurde mit einer sinusförmigen Beschleunigung auf einem elektrodynamischen Schwingerregger angeregt. Die Messung der Schwinggeschwindigkeit erfolgt mit einem Helium-Neon-Laser, dessen Wellenlänge 632,81 nm beträgt. Die resultierende Beschleunigung ist der Mittelwert der

## 3. Umgebungsbedingungen

Umgebungstemperatur des Prüflings: **(23,9 ± 1) °C**  
 Relative Luftfeuchte: **(52 ± 5) %**

## 4. Messbedingungen

Lage der angeregten Achse(n) im Erdschwerefeld: **vertikal**  
 Temperatur des Prüflings: **(23,9 ± 2) °C**

Befestigung des Prüflings auf dem Schwingerregger: **Adapter SPEKTRA SAM-029 (M6 auf 1/4-28)**  
 Anzugsdrehmoment: **2 N m**

Technische Daten des Anschlusskabels: **fest angeschlossen, zusätzlich Kundenverteilerbox**

Speisespannung: **24 V DC an Sensor-Versorgungsbox**

Anregungsdaten

Ermittlung des Übertragungskoeffizienten

Frequenz: **80 Hz**  
 Beschleunigung (Spitzenwert): **5 g<sub>n</sub>**

Ermittlung des Amplitudenfrequenzganges

Frequenzbereich:	<b>5 Hz bis &lt;30 Hz</b>	<b>30 Hz bis 500 Hz</b>
Weg (Spitzenwert):	<b>3 mm</b>	
Beschleunigung (Spitzenwert):		<b>5 g<sub>n</sub></b>
Anzahl Frequenzpunkte im log. Maßstab:	<b>31</b>	



Seite 3 zum Kalibrierschein vom 29.07.2010  
 Page of calibration certificate dated

0770
DKD-K- 27801
2010-07

## 5. Messunsicherheit

Die relativen Gesamtmessunsicherheiten für die ausgewiesenen Werte betragen:

- bei der Ermittlung des Übertragungskoeffizienten bei 80 Hz	0,5%
- bei Ermittlung des Amplitudenfrequenzganges im Frequenzbereich 5 Hz bis 500 Hz	0,5%

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  ergibt. Sie wurde gemäß DKD-3 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Der Deutsche Kalibrierdienst ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Die weiteren Unterzeichner innerhalb und außerhalb Europas sind den Internetseiten von EA ([www.european-accreditation.org](http://www.european-accreditation.org)) und ILAC ([www.ilac.org](http://www.ilac.org)) zu entnehmen.

## 6. Bestandteile der Normalmesseinrichtung

	Hersteller	Typ	Serien-Nr.
Schwingerreger	SPEKTRA	SE-09	705
Laservibrometer	Polytec	CLV-1000	1 00 0633 0005
Kalibriersystem	SPEKTRA	CS18 STF HF	200112

## 7. Ergebnisse

### 7.1 Ermittlung des Übertragungskoeffizienten

Frequenz: 80 Hz  
 Beschleunigung (Spitzenwert):  $5 g_n$

Standardabweichung: 0,0031 mV/(m/s<sup>2</sup>) 0,009 %

Mittelwert: 33,924 mV/(m/s<sup>2</sup>) 332,68 mV/ $g_n$

(Erdbeschleunigung  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ )

## 13.4. Kalibrierschein der Verstärkereinschubplatten



PJ Messtechnik GmbH

### Prüfschein MGC-Anschlussplatte AP801

Verification Certificate MGC-Connector Plate AP801

Prüfschein Nummer (Number of verification certificate): 2010-04-15\_AP801\_166671534

Die Überprüfung erfolgt in Anlehnung an die DIN ISO 10012


*The verification is made with reference to ISO 10112*

Gegenstand <i>Object</i>	<b>MGC-Anschlussplatte</b>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	<b>HBM</b>
Typ <i>Type</i>	<b>AP801</b>
Fabrikat / Serien-Nr. <i>Serial number</i>	<b>166671534</b>
Hardware Revision <i>Hardware revision</i>	<b>1.02</b>
Interne Serien-Nr. <i>Internal Serial number</i>	<b>AP801S6/03</b>
Anzahl der Seiten <i>Number of pages</i>	<b>4</b>
Prüfschein Nummer <i>Number of verification certificate</i>	<b>2010-04-15_AP801_166671534</b>

Dieser Prüfschein darf nur vollständig und unverändert weitergegeben werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen unserer ausdrücklichen Genehmigung.

Prüfscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

*This verification certificate may not be reproduced other than in full except with our permission. Verification certificates without signature are not valid.*

Prüfer <i>Tester</i>	BRANDSTÄTTER Johann	Abnahme <i>Release</i>	PUDGAR Gerald
Datum <i>Date</i>	15.04.2010		



PJ Messtechnik GmbH

## Prüfschein MGC-Anschlussplatte AP801

Verification Certificate MGC-Connector Plate AP801

Prüfschein Nummer (Number of verification certificate): 2010-04-15\_AP801\_166671534

### Prüfverfahren / Method of Verification

Die Prüfung erfolgte durch den Vergleich des angezeigten Messwertes mit einem bekannten Eingangssignal. Die Abweichung wurde mit dem vom Hersteller angegebenen Grenzwert verglichen.

*A known input value from a calibrator was applied to the connector plate. The verification by comparison of the measured values with the limits according specification.*

### Verwendete Referenzmittel / Verification equipment

#### Kalibrator für Spannungen / Voltage Calibrator

Hersteller:	FLUKE	Kalibrierzertifikat:	01052009
Manufacturer:		Calibration Certificate:	
Typ:	726	Kalibrierung gültig bis:	Mai 2011
Type:		Calibration valid until:	
Fabrikat / Serien-Nr.:	9812104		
Serial Number:			

#### Umgebungsbedingungen / Ambient Conditions

Umgebungstemperatur:	20 °C	Luftfeuchte:	32 % rel.
Ambient temperature:		Humidity:	

#### Prüfkonfiguration / Verification Conditions

CP-Name:	CP 42	Firmware:	4.44
CP-name:		Firmware:	
CP-Seriennummer:	801116665011105	Gehäuseseriennummer:	TG_01
CP-serial number:		Housing serial number:	
CP-Hardware-Revision:	1.05		
CP hardware revision:			

#### Prüfeinstellungen / Verification Settings

Sensortyp:

*Sensor type:*

Zulässige abs. Abweichung:  $\pm(0.05\% \text{ vom Messwert} + 0.05\% \text{ vom Messbereich})$

*Permitted abs. deviation:  $\pm(0.05\% \text{ of reading} + 0.05\% \text{ of range})$*

Zulässige Linearitätsabweichung: 0.03%

*Permitted linearity deviation:*

Messbereich:  $\pm 10 \text{ V}$

*Measuring range:*

Filter: 5 Hz Bessel 5 Ord.

*Filter:*

Verstärker: ML 801

*Amplifier:*

Firmware: 5.17

*Firmware:*

Beam-Version: 3.14a26

*Beam version:*

Sensorparameter: 2-Leiter

*Sensor parameter:*

Trägerfrequenz:

*Carrier frequency:*

Verstärker -Seriennr.: 008596044104

*Amplifier serial number:*

Verstärker-Hardware-Rev.: 1.13

*Amplifier hardware revision:*



PJ Messtechnik GmbH

## Prüfschein MGC-Anschlussplatte AP801

Verification Certificate MGC-Connector Plate AP801

Prüfschein Nummer (Number of verification certificate): 2010-04-15\_AP801\_166671534

### Messergebnisse / Results

Kanal <i>Channel</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
Input [V]	Messwert [V] <i>Measured values [V]</i>							
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
+ 2	1.9995	1.9996	1.9996	1.9994	1.9994	1.9997	1.9996	1.9995
+ 4	3.9995	3.9997	3.9998	3.9993	3.9993	3.9999	3.9997	3.9995
+ 5	4.9993	4.9996	4.9997	4.9991	4.9992	4.9998	4.9995	4.9993
+ 6	5.9991	5.9994	5.9997	5.9989	5.9990	5.9997	5.9995	5.9991
+ 8	7.9991	7.9995	7.9999	7.9989	7.9990	7.9999	7.9996	7.9991
+ 10	9.9989	9.9993	9.9998	9.9986	9.9987	9.9998	9.9994	9.9988
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
- 2	-1.9998	-1.9999	-2.0001	-1.9998	-1.9999	-2.0000	-2.0000	-1.9997
- 4	-3.9998	-4.0000	-4.0003	-3.9998	-3.9999	-4.0002	-4.0001	-3.9997
- 5	-4.9996	-4.9999	-5.0003	-4.9996	-4.9998	-5.0001	-5.0000	-4.9995
- 6	-5.9994	-5.9997	-6.0001	-5.9994	-5.9996	-6.0000	-5.9998	-5.9993
- 8	-7.9995	-7.9999	-8.0003	-7.9994	-7.9996	-8.0002	-8.0000	-7.9993
- 10	-9.9993	-9.9998	-10.0004	-9.9992	-9.9994	-10.0002	-9.9999	-9.9990
Max. Abweichung [%] <i>Max. deviations [%]</i>								
Absolute	-0.0114155	-0.00668526	0.00403404	-0.0141048	-0.0127697	-0.00314474	-0.00554085	-0.0115013
Linearität + <i>Linearity</i>	0.00278266	0.00244753	0.00362879	0.0032358	0.00369238	0.00282769	0.00303881	0.00235346
Linearität -	0.00167382	0.0012112	0.00152105	-0.00133764	-0.00133284	0.001111	0.00134469	0.00133527
Ergebnis <i>Result</i>	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

### Auswertung / Evaluation

Absolut: Max. Abweichung in [%] (bezogen auf den Messbereichs-Endwert)

*Absolute: Max. deviation in [%] (rel. to full-scale value)*

Linearität: Max. Linearitätsabweichung von Null- Endpunkt-Gerade (bezogen auf den Messbereichs- Endwert)  
+ für pos. Dehnungen, - für neg. Dehnungen

*Linearity: Max. linearity deviation from the line through zero and max. measuring value (rel. to full-scale value)  
+ for pos. strain, - for neg. strain*

### Messunsicherheit / Uncertainty

Die relative Messunsicherheit der Prüfung beträgt  $\pm (0,01\% + 2 \text{ mV})$

*The uncertainty of the verification is  $\pm(0,01\% + 2 \text{ mV})$*

### Nächste Überprüfung / Next Verification

Ende (Monat / Jahr) / *end of (month / year):* 03 / 2012



PJ Messtechnik GmbH

## Prüfschein MGC-Anschlussplatte AP801

Verification Certificate MGC-Connector Plate AP801

Prüfschein Nummer (Number of verification certificate): 2010-04-15\_AP801\_166671534

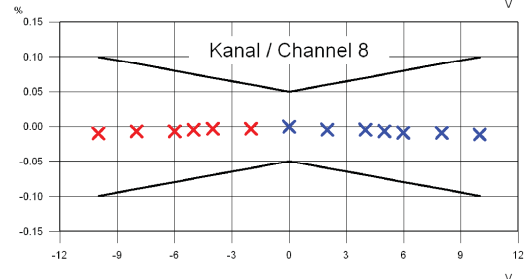
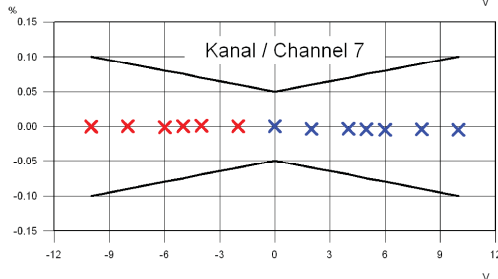
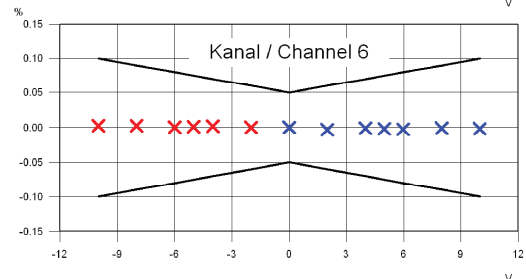
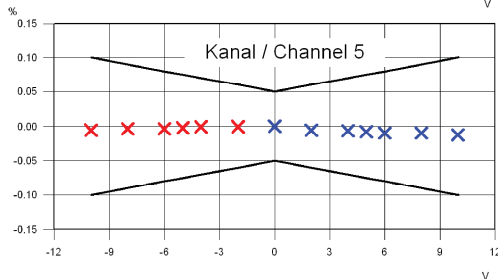
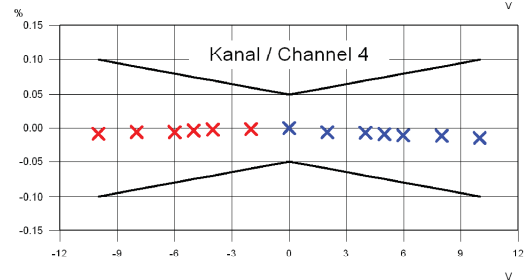
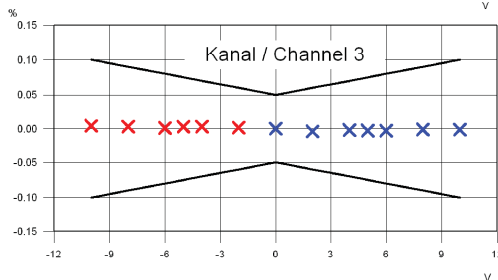
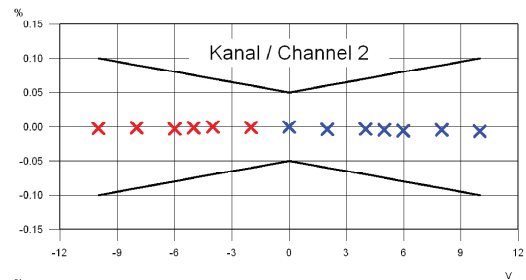
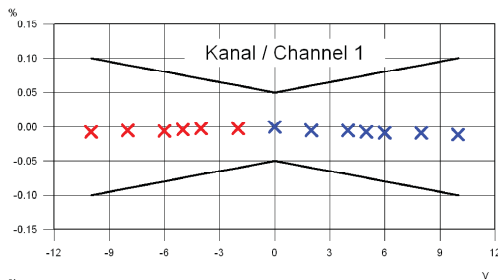
### Diagramme der absoluten Abweichungen / Diagrams of the absolute deviations

Messbereich: 10 V

Zul. abs. Abweichung:  $\pm(0.05\% \text{ vom Messwert} + 0.05\% \text{ vom Messbereich})$

Measure range:

Permitted abs. deviation:  $\pm(0.05\% \text{ of reading} + 0.05\% \text{ of range})$



### 13.5. Fertigungszeichnungen

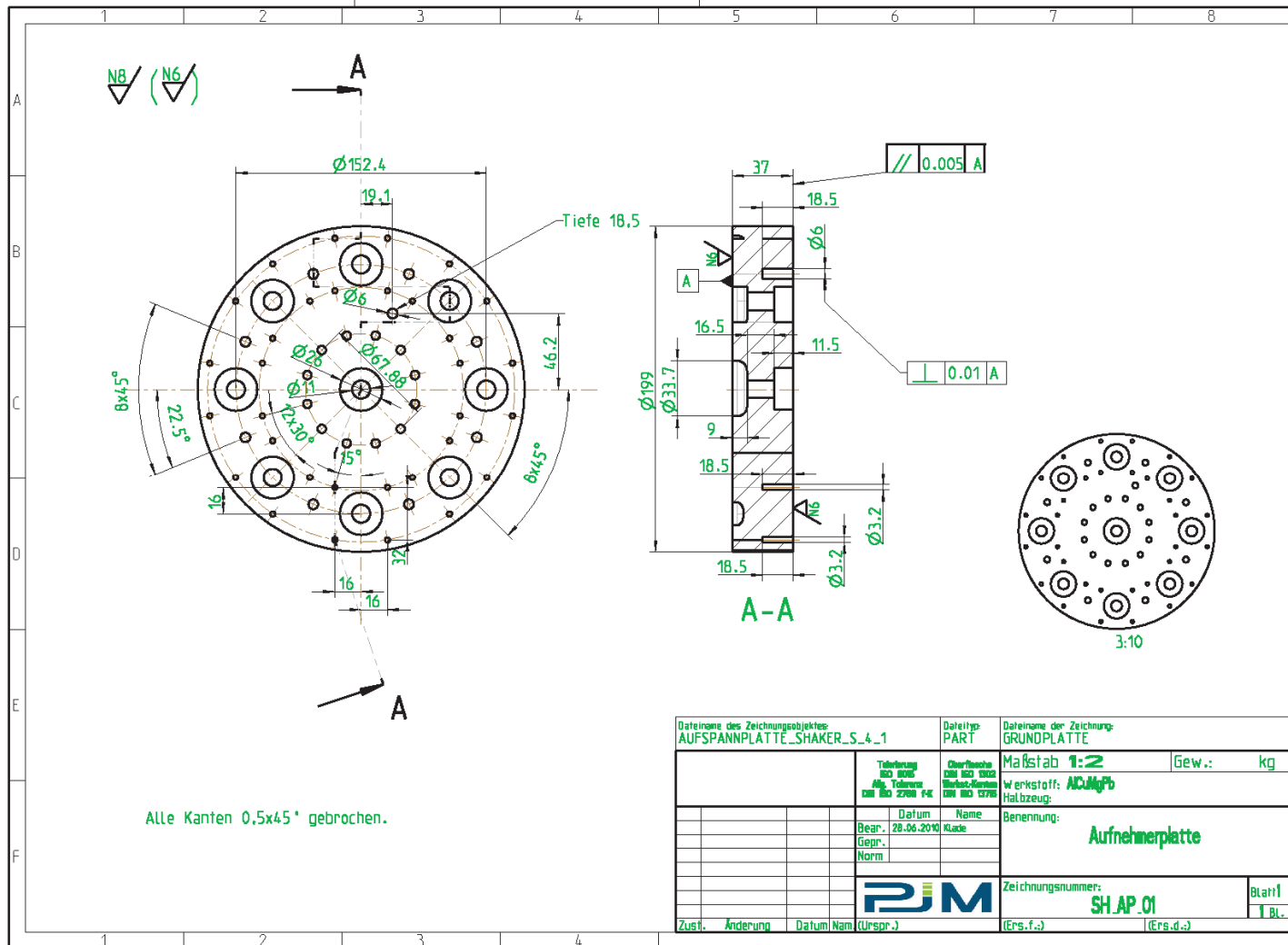


Abbildung 71: Fertigungszeichnung Grundplatte

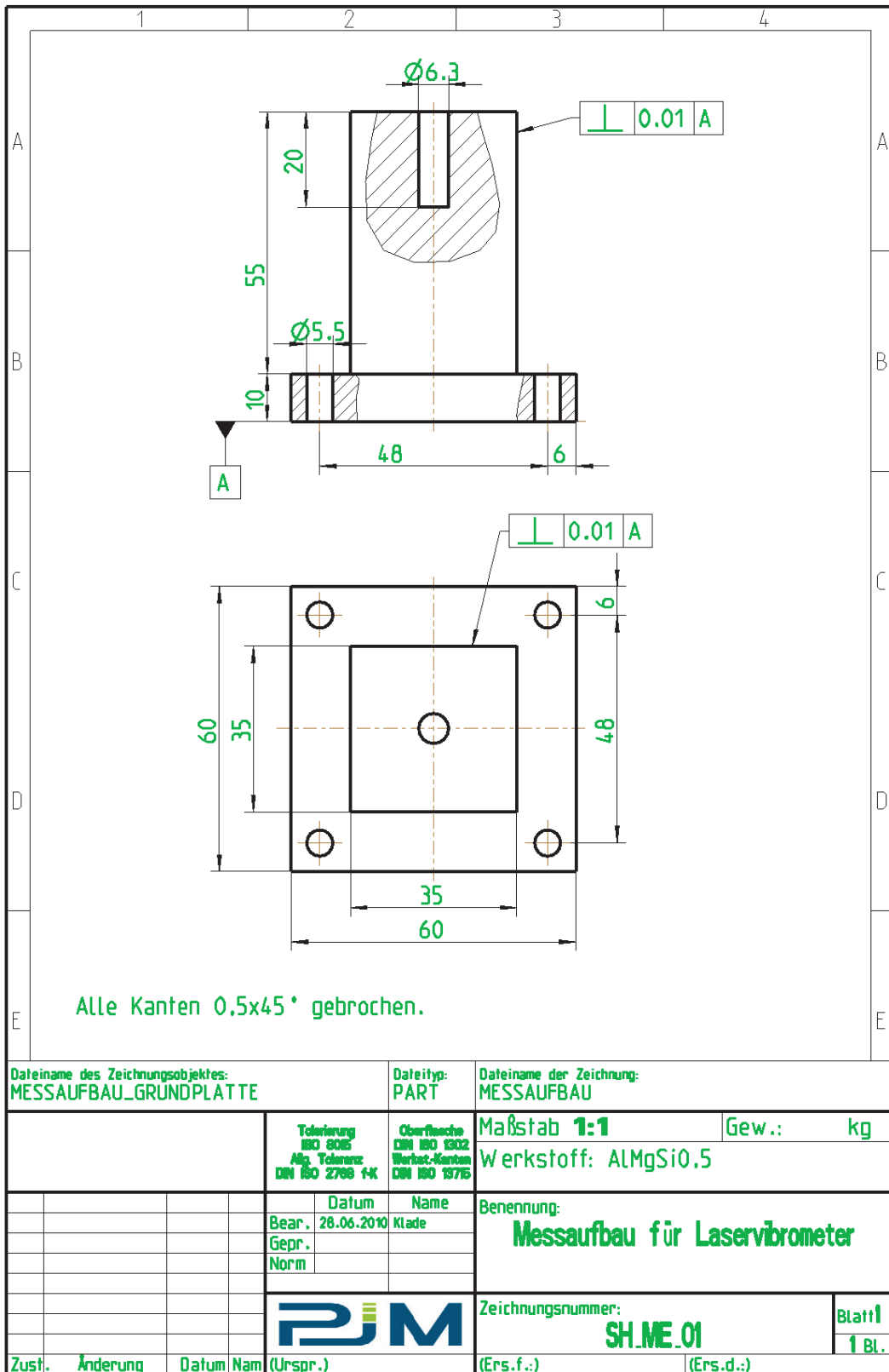


Abbildung 72: Fertigungszeichnung des Messaufbaus