

Wozu Schwingungssensoren?

In vielen Bereichen unseres Lebens laufen Bewegungen ab:

Das Auto rollt, ein Kompressor arbeitet, eine Werkzeugmaschine schleift, ein Bagger hebt eine Grube aus, Flugzeugtriebwerke drehen sich, Förderbänder und Greifer transportieren Pakete, ich wohne an einer verkehrsreichen Straße.

Alle Bewegungen erzeugen gewollt, als Begleiterscheinung ungewollt oder auch durch Abnutzung Schwingungen und Stöße. Häufig stören sie, wenn sie nur groß genug sind:

Das Auto rumpelt, der Kompressor vibriert, die bearbeiteten Teile werden ungenau und rau, der Baggerfahrer wird durchgerüttelt, ein Triebwerk fällt aus oder sogar ab, Pakete und ihr Inhalt werden beschädigt, beim Vorbeifahren eines Brummis klirren die Gläser im Schrank.

Allen Störungen ist gemeinsam, dass die Ursache Schwingungen und Stöße sind. Werden diese ständig oder im Turnus gemessen, werden falsche Funktion, Abnutzung und Schäden erkannt und können behoben werden.

Was sind das für Sensoren?

Apparaturen, mit denen man Schwingung misst, lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- Berührungslose Messverfahren
- Kontaktmessverfahren

Zur ersten Kategorie gehören das Wirbelstromverfahren sowie die laser-optischen Messverfahren. Zur zweiten Kategorie zählen piezoelektrische, piezoresistive und induktive Messverfahren.

Die Beschleunigungsaufnehmer, die Metra seit über 40 Jahren entwickelt und produziert, basieren auf dem piezoelektrischen Wirkprinzip. „Piezo“ kommt aus dem Griechischen und steht für drücken oder pressen. Wird ein piezoelektrisches Material Druck mechanischen Spannungen ausgesetzt, produziert es elektrische Ladung. Wird es mit einer seismischen Masse kombiniert, liefert es ein zur eingeleiteten Schwingbeschleunigung proportionales Ladungssignal.

Das aktive Element von Metra-Beschleunigungsaufnehmern besteht aus einer sorgfältig ausgewählten Piezokeramik mit hervorragenden Eigenschaften. Es handelt sich um Blei-Zirkonium-Titanat (PZT), das für stabile Übertragungseigenschaften gegenüber Umgebungseinflüssen und hohe Langzeitkonstanz optimiert wurde. Hohe Langzeitkonstanz, die die Größenordnung von Quarzsensoren erreicht, wird durch künstliche thermische Alterung während der Produktion erreicht. Ein gravierender Vorteil von Piezokeramik gegenüber Quarz ist die um den Faktor 100 höhere Empfindlichkeit. Das ist insbesondere bei niedrigen Frequenzen und geringen Schwingamplituden vorteilhaft.

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer sind heute allgemein als die beste Sensorik für Schwingungen anerkannt. Verglichen zu den anderen Sensorprinzipien bieten sie eine Reihe entscheidender Vorteile:

- Außerordentlich großer Dynamikumfang. Geringstes Rauschen macht piezoelektrische Sensoren gleichermaßen geeignet für die Messung kaum wahrnehmbarer Schwingungen und starker Stöße.
- Hervorragende Linearität über den gesamten Dynamikbereich.
- Weiter Frequenzbereich, auch höchste Frequenzen messbar.
- Hohe Empfindlichkeit bei geringen Abmessungen.
- Keine beweglichen inneren Teile, die beim Gebrauch verschleifen können.
- Selbstgenerierendes Prinzip - keine Hilfsenergie erforderlich.
- Sie sind in vielen Varianten herstellbar, damit gut anzupassen.
- Das Beschleunigungssignal kann einfach oder doppelt integriert werden um Schwinggeschwindigkeit oder Schwingweg zu erhalten.

Die folgende Tabelle stellt die am meisten verbreiteten Sensortypen für Schwingungen den piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern gegenüber:

| Sensortyp | Vorteil | Nachteil |
|------------------|---|--|
| Piezoresistiv | -misst auch statische Beschleunigung | -eingeschränkte Auflösung durch Widerstandsrauschen -nur für tiefe und mittlere Frequenzen -Versorgungsspannung erforderlich |
| Elektrodynamisch | | -nur für tiefe Frequenzen |
| Kapazitiv | -misst auch statische Beschleunigung -preiswerte Herstellung mit Halbleitertechnologie | -geringere Auflösung -zerbrechlich |

Welche Signalverarbeitung?

Der Wandlungsvorgang benötigt keine Hilfsenergie. Die an das nachfolgende Messgerät oder an den integrierten ICP®-Verstärker als Signal abgegebene Energie bezieht der Aufnehmer aus der Beschleunigung beim Messvorgang. Grundsätzlich wird Wechselbeschleunigung gemessen, häufig auch Vibration genannt. Gleichbleibende Beschleunigung, z.B. die Erdbeschleunigung, ist nicht messbar.

Das Signal des Sensors muss verstärkt und ggf. gefiltert oder integriert werden. ICP®-kompatible Aufnehmer benötigen zusätzlich eine Konstantstromversorgung. Hierfür eignen sich z.B. die Messverstärker M28, M32, M68, M108 und M116 von Metra. Für Sensoren ohne Elektronik werden Ladungsverstärker benötigt, z.B. die Typen M68 oder ICP100.

Nach der Vorverstärkung werden verschiedene Auswerteverfahren für das Schwingensignal angewandt:

- Bildung von Momentanwert, Spitzenwert und Effektivwert der Schwingbeschleunigung,
- Einfache oder zweifache Integration zur Bestimmung von Schwinggeschwindigkeit oder Schwingweg ,
- Anwendung von Filterung und Frequenzbewertung, FFT und Kreuzkorrelation.

Um die Leistungsfähigkeit moderner Messwertverarbeitungssysteme auszuschöpfen, ist es jedoch unumgänglich, das schwächste Glied der Messkette, den Sensor, genau zu kennen. Dazu soll Ihnen die folgende Abhandlung verhelfen.

Standards für Schwingungsaufnehmer

Auswahl von Standards mit Bezug zu piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern:

- **ISO 5348:** Mechanische Schwingungen und Stöße - Mechanische Ankopplung von Beschleunigungsaufnehmern
- **ISO 2041:** Mechanische Schwingungen und Stöße - Begriffserklärung
- **ISO5347:** Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern
- **ISO 8042:** Stoß- und Schwingungsmessung - Technische Daten seismischer Beschleunigungsaufnehmer
- **ISO2954:** Mechanische Schwingungen an rotierenden und Hubkolbenmaschinen - Anforderungen an Schwingstärkemessgeräte

Im Aufnehmergehäuse ist ein piezoelektrisches Material befestigt. Bild 1 erläutert das Wirkprinzip anhand einer Kompressionsscheibe. Diese ähnelt einem Keramik Kondensator mit zwei sich gegenüberliegenden Elektroden. Eine senkrecht zur Elektrodenfläche einwirkende Kraft bewirkt eine Ladungsverschiebung in der Keramik und kann als Spannung an den Elektroden abgenommen werden.

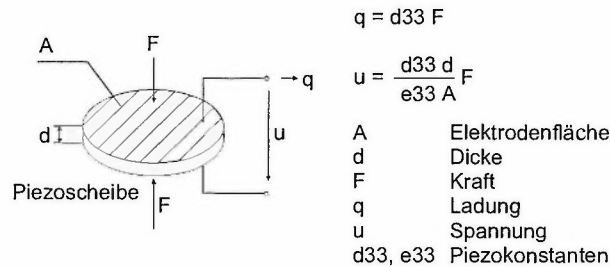


Bild 1: Piezoelektrischer Effekt, Grundberechnungen

Ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor besteht aus zwei Grundbestandteilen:

- Piezoelektrisches Material
- Seismische Masse

Die eine Seite der Piezoscheibe ist mit der sogenannten seismischen Masse verbunden, die andere mit einem starren Träger. Wenn diese Kombination in mechanische Schwingung versetzt wird, wirkt über die seismische (träge) Masse eine Kraft auf die Piezoscheibe. Nach dem Newtonschen Gesetz ist die entstehende Kraft das Produkt aus Beschleunigung und Masse. Durch den piezoelektrischen Effekt entsteht an den Elektroden eine Ladung, die proportional zur Kraft und damit auch zur Beschleunigung ist (vgl. Bild 2).

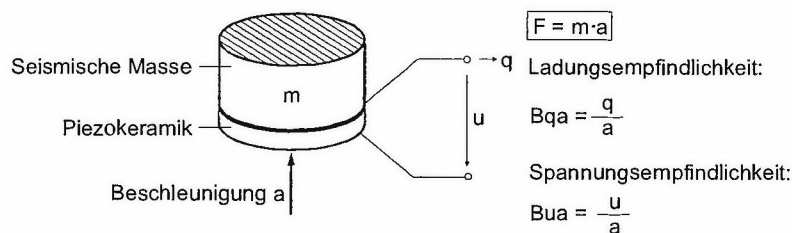


Bild 2: Wirkprinzip eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers

Das Piezoelement ist mit der Sensorbuchse über ein Drähtchen verbunden. Viele Beschleunigungsaufnehmer sind auch mit einem integrierten Impedanzwandler nach ICP®-Standard bestückt, womit die sehr hohe Impedanz der Piezokeramik in eine niedrigere umgesetzt wird.

Über einen breiten Frequenzbereich folgen der Sensorboden und die seismische Masse der gleichen Bewegung, wodurch der Sensor korrekt die Beschleunigung misst. Ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer kann als mechanischer Tiefpass mit Resonanzspitze betrachtet werden. Die seismische Masse bildet mit der Piezokeramik und anderen „nachgiebigen“ Teilen ein Feder-Masse-System. Dieses weist ein typisches Tiefpassverhalten mit linearem Frequenzbereich und Resonanzüberhöhung auf. Dadurch wird die obere Grenzfrequenz bestimmt. Um eine höhere Grenzfrequenz zu erhalten, muss die Resonanz nach oben verschoben werden, was durch Verringerung der seismischen Masse geschieht. Je geringer die seismische Masse jedoch wird, desto geringer ist auch die Empfindlichkeit des Sensors. Das hat zur Folge, dass Beschleunigungsaufnehmer mit hoher Grenzfrequenz nur geringe Empfindlichkeiten besitzen (abgesehen von Sensoren mit interner Verstärkung). Andererseits haben hochempfindliche, seismische Sensoren immer eine relativ geringe obere Grenzfrequenz.

Bild 3 zeigt das typische Frequenzverhalten eines Beschleunigungsaufnehmers bei Anregung mit konstanter Beschleunigung.

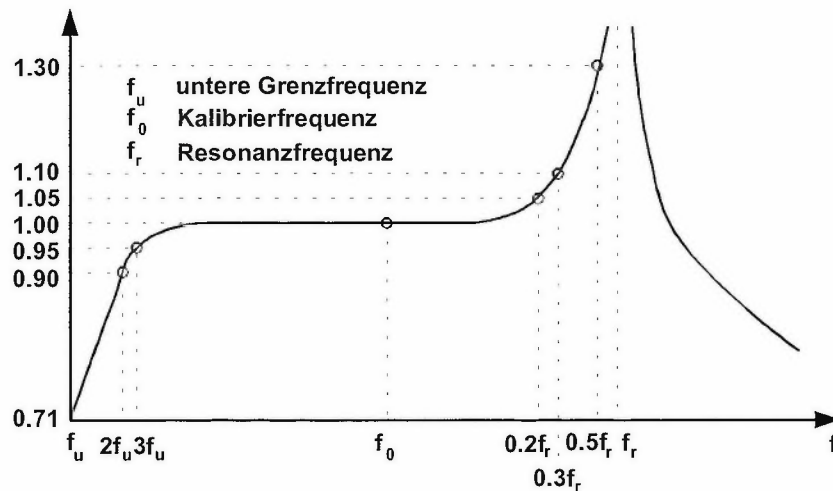


Bild 3: Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers

Aus obigem Diagramm lassen sich folgende charakteristische Frequenzgrenzen ablesen:

- Bei etwa $1/5$ der Resonanzfrequenz steigt die Empfindlichkeit auf das 1,05-fache. Der Messfehler gegenüber der Kalibrierfrequenz wird ca. 5 %.
- Bei etwa $1/3$ der Resonanzfrequenz wird der Fehler ca. 10 %. Diese Grenze wird oft als linearer Bereich charakterisiert.
- Die 3 dB-Grenzfrequenz, die mit ca. 30 % Messfehler identisch ist, liegt bei der Hälfte der Resonanzfrequenz.

Diese Angaben stellen typische Werte dar und können je nach Aufnehmertyp variieren.

Die untere Grenzfrequenz wird hauptsächlich vom angeschlossenen Messverstärker bestimmt. Bei vielen Geräten ist sie wählbar. Bei Verwendung von Spannungsverstärkern wird sie von der RC-Zeitkonstante bestimmt, die sich aus dem Verstärker-Eingangswiderstand, sowie den Kapazitäten von Sensor, Kabel und Verstärkereingang bildet.

Die Grundfunktion, also die Wandlung mechanischer Beschleunigung in ein elektrisches Signal, ist bei allen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern identisch. Die verschiedenen Konstruktionen dienen der Anpassung an die unterschiedlichsten Messaufgaben und dem Schutz gegen äußere Störeinträge.

Drei Wirkungsmechanismen für die mechanisch-elektrische Wandlung wenden wir an. Die Typenbezeichnungen unserer Aufnehmer sind daraus abgeleitet:

- Schersystem („KS“-Typen)
- Kompressionssystem („KD“-Typen)
- Biegesystem („KB“-Typen)

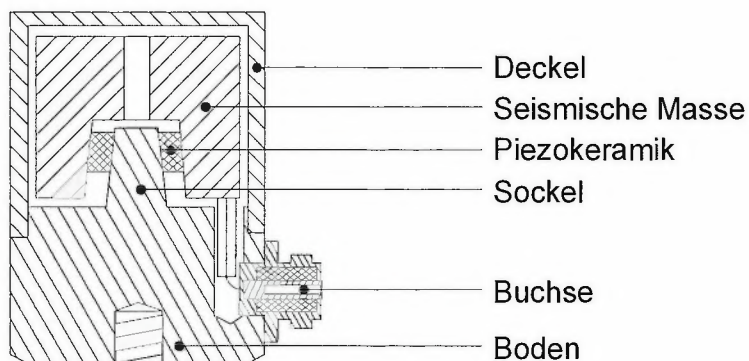
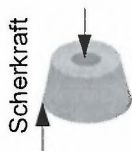
Die folgende Tabelle fasst die Vor- und Nachteile dieser drei Grundtypen zusammen:

| | Scherung | Kompression | Biegung |
|------------------|---|--|--|
| Vorteile | <ul style="list-style-type: none">• Geringe Temperatursprungempfindlichkeit• Geringe Beeinflussung durch Messobjektdehnung | <ul style="list-style-type: none">• Hohe Empfindlichkeit• Robustheit• Bewährte Technologie• Preisgünstig herzustellen | <ul style="list-style-type: none">• Hohe Empfindlichkeit bei geringer Masse |
| Nachteile | <ul style="list-style-type: none">• Geringere Empfindlichkeit | <ul style="list-style-type: none">• Hohe Störbeeinflussung bei Temperatursprüngen• Hohe Störbeeinflussung bei Messobjektdehnung | <ul style="list-style-type: none">• Bruchempfindlich• Relativ hohe Störbeeinflussung bei Temperatursprüngen |

Die meisten neu entwickelten Beschleunigungsaufnehmer gehören zum Schertyp, wenngleich auch die anderen Bauweisen noch ihre Daseinsberechtigung behalten.

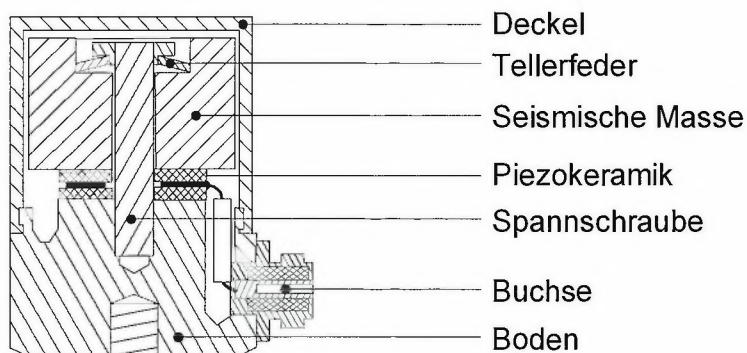
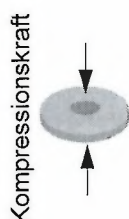
Die folgende Übersicht zeigt die drei Grundtypen in ihren wichtigsten Bestandteilen:

Schersystem:



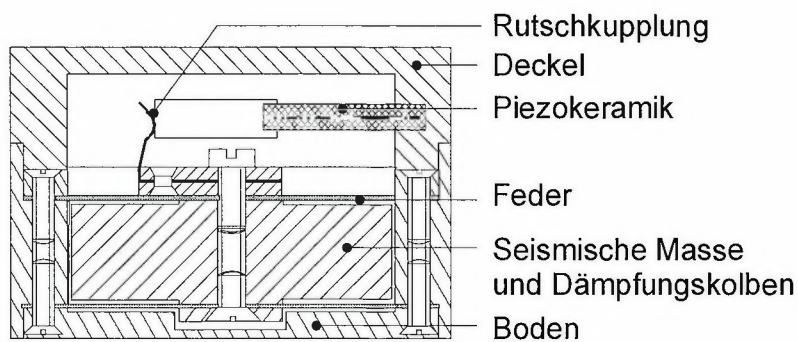
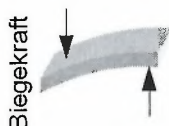
Beispiel: KS51

Kompressionssystem:



Beispiel: KD38

Biegesystem:



Beispiel: KB12

Metra fertigt eine Vielzahl von Beschleunigungsaufnehmern mit eingebautem Impedanzwandler oder Vorverstärker. Dieser wandelt das hochimpedante Signal der Piezokeramik in ein Spannungssignal niedriger Impedanz um. Dafür verwendet Metra den etablierten IEPE-Standard, wodurch Kompatibilität zu Sensoren und Messgeräten vieler anderer Hersteller gewährleistet ist. Die Abkürzung IEPE steht für "Integrated Electronics Piezo Electric". Andere Bezeichnungen für dasselbe Prinzip sind ICP®, Isotron®, Deltatron®, Piezotron® etc. Die eingebaute Elektronik wird über Konstantstrom versorgt (vgl. Bild 1). Die Besonderheit liegt darin, dass Versorgungsstrom und Sensorsignal über das gleiche Kabel übertragen werden. Über dem Sensor bildet sich dabei eine positive Arbeitspunktspannung. Das Schwingensignal wird vom Sensor zurück übertragen, indem es der Arbeitspunktspannung aufmoduliert wird. Der Koppelkondensator C_c vor dem Messgeräteingang dient zur Auskopplung des Gleichanteils. Da die Ausgangsimpedanz üblicher IEPE-Aufnehmer unter $100\ \Omega$ liegt, darf das Kabel bis zu einigen hundert Metern lang sein, ohne dass die Signalqualität darunter leidet. Auf teure störarme Kabel kann zugunsten preiswerter Koaxialkabel verzichtet werden.

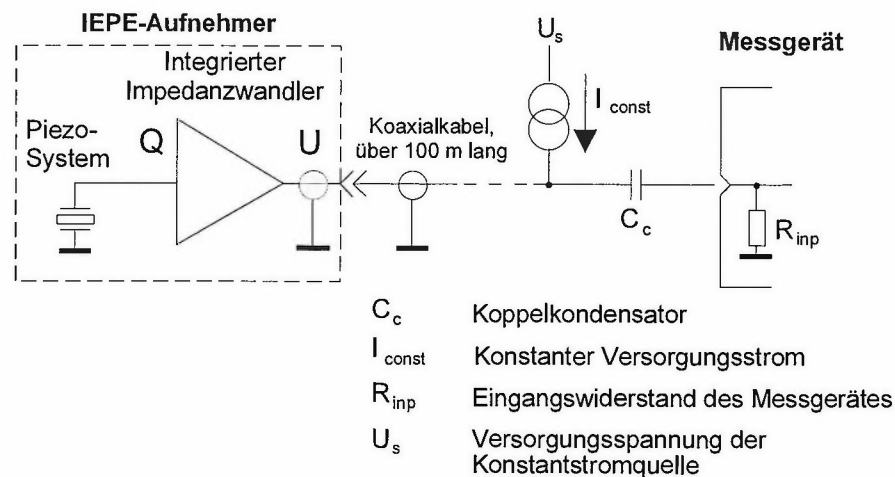


Bild 1: IEPE-Prinzip

Der Konstantstrom kann zwischen 2 und 20 mA liegen (Nicht mit dem 4-20 mA-Stromschleifenstandard verwechseln!). Je kleiner der Speisestrom, desto höher wird die Ausgangsimpedanz und damit die Störempfindlichkeit. Ein Konstantstrom von 4 mA liefert in den meisten Fällen ein sinnvolles Optimum zwischen Störfestigkeit und Strombedarf. Die Arbeitspunktspannung am Sensorausgang, d.h. die Ruhespannung ohne Beschleunigung, liegt bei Metra-Sensoren im Bereich von 8 bis 12 V. Sie ist von der Temperatur und vom Speisestrom abhängig. Um diese Arbeitspunktspannung oszilliert das Sensorsignal (vgl. Bild 2). Die Sensorspannung kann dabei nie negativ werden. Die obere Aussteuerungsgrenze wird durch die Versorgungsspannung der Konstantstromquelle bestimmt. Diese sollte im Bereich von 24 bis 30 V liegen. Die untere Aussteuerungsgrenze wird durch die Sättigungsspannung des integrierten Impedanzwandlers bestimmt und liegt bei etwa 0,5 V. Metra garantiert eine Mindestaussteuerbarkeit von $\pm 6\ V$.

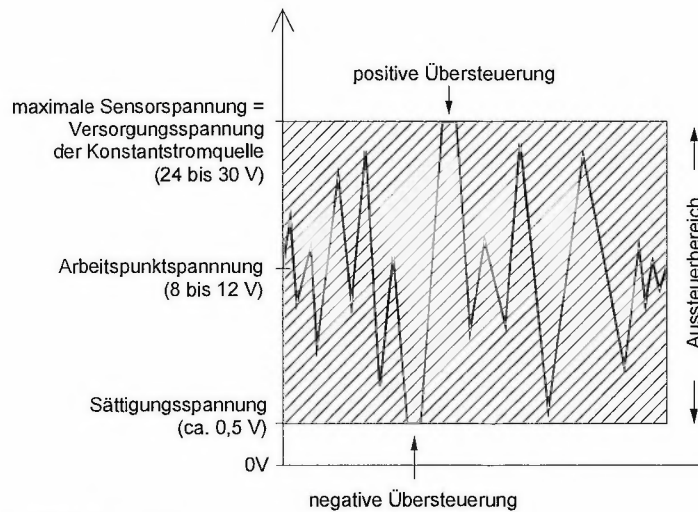


Bild 2: Aussteuer Grenzen IEPE-Sensoren

Die untere Grenzfrequenz der IEPE-Beschleunigungsaufnehmer von Metra liegt bei 0,3 Hz für Scher- und Biegesysteme sowie bei 3 Hz für Kompressionssysteme. Die obere Grenzfrequenz hängt hauptsächlich von der mechanischen Konstruktion ab.

Bei längeren Kabeln muss ggf. die Kabelkapazität für die obere Grenzfrequenz mit in Betracht gezogen werden. Typische Koaxialkabel für IEPE-Aufnehmer, wie sie von Metra geliefert werden, haben eine Kapazität von ca. 100 pF/m.

Bild 3 zeigt die maximale Aussteuerbarkeit über die Frequenz mit den Parametern Kabelkapazität und Speisestrom. Mit steigender Kabelkapazität sinkt die Aussteuerbarkeit. Ursache ist die verringerte Spannungsanstiegsgeschwindigkeit des Verstärkers durch umzuladende Kapazitäten. Bei sehr langen Kabeln ist nur noch bei Frequenzen bis zu einigen hundert Hertz Vollaussteuerung von ± 6 V möglich. Dieser Effekt kann durch Erhöhung des Speisestroms in gewissen Grenzen kompensiert werden. Bis zu 10 nF Kabelkapazität (entspricht 100 m Standardkabel) ist bei 4 mA Speisestrom keine Einschränkung der Aussteuerbarkeit zu erwarten.

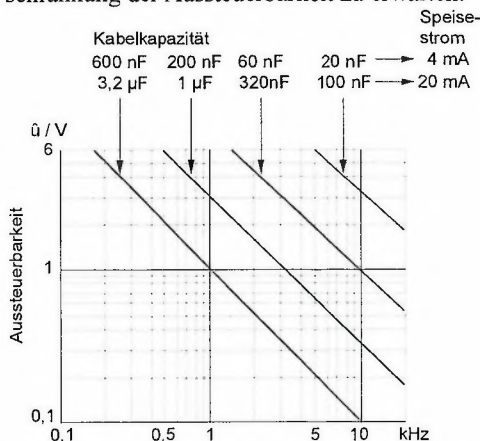


Bild 3: Aussteuerbarkeit eines IEPE-Impedanzwandlers in Abhängigkeit von Kabelkapazität und Speisestrom

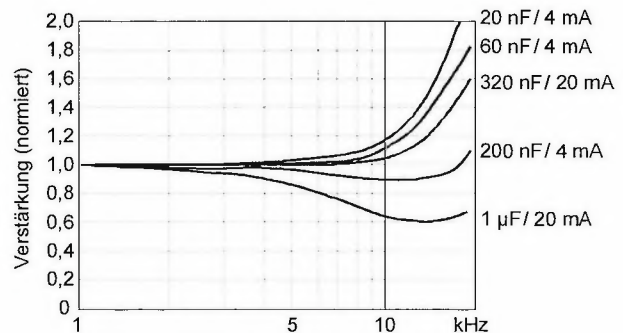


Bild 4: Frequenzgang eines IEPE-Impedanzwandlers in Abhängigkeit von Kabelkapazität und Speisestrom

Bild 4 zeigt den Frequenzgang der Sensorelektronik bei unterschiedlichen Kabelkapazitäten und Speiseströmen. Bei höheren Kapazitäten sinkt die obere Grenzfrequenz. Ursache ist der RC-Tiefpass, der sich aus Aufnehmerinnenwiderstand und Kabelkapazität bildet. Bei 4 mA kann bis zu einer Kabelkapazität von ca. 50 nF (entspricht 500 m Standardkabel) mit einer unwesentlichen Verfälschung des Frequenzganges gerechnet werden.

Im Allgemeinen werden heute IEPE-Beschleunigungsaufnehmer denen mit Ladungsausgang vorgezogen. Es gibt jedoch Anwendungsfälle, in denen letztere überlegen sind. Die folgende Tabelle vergleicht Vor- und Nachteile beider Sensortypen:

| | IEPE-Ausgang | Ladungsausgang |
|-------------------|---|--|
| Vorteil | <ul style="list-style-type: none">• Empfindlichkeit wird nicht von Länge und Art des Kabels beeinflusst• Niederimpedanter Ausgang erlaubt lange Sensorkabel• Keine Spezialkabel erforderlich• Einfache Selbsttestfunktion möglich• Bessere Beständigkeit gegenüber Schmutz und Feuchtigkeit | <ul style="list-style-type: none">• Keine Stromversorgung erforderlich - ideal für Batteriegeräte• Kein Rauschen - höchste Auflösung• Hoher Dynamikbereich• Höhere Umgebungstemperaturen möglich• Kleinere Bauformen möglich |
| • Nachteil | <ul style="list-style-type: none">• Konstantstromspeisung erforderlich• Interne Rauschquelle durch die Elektronik• Umgebungstemperatur begrenzt auf $<120\text{ }^{\circ}\text{C}$ | <ul style="list-style-type: none">• Nur kurze Sensorkabel• Spezielle störarme Kabel erforderlich• Ladungsverstärker erforderlich |

Metra verwendet zur Werkskalibrierung ein modernes PC-gestütztes Messsystem. Die Kalibrierung basiert auf einem Transfornormal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

Unsere Aufnehmer werden, von wenigen Ausnahmen abgesehen, mit einem individuellen Kennblatt ausgeliefert (siehe Beispiel in Bild 1). Darauf sind alle individuell gemessenen Daten vermerkt, wozu Empfindlichkeit, Querempfindlichkeit, Isolationswiderstand, Kapazität, Arbeitspunktspannung und Frequenzgang gehören. Weiterhin sind die verfügbaren typischen Kennwerte enthalten.

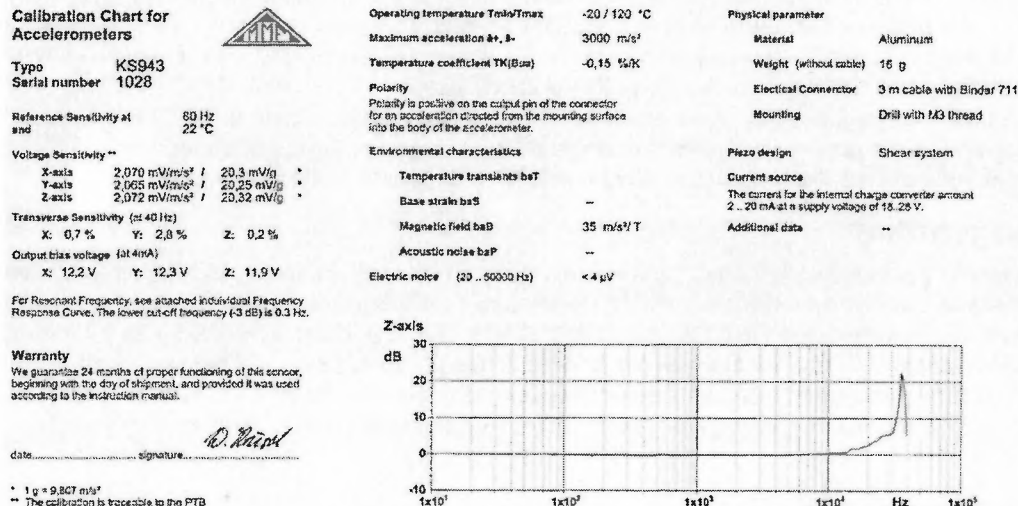


Bild 1: Kennblatt für Metra-Beschleunigungsaufnehmer

Die folgenden Abschnitte erläutern die im Kennblatt angegebenen Messgrößen.

Übertragungsfaktoren

Ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsausgang kann entweder als Ladungsquelle oder als Spannungsquelle mit sehr hohem Innenwiderstand betrachtet werden. Demzufolge werden Ladungs- oder Spannungsempfindlichkeit (auch Übertragungsfaktoren genannt) angegeben, um das Verhalten des Sensors gegenüber der Beschleunigung zu beschreiben. Im Kennblatt gibt Metra den Ladungsübertragungsfaktor, gemessen in Picocoulomb je m/s² oder je g (1 g = 9,81 m/s²) bei einer Frequenz von 80 Hz und Raumtemperatur, an.

Bei IEPE-Aufnehmern wird die Empfindlichkeit in Millivolt je m/s² oder je g angegeben.

Die Messunsicherheit dieser Kalibrierung beträgt 2 % bei

$f = 80 \text{ Hz}$, $T = 21 \text{ °C}$, $a = 10 \text{ m/s}^2$, $C_{\text{KABEL}} = 150 \text{ pF}$, $I_{\text{CONST}} = 4 \text{ mA}$.

Diese Messunsicherheit darf nicht mit der Abgleichtoleranz verwechselt werden, die bei einigen Typen angegeben wird. Der Beschleunigungsaufnehmer KS80 hat z.B. eine Abgleichtoleranz von $\pm 5 \%$ bezogen auf die Nennempfindlichkeit von 100 mV/g. Die Standardtoleranz ist, wenn nicht anders angegeben, $\pm 20 \%$. Die tatsächliche Empfindlichkeit darf also von der im Katalog angegebenen Nennempfindlichkeit um die angegebene Toleranz abweichen.

Der Ladungsübertragungsfaktor ist bei piezokeramischen Sensoren gering frequenzabhängig. Er vermindert sich um typisch 2 % je Frequenzdekade. Für Präzisionsmessungen weit ab von der Werkskalibrierfrequenz 80 Hz sollte eine Nachkalibrierung bei der gewünschten Frequenz erfolgen.

Bevor ein Beschleunigungsaufnehmer das Werk verlässt, durchläuft er einen künstlichen Alterungsprozess. Dennoch kann weitere Alterung nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Typisch ist ein Absinken der Empfindlichkeit um 3 % in den ersten 3 Jahren nach Herstellung. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen sollte ein regelmäßiger Nachkalibrierzyklus eingehalten werden.

Frequenzgang

Die Messung des Frequenzgangs erfolgt durch mechanische Anregung. Metra nutzt hierzu einen selbstentwickelten Schwingungserreger, der mit Sinussignalen von 20 (80) bis 40000 Hz gespeist wird. Die Beschleunigung wird dabei mit Hilfe einer Referenzschleife annähernd auf 3 m/s^2 konstant gehalten. Die meisten Beschleunigungsaufnehmertypen werden mit einer individuell gemessenen Frequenzgangkurve ausgeliefert. Diese gibt die Änderung der Sensorempfindlichkeit in Dezibel bis in den Resonanzbereich an. Die Resonanzspitze ist oft durch Nebenresonanzen überlagert. Aus dem Diagramm kann z.B. die 3-dB-Grenzfrequenz ermittelt werden. Sie gibt die Frequenz an, bei der der Messfehler 30 % erreicht. Die 3 dB-Frequenz liegt üblicherweise bei ca. 50 % der Resonanzfrequenz. Die 1 dB-Grenzfrequenz kennzeichnet die 10 %-Fehlergrenze. Sie liegt bei etwa einem Drittel der Resonanz.

Metra führt die Messung des Frequenzgangs unter optimalen Ankoppelbedingungen durch. In der Praxis kann der tatsächliche Frequenzgang von der gemessenen Kurve abweichen, da die Ankoppelbedingungen oft schlechter sind.

Durch sehr lange Sensorkabel kann das Frequenzverhalten von IEPE-Aufnehmern beeinträchtigt werden.

Querrichtungsfaktor

Der Aufnehmer überträgt grundsätzlich Schwingungen in seiner geometrischen Hauptrichtung bzw. in der gekennzeichneten Richtung. Konstruktionsbedingt nimmt er jedoch auch von dieser Richtung abweichende Schwingungen auf. Das Verhältnis zwischen Übertragungsfaktor senkrecht zur Hauptrichtung und dem Übertragungsfaktor in Hauptrichtung nennt man Querrichtungsfaktor. Der Querrichtungsfaktor ist winkelabhängig und hat eine Achtercharakteristik.

Im Kennblatt wird der Maximalwert $\hat{A}_{90\text{max}}$ des Querrichtungsfaktors angegeben. Er wird als Verhältnis der Übertragungsfaktoren bei $f = 40 \text{ Hz}$ bestimmt. Übliche Werte sind $<5 \%$ für Scheraufnehmer und $<10 \%$ für Kompressions- und Biegeaufnehmer.

Maximalbeschleunigung

In den Technischen Daten sind folgende Grenzwerte angegeben:

- \hat{a}_+ Maximale Beschleunigung in positiver Richtung.
Das Messobjekt bewegt sich zum Aufnehmer hin.
- \hat{a}_- Maximale Beschleunigung in negativer Richtung.
Das Messobjekt bewegt sich vom Aufnehmer weg.
- \hat{a}_q Maximale Beschleunigung in Querrichtung.
(bei Stoßaufnehmern)

Bei Ladungsaufnehmern sind diese Grenzwerte üblicherweise nur durch den mechanischen Aufbau des Sensors definiert. Wenn einer der Grenzwerte kurzzeitig überschritten wird, z.B. durch Fallenlassen des Sensors, funktioniert dieser in der Regel noch. Es wird jedoch eine Nachkalibrierung dringend empfohlen. Andauernde Wechselbeschleunigung ist nur bis zu 25 % der Grenzwerte zulässig, um Ermüdungsschäden zu vermeiden. Wird ein Aufnehmer für sehr genaue Messungen verwendet, bei denen hohe zeitliche Stabilität der Kennwerte gefordert ist, so darf er nur mit 10 % der Grenzwerte belastet werden.

Typen mit sehr hoher Maximalbeschleunigung werden als Stoßaufnehmer bezeichnet. Sie zeichnen sich durch eine besonders robuste Konstruktion und relativ geringe Empfindlichkeit aus, z.B. der Typ KD93 mit $\hat{a}=100\,000 \text{ m/s}^2$.

Bei IEPE-Aufnehmern werden die Grenzwerte \hat{a}_+ und \hat{a}_- in der Regel durch die Aussteuergrenzen des integrierten Impedanzwandlers bestimmt.

Arbeitstemperaturbereich

Die obere Temperaturgrenze wird von der Curie-Temperatur des Wandlermaterials bestimmt, bei Blei-Zirkonat-Titanat-Keramik etwa 320°C . Oberhalb dieser Temperatur verschwinden die piezoelektrischen Eigenschaften. Da bereits unterhalb der Curietemperatur irreversible Veränderungen eintreten, ist die obere Temperaturgrenze dadurch definiert, dass die Übertragungsfaktoren sich um nicht mehr als 3 % ändern. Bei geklebten Aufnehmern und Aufnehmern mit innerem Verstärker ist die Temperaturbeständigkeit durch die verwendeten Klebstoffe bzw. die elektronischen Elemente festgelegt. Übliche Temperaturbereiche sind $-10 \dots 80^\circ\text{C}$ oder $-30 \dots 150^\circ\text{C}$. Oberhalb von 120°C kommen aufgrund der Temperaturempfindlichkeit elektronischer Bauteile nur noch Aufnehmer mit Ladungsausgang ohne integrierte IEPE-Elektronik in Betracht. Mit einem abgesetzten IEPE-Verstärker (z.B. ICP100 von Metra) kann das Sensorsignal zur Weiterleitung konditioniert werden.

Temperaturkoeffizienten

Außer den irreversiblen Veränderungen gibt es reversible Änderungen, die mit Temperaturkoeffizienten berechenbar sind.

Im Kennblatt werden bei Ladungsaufnehmern die Temperaturkoeffizienten für den Ladungsübertragungsfaktor $TK(B_{qa})$ und die Innenkapazität $TK(C_i)$ angegeben. Die Temperaturkoeffizienten von B_{qa} und C_i gelten mit einem 1,5 m-Anschlusskabel mit 150 pF.

Bei IEPE-kompatiblen Aufnehmern wird der Temperaturkoeffizient des Spannungsübertragungsfaktors $TK(B_{ua})$ angegeben.

Bei Aufnehmern mit Ladungsausgang besteht durch die unterschiedliche Größe der Temperaturkoeffizienten von B_{qa} , B_{ua} und C_i eine einfache Möglichkeit zur Verbesserung des Temperaturkoeffizienten. Dies geschieht bei Betrieb an einem Ladungsverstärker mit einer in Reihe zum Aufnehmer geschalteten temperaturunabhängigen Kapazität und beim Einsatz eines hochimpedanten Spannungsverstärkers mit einer Parallelkapazität. Der Wert dieser Kompensationskapazität errechnet sich nach:

$$C = C_i \frac{TK(C_i) - TK(B_{qa})}{TK(B_{qa})}$$

Diese Möglichkeit kann genutzt werden, wenn die Temperatur häufig stark schwankt. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass der resultierende Übertragungsfaktor kleiner wird.

Temperatursprungempfindlichkeit

An Piezoelementen aus keramischem Material entstehen bei sprunghaften Temperaturänderungen Ladungsverschiebungen. Ursache ist der sogenannte pyroelektrische Effekt. Bei Scheraufnehmern mit ihrer gegenüber Kompressionsaufnehmern um den Faktor 100 geringeren Pyroelektrizität treten jedoch nur Störungen durch Wärmedehnung der Konstruktionsteile in Erscheinung. Diese Störeinträge werden im Störübertragungsfaktor für Temperatursprünge b_{aT} zusammengefasst.

Die in den Aufnehmerdaten angegebenen Werte b_{aT} wurden aus der Sprungantwort auf einen Temperatursprung bei der unteren elektrischen Grenzfrequenz $f_u = 1$ Hz ermittelt.

Temperatursprünge äußern sich als Störgröße im Sensorausgangssignal vor allem im tiefen Frequenzbereich unter 10 Hz. Insbesondere bei empfindlichen Messungen mit Kompressionsaufnehmern kann es bereits unter Einwirkung von Zugluft zu tieffrequenten Störsignalen kommen. Aufnehmer mit Biegekeramik liegen hinsichtlich der Temperatursprungempfindlichkeit zwischen Scher- und Kompressionsaufnehmern. Eine Verbesserung kann mitunter durch thermische Isolation des Sensors mit Styropor o.ä. erreicht werden. Durch geeignete Wahl der unteren Grenzfrequenz am Messverstärker können diese Störungen weitestgehend eliminiert werden. Sollen tieffrequente Messungen unter 10 Hz durchgeführt werden, empfiehlt sich generell der Einsatz von Aufnehmern nach dem Scherprinzip.

Bodendehnung

Durch Dehnung des Messobjektes wird bei fester Verbindung die Koppelfläche des Aufnehmers mit verformt. Diese Deformation bewirkt unterschiedliche Einwirkungen auf das innere Wandlerelement. Diese werden im Störübertragungsfaktor für Messobjektdehnung b_{aS} zusammengefasst.

Die in den Aufnehmerdaten angegebenen Werte b_{aS} werden durch Dehnungsanregung bei den Frequenzen $f = 8$ bzw. 15 Hz auf einem Biegebalken ermittelt.

Messobjektdehnung stört vor allem im Frequenzbereich unter $f = 500$ Hz. Sie bewirkt schwer zu beseitigende Fehler, da sie bei schwingenden Teilen meist ein dem Nutzsignal ähnliches Spektrum hat. Stark ausgeprägt ist der Effekt bei Kompressionsaufnehmern, während Scherbeschleunigungsaufnehmer kaum auf Messobjektdehnung reagieren.

Magnetfelder

Magnetische Wechselfelder wirken durch Induktion und Magnetostraktion in den Wandlerkern. Beide Einwirkungen werden im Störübertragungsfaktor für Magnetfelder b_{aB} zusammengefasst.

Die in den Aufnehmerdaten angegebenen Werte b_{aB} werden bei der magnetischen Flussdichte $B = 0,01$ T und der Frequenz $f = 50$ Hz ermittelt.

Aufnehmer mit Edelstahlgehäuse zeigen eine höhere Immunität gegen Magnetfelder als solche mit Aluminiumgehäuse.

Die Magnetfeldempfindlichkeit piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer ist relativ gering und kann in der Regel vernachlässigt werden. Magnetfelder können in der Umgebung elektrischer Maschinen mit $f = 50$ Hz und deren Vielfachen stören.

Voraussetzung für die störungsfreie Signalübertragung bei Vorhandensein elektromagnetischer Felder ist auch eine gute Kabelschirmung. Dies ist von besonderer Wichtigkeit bei Sensoren mit Ladungsausgang. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Vermeidung von Erdschleifen. Bei langen Messkabeln oder Mehrkanalanwendungen empfiehlt sich die isolierte Montage des Aufnehmers. Einige Aufnehmer (z.B. KS74 und KS80) haben von der Signalmasse isolierte Gehäuse. Geeignet sind auch Isolierflansche.

Schalldruck

Hoher Schalldruckpegel bewirkt eine Deformation des Aufnehmergehäuses, die in das Wandlerelement hineinwirkt. Der Schalleinfluss wird mit dem Störübertragungsfaktor für Schalldruck b_{ap} beschrieben.

Die in den Aufnehmerdaten angegebenen Werte b_{ap} werden bei einem Schalldruck von 134 dB bestimmt. Die Zahlenwerte sind bezogen auf den Schalldruck 1 kPa (154 dB), der weit über der Schmerzgrenze liegt und praktisch nur bei Stoßwellen auftritt.

Schalldruck stört nur bei sehr hohem Pegel. Es ist zu unterscheiden zwischen der Bewegung des Messobjektes unter Schalleinwirkung, die von diesem Störübertragungsfaktor nicht erfasst wird und der direkten Einwirkung auf den Aufnehmer, die mit diesem Störübertragungsfaktor berechenbar ist.

Rauschen und Nachweisgrenze

Ein piezoelektrisches Sensorelement kann als reine kapazitive Quelle betrachtet werden und ist somit rauschfrei. Erst die Signalverarbeitungselektronik verursacht ein Rauschen infolge der Wärmebewegung der Elektronen. Somit ist eine Angabe zum Eigenrauschen nur bei IEPE-Aufnehmern sinnvoll.

Unterhalb von ca. 100 Hz besitzt es eine typische 1/f-Charakteristik, oberhalb von 100 Hz ist es nahezu konstant. Nachstehende Abbildung veranschaulicht diesen Zusammenhang an einem typischen Rauschspektrum eines IEPE-Beschleunigungsaufnehmers.

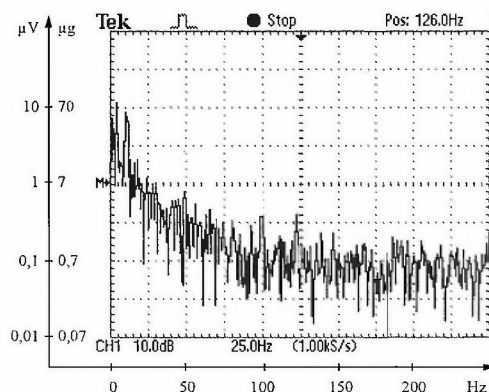


Bild 2: Typisches Rauschspektrum eines IEPE-Beschleunigungsaufnehmers

Es ist sinnvoll, die Rauschspannung am Signalausgang eines Aufnehmers auf dessen Eingangsgröße umzurechnen. Hierzu wird die gemessene Rauschspannung (u_n) durch den Übertragungsfaktor (B_{ua}) des Aufnehmers geteilt. Man erhält damit einen dem Rauschen äquivalenten Schwingpegel (a_n):

$$a_n = \frac{u_n}{B_{ua}}$$

Während u_n nur von der Elektronik bestimmt wird und bei den meisten Typen ähnliche Werte hat, geht die Empfindlichkeit des Sensorelements in den äquivalenten Rausch-Schwingpegel ein. Man erkennt, dass Aufnehmer mit empfindlichem Piezosystem eine sehr hohe Auflösung liefern.

Das Eigenrauschen eines IEPE-Aufnehmers ist in erster Linie frequenzabhängig. Um die Rauschgrenze abzuschätzen, wird in den Daten der meisten Sensoren das dem Rauschen äquivalente Beschleunigungssignal (a_n) für mehrere Frequenzen angegeben.

Beispiel für eine Rauschangabe im Sensordatenblatt:

| | |
|---------|-------|
| 1 Hz: | 70 µg |
| 10 Hz: | 7 µg |
| 100 Hz: | 2 µg |

Das Eigenrauschen bestimmt die Auflösung eines Aufnehmers. Messsignale die kleiner als der angegebene Rauschpegel sind, können nicht erfasst werden.

Die **Nachweisgrenze** ist nach DIN 45661 der Effektivwert der Eingangsbeschleunigung, bei der die Sensorspannung um den Faktor 2 über dem Rausch-Effektivwert liegt.

Der **Signal-Rausch-Abstand** S_n ist ein Maß für den durch das Rauschen verursachten Messfehler. Er ist definiert als logarithmische Maßzahl des Quotienten von Nutzsignal (u) und Rauschsignal (u_n):

$$S_n = 20 \log \frac{u}{u_n}$$

Bei der Bestimmung des Eigenrauschens einer Messanordnung ist auch das Rauschen der an den Sensor angeschlossenen Signalverarbeitungselektronik zu berücksichtigen.

Innenkapazität

Die Angabe der Innenkapazität erfolgt nur bei Beschleunigungsaufnehmern mit Ladungsausgang. Sie ist relevant, falls der Aufnehmer in Verbindung mit einem hochohmigen Spannungsverstärker betrieben wird. Die Aufnehmerkapazität wird mit der Kapazität des bei der Kalibrierung verwendeten 1,5 m-Kabels angegeben. Die Kapazität dieses Kabels ist auf dem Kennblatt separat vermerkt und muss von der Aufnehmerkapazität subtrahiert werden, um die tatsächliche Innenkapazität des Sensors zu erhalten.

Schutzgrade

Die Schutzgrade nach DIN 40050 kennzeichnen die Eignung eines Produkts für bestimmte Umgebungsbedingungen. Die erste Ziffer der IP-Nummer charakterisiert den Schutz vor dem Eindringen von Gegenständen und Staub. Die zweite Ziffer steht für den Schutz vor Feuchtigkeit.

| Nummer | Erste Ziffer | Zweite Ziffer |
|--------|--|---|
| 0 | Kein Schutz vor Hand- und Körperkontakt | Kein Feuchtigkeitsschutz |
| 1 | Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern ab 50 mm | Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser |
| 2 | Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern ab 12 mm | Schutz gegen schräg fallendes Tropfwasser bis 15° von der Senkrechten |
| 3 | Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern ab 2,5 mm | Schutz gegen Sprühwasser bis 60° von der Senkrechten |
| 4 | Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern ab 1 mm | Schutz gegen Spritzwasser |
| 5 | Eingedrungener Staub darf nicht die Funktion beeinträchtigen | Schutz gegen Strahlwasser |
| 6 | Schutz gegen Staubeintritt | Schutz gegen Überflutung |
| 7 | - | Schutz gegen zeitweiliges Eintauchen |
| 8 | - | Schutz gegen ständiges Untertauchen bei vorgegebenem Druck |

Aufnehmer mit Ladungsausgang

Sensoren mit Ladungsausgang weisen einige Besonderheiten im Vergleich zu anderen Sensoren auf, deren Beachtung unbedingt erforderlich ist, um exakte Messergebnisse zu erhalten:

- Verwenden Sie immer störarme („low noise“) Kabel.
- Die Kabellänge sollte nicht über 10 m betragen.
- Das Kabel sollte so verlegt werden, dass es beim Messen nicht bewegt wird.
- Alle Steckverbindungen müssen fest angezogen sein.
- Vorzugsweise sollten Ladungsverstärker zur Signalverarbeitung eingesetzt werden. Alternativ sind auch Wechselspannungsverstärker mit hochohmigem Eingang geeignet. Beide Prinzipien werden im Folgenden erläutert.

Ladungsverstärker

Aufnehmer mit Ladungsausgang erzeugen ein Ausgangssignal in der Größenordnung von einigen Picocoulomb ($1 \text{ pC} = 1000 \text{ fC}$) mit einer sehr hohen Ausgangsimpedanz. Um Standardmesstechnik zur Weiterverarbeitung nutzen zu können, muss es in ein niederimpedantes Signal umgewandelt werden.

Zu diesem Zweck setzt man vorzugsweise Ladungsverstärker ein. Deren Eingangsstufe besteht aus einem kapazitiv rückgekoppelten Differenzverstärker. Das Ladungssignal am Eingang wird durch das rückgekoppelte Ladungssignal kompensiert. Die am Ausgang anliegende Spannung ist ein Maß für die eingespeiste Ladung. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Ladungsverstärkerstufe:

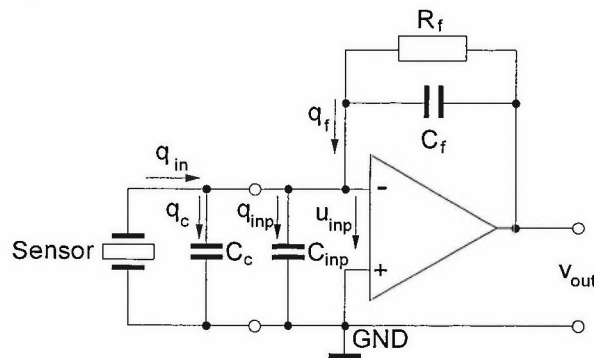


Bild 1: Ladungsverstärker

Die Eingangsladung q_{in} liegt am Summenpunkt, dem invertierenden Eingang des Differenzverstärkers. Diese Ladung verteilt sich auf die Kabelkapazität C_c , die Eingangskapazität des Verstärkers C_{inp} und den Rückkoppelkondensator C_f . Die Knotengleichung für den Eingang lautet demzufolge:

$$q_{in} = q_c + q_{inp} + q_f$$

Unter Verwendung der elektrostatischen Gleichung:

$$q = u \cdot C$$

und Ersetzen von q_c , q_{inp} und q_f erhält man:

$$q_{in} = u_{inp} \cdot (C_c + C_{inp}) + u_f \cdot C_f$$

Da die Spannungsdivergenz am Eingang eines Differenzverstärkers unter normalen Betriebsbedingungen Null wird, kann man davon ausgehen, dass die Eingangsspannung u_{inp} gleich Massepotenzial (GND) ist. Mit $u_{inp} = 0$ lässt sich die Gleichung wie folgt vereinfachen:

$$q_{in} = u_f \cdot C_f$$

und nach der Ausgangsspannung u_{out} auflösen:

$$u_{out} = u_f = \frac{q_{in}}{C_f}$$

Das Ergebnis zeigt, dass die Ausgangsspannung eines Ladungsverstärkers lediglich von der eingespeisten Ladung und der Rückkoppelkapazität abhängt. Eingangs- und Kabelkapazitäten bleiben ohne Einfluss. Dies ist interessant zu wissen, wenn ein Beschleunigungsaufnehmer mit unterschiedlichen Kabeln eingesetzt wird.

Der Rückkoppelwiderstand R_f in Bild 1 hat die Aufgabe, den Verstärker gleichspannungsmäßig zu stabilisieren und den Ausgang driftfrei zu machen. Gleichzeitig bestimmt R_f die untere Grenzfrequenz des Verstärkers.

Die Prinzipschaltung in Bild 1 stellt nur die Eingangsstufe eines üblichen Ladungsverstärkers dar. Weitere Stufen, wie Spannungsverstärker, Filter und Integratoren, sind nicht gezeigt.

Typische Ladungsverstärker sind zum Beispiel die Geräte der Reihe **M68** oder der Ladungsvorverstärker **ICP100** von Metra.

Spannungsverstärker mit hoher Eingangsimpedanz

Anstelle von Ladungsverstärkern eignen sich für Ladungsaufnehmer auch Wechselspannungsverstärker mit sehr hoher Eingangsimpedanz. Im Gegensatz zum Ladungsverstärker müssen in diesem Fall jedoch die Kapazitäten von Sensor, Kabel und Verstärkereingang berücksichtigt werden (Bild 2).

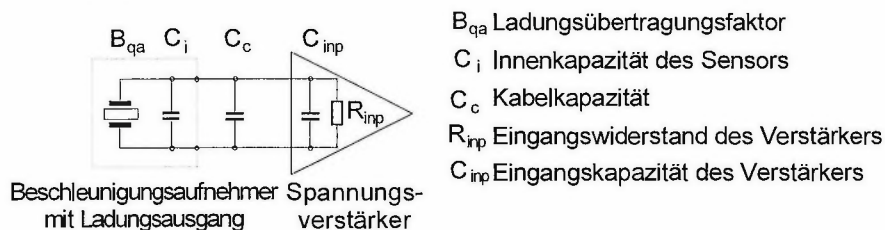


Bild 2: Ladungsaufnehmer an Wechselspannungsverstärker

Der Spannungsübertragungsfaktor B_{ua} eines Sensors mit bekanntem Ladungsübertragungsfaktor B_{qa} und der Innenkapazität C_i kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$B_{ua} = \frac{B_{qa}}{C_i}$$

Die Werte für B_{qa} und C_i findet man im Datenblatt.

Berücksichtigt man die Kapazität des verwendeten Sensorkabels C_c und die Eingangskapazität des Spannungsverstärkers C_{inp} , ergibt sich der korrigierte Spannungsübertragungsfaktor B'_{ua} wie folgt:

$$B'_{ua} = B_{ua} \frac{C_i}{C_i + C_c + C_{inp}}$$

Der korrigierte Spannungsübertragungsfaktor B'_{ua} ist kleiner als B_{ua} . Ein typisches Anschlusskabel vom Typ 009 mit 1,5 m Länge hat eine Kapazität von ca. 135 pF.

Die untere Grenzfrequenz f_l wird von C_c , C_{inp} und R_{inp} bestimmt:

$$f_l = \frac{1}{2 \pi R_{inp} (C_i + C_c + C_{inp})}$$

Die untere Grenzfrequenz steigt mit sinkendem Verstärkereingangswiderstand.

Beispiel: An einen typischen Oszilloskopeingang mit 10 M Ω Eingangswiderstand und 20 pF Eingangskapazität soll ein Beschleunigungsaufnehmer vom Typ KS50 mit einer Innenkapazität von 1,4 nF angeschlossen werden. Das Sensorkabel vom Typ 009 hat eine Kapazität von 135 pF.

Ergebnis: Die untere Grenzfrequenz ist ca. 10 Hz.

IEPE-Aufnehmer

Die Besonderheit IEPE-kompatibler Sensoren liegt in der Übertragung von Messsignal und Versorgungsenergie über ein gemeinsames Kabel. Daher kommen Aufnehmer dieses Typs, ebenso wie Ladungsaufnehmer, mit nur einem massebezogenen Koaxialkabel aus. Bild 3 zeigt das Prinzip der IEPE-Versorgung.

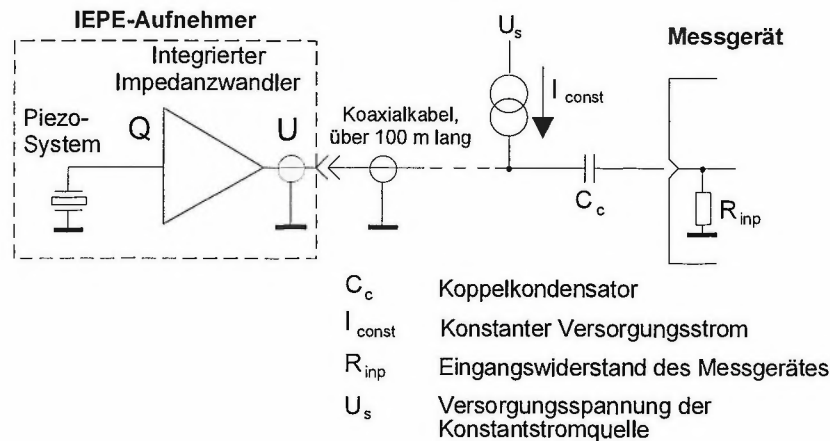


Bild 3: IEPE-Prinzip

Der im Sensor integrierte Impedanzwandler oder Verstärker wird mit Konstantstrom zwischen 2 und 20 mA versorgt. Typisch ist ein Strom von 4 mA. Einige batteriebetriebene Geräte arbeiten auch mit 1 mA Konstantstrom.

Der Konstantstrom I_{const} wird in das Signalkabel eingespeist.

Die Höhe des Konstantstromes und die Kabellänge können unter Umständen die obere Grenzfrequenz beeinflussen.

Der Entkoppelkondensator C_c hält Gleichspannungsanteile vom nachfolgenden Messgerät fern. Die RC-Kombination aus C_c und R_{inp} wirkt als Hochpassfilter. Die Zeitkonstante muss ausreichend hoch dimensioniert sein, um alle relevanten Signalanteile durchzulassen.

Wichtig:

- An einen IEPE-Aufnehmer darf unter keinen Umständen eine Spannungsquelle ohne Strombegrenzung angeschlossen werden. Dies würde die Sensorelektronik sofort zerstören.
- Falschpolung des Sensorkabels führt ebenfalls zur Zerstörung der Elektronik.

Aus Bild 4 ist ersichtlich, dass IEPE-Beschleunigungsaufnehmer eine einfache Selbsttestmöglichkeit über ihre Arbeitspunktspannung haben.

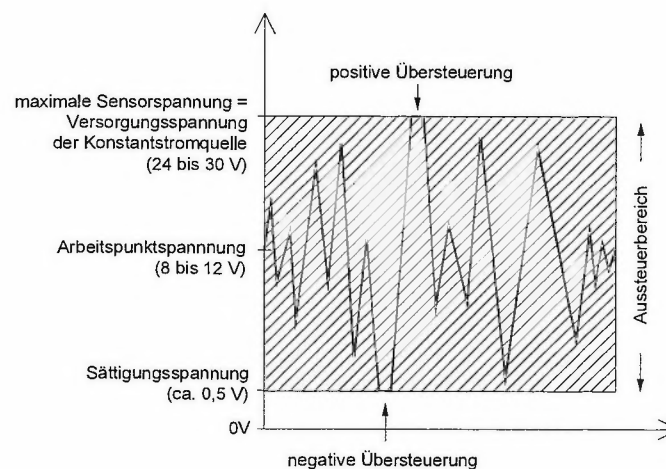


Bild 4: Aussteuerbereich IEPE-kompatibler Aufnehmer

Manfred Weber

Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul

Meißner Str. 58

D-01445 Radebeul

Tel. +49-351-836 21 91

Fax +49-351-836 29 40

Seite 3

Mai 08

Internet: www.MMF.de

Email: Info@MMF.de

Mit Hilfe der am Messgeräteeingang anliegenden Arbeitspunktspannung lassen sich folgende Informationen über den Sensorzustand gewinnen:

- $U_{BIAS} < 0.5$ bis 1 V: Kurzschluss (bzw. negative Übersteuerung)
- $1 \text{ V} < U_{BIAS} < \approx 18 \text{ V}$: O.K., Betrieb im Normalbereich
- $U_{BIAS} > 18 \text{ V}$: Messeingang offen, z.B. Kabelbruch oder Stecker locker

Eine Vielzahl von Messgeräten ist mit eingebauter IEPE-Versorgung ausgestattet. Beispiele von Metra sind die Messverstärker der Serie **M68**, **M108**, **M116** und **M32**, der Schwingungswächter **M12** oder das Kalibriersystem **VC110**. Die IEPE-Versorgung kann auch eine separate Einheit sein, wie z.B. das Gerät **M28**.

Elektronisches Datenblatt nach IEEE 1451.4

Der kürzlich verabschiedete Standard IEEE 1451 kommt der wachsenden Bedeutung digitaler Messwerterfassungssysteme entgegen. IEEE 1451 definiert hauptsächlich Protokolle und Netzwerkstrukturen für Sensoren mit rein digitalem Ausgang. Der Teil IEEE 1451.4 beschäftigt sich hingegen mit "Mixed Mode" Sensoren, die zwar einen herkömmlichen Analogausgang besitzen, zusätzlich aber einen Speicher für ein "Elektronisches Datenblatt" enthalten. Dieser Datenspeicher wird auch "TEDS" (Transducer Electronic Data Sheet) genannt. In einem 256 Bit großen Speicher sind alle für den Anwender relevanten Sensordaten abgelegt:

- Typenbezeichnung, Versionsnummer
- Seriennummer
- Hersteller
- Sensorart, physikalische Einheit
- Empfindlichkeit
- Letztes Kalibrierdatum

Über die genannten, vom Hersteller programmierten Daten hinaus kann der Anwender selbst noch zusätzliche Informationen zur Identifikation der Messstelle speichern.

Das Elektronische Datenblatt eröffnet dem Anwender eine Reihe von Vorteilen:

- Bei Messaufgaben mit einer hohen Anzahl von Sensoren wird die Zuordnung eines Sensors zum zugehörigen Messeingang vereinfacht. Das Messsystem identifiziert den Sensor selbst und ordnet ihn einem bestimmten Kanal zu. Es entfällt die zeitaufwändige Verfolgung und Markierung von Kabeln.
- Das Messsystem liest die Kalibrierdaten selbständig ein. Bisher war es erforderlich, manuell eine Datenbank mit Sensordaten (Seriennummer, Messgröße, Empfindlichkeit etc.) zu führen.
- Der Austausch eines Sensors innerhalb eines komplexen Messsystems ist mit minimalem Aufwand verbunden ("Plug & Play"), da sich der Sensor selbst identifiziert.
- Sensorkennblätter gehören zu den am häufigsten vermissten Dokumenten. Da der TEDS-Sensor selbst alle relevanten Daten enthält, kann die Messung auch durchgeführt werden, wenn das Kennblatt gerade einmal nicht auffindbar ist.

Der Standard IEEE 1451.4 baut auf dem bekannten IEPE-Prinzip auf. TEDS-Sensoren sind daher abwärtskompatibel zu üblichen IEPE-Sensoren. Bild 5 erläutert das Prinzip.

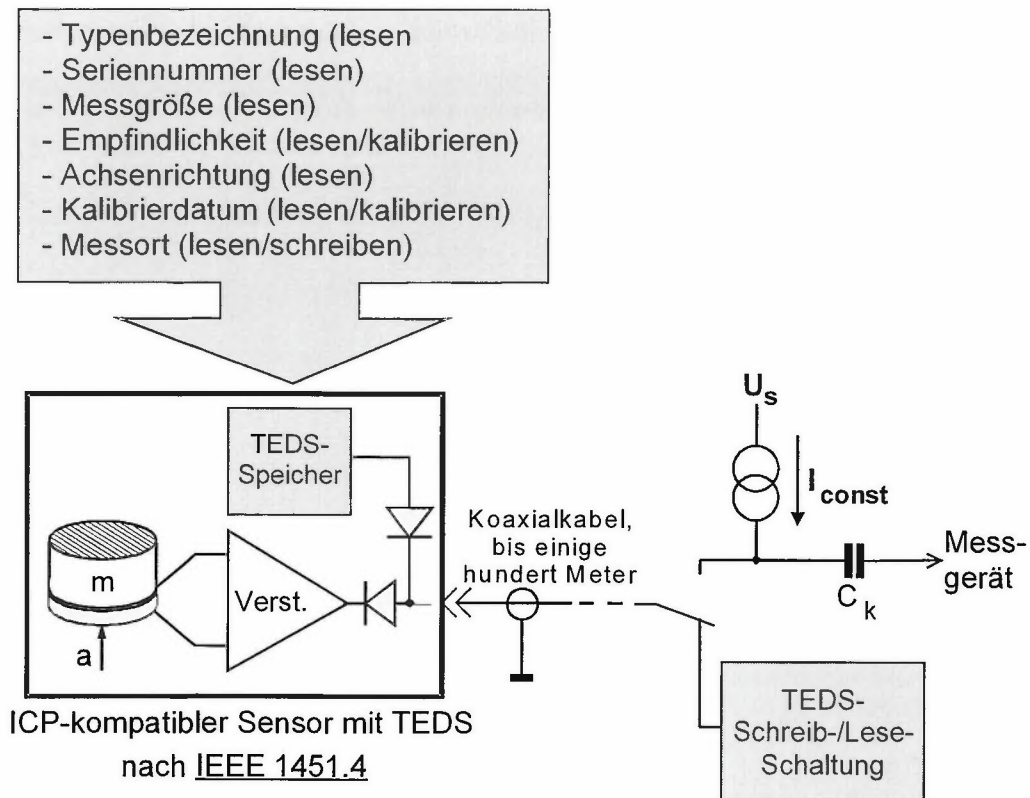


Bild 5: TEDS-Beschleunigungsaufnehmer

Beim Anschließen einer Konstantstromquelle verhält sich der TEDS-Sensor wie ein normaler IEPE-kompatibler Sensor. Das Programmieren und Lesen des integrierten 256 Bit großen nichtflüchtigen Speichers vom Typ DS2430 erfolgt ebenfalls über die Sensorleitung. Die Kommunikation basiert auf dem 1-Wire[®] - Protokoll von Dallas Semiconductor. Der Datenaustausch erfolgt mit TTL-Pegel, wobei die Polarität umgekehrt zur Konstantstromquelle ist. Im Sensor werden Analog- und Digitaldaten mittels Dioden getrennt.

Um Messfehler zu vermeiden, sind die Voraussetzungen für richtiges Messen zu prüfen und ggf. zu schaffen. Folgende Fragen sollten geklärt werden:

- Ist zu erwarten, dass an der vorgesehenen Messstelle die für das Ziel der Messung wichtigen Schwingungen unverfälscht auftreten und die zu treffende Aussage sicher abgeleitet werden kann?
- Befinden sich zwischen dem Entstehungsort der Schwingungen und der Messstelle nachgiebige Bauteile?
- Kann und darf die Koppelstelle für den Aufnehmer in der notwendigen Qualität ausgeführt werden (ebene und glatte Oberfläche herstellen, Befestigungsgewinde einbringen)?
- Ist zwischen Messstelle und nachfolgendem Gerät mit Potenzialdifferenzen der Schutzleiter- bzw. Erdpotenziale zu rechnen?
- Welche Belastung tritt an der Messstelle auf (Wärmestrahlung, EMV-Probleme, Niederschlag, Spülflüssigkeit, Öl, Staub u.a.)?

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Auswahlkriterien für piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer:

| Kriterium | Sensoreigenschaften | | | | |
|------------------------|--|--|--|---|--------------------------------------|
| Amplitudenbereich | <ul style="list-style-type: none"> • Übertragungsfaktor, Maximalbeschleunigung und Resonanzfrequenz auswählen • Stoßaufnehmer für extreme Amplituden • Seismische Aufnehmer für geringste Amplituden Auswahlhilfe für Messbereich: | | | | |
| | < 10 g | 10 - 200g | 200 - 1000 g | 1000 - 10000 g | > 10000 g |
| | KB12(V) KS48 | KS76/77 KD37V-42V KB103 KS813 KS74/80/81 KS94.100 KS95.100 | KS50-52 KD37-42 KS91/94/95 KS513 KS943 | KS93 | KD29 KD93 |
| Frequenzbereich | <ul style="list-style-type: none"> • Resonanzfrequenz / linearen Frequenzbereich auswählen Auswahlhilfe für obere 3 dB-Grenzfrequenz: | | | | |
| | < 200 Hz | 0,2 - 10 kHz | 10 - 15 kHz | 15 - 25 kHz | > 25 kHz |
| | KB12(V) | KD41/42(V) KS48 KS81 KS813 KB103 | KD37/38(V) KS50-52 KS513 KS80 | KS76/77 KS93/94/95 KD29 KS943 KS74 | KS91 KD93 KS94.100 KS95.100 |
| Masse des Messobjektes | <ul style="list-style-type: none"> • Aufnehmermasse <1/10 der Masse des Messobjektes • Miniaturaufnehmer für leichte Messobjekte Auswahlhilfe für Sensormasse: | | | | |
| | < 3 g | 3 - 20 g | 20 - 50 g | 50 - 100 g | > 100 g |
| | KS91/93 KS94/95 KS94.100 KS95.100 | KD29 KD93 KS943 | KS76/77 KD37/38(V) KB103 KS74 | KD41/42(V) KS50-52 KS813 KS513 KS80 | KB12(V) KS48 KS81 |

| | |
|--|--|
| Temperatursprünge, Messobjektdehnung, Magnetfelder, extreme Schallpegel | <ul style="list-style-type: none">• Einfluss mit Hilfe der Störübertragungsfaktoren abschätzen• Scheraufnehmer bei Temperatursprüngen und Bodendeckung• Edelstahlgehäuse bei starken Magnetfeldern |
| Feuchtigkeit und Staub | <ul style="list-style-type: none">• Industriefahrer mit Schutzgrad IP67 |
| Messung von Schwinggeschwindigkeit und -weg | <ul style="list-style-type: none">• Einfach- und Doppelintegration, unter 20 Hz vorzugsweise Scheraufnehmer |
| Befestigung <ul style="list-style-type: none">• Schnelle Messung mit geringer Genauigkeit unter 1 kHz• Für temporäre Messung ohne Veränderung am Messobjekt• Langzeitmessung | <ul style="list-style-type: none">• Tastspitze verwenden• Befestigung mit Haftmagnet, Klebewachs oder Klebstoffen• Befestigung mit Stiftschraube oder Isolierflansch |
| Erdungsprobleme, starke Ausgleichsströme | <ul style="list-style-type: none">• Isolierflansch oder isolierte Aufnehmer verwenden |
| Lange Entfernung zwischen Sensor und Messgerät | <ul style="list-style-type: none">• ICP®-kompatible Aufnehmer verwenden |
| Zwei- oder dreiachsige Messungen | <ul style="list-style-type: none">• Triaxialaufnehmer oder Triaxial-Befestigungswürfel verwenden |

Die richtige Befestigung des Sensors hat entscheidenden Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Für höchste Genauigkeitsanforderungen, besonders bei Frequenzen im Kilohertzbereich, müssen Sensor und Messobjekt saubere, flache, glatte und gratfreie Koppelflächen haben.

Eine zerkratzte Sensorkoppelfläche kann durch Bearbeitung mit Schleifpulver auf einer Läpp-Platte geglättet werden.

Wichtig ist auch eine starre Verbindung des Sensors mit der Schwingquelle. Bleche, Kunststoffverkleidungen oder dünne Bauteile eignen sich i.d.R. nicht für die Sensorbefestigung.

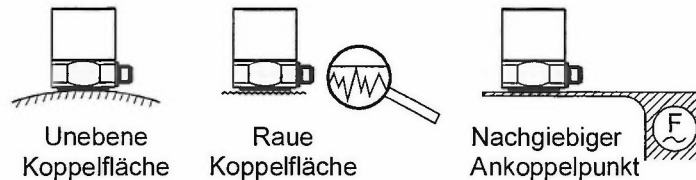


Bild 1: Häufige Ursachen von Ankopplfehlern

Verfälschungen aufgrund von Eigenschwingungen des Sensors können durch eine einfache symmetrische Ankopplung minimiert werden.

Die Masse des Sensors inklusive Befestigungsteilen soll gering gegenüber der Messobjektmasse sein.

Fehlausrichtungen zwischen der Messachse des Aufnehmers und der zu messenden Richtung müssen möglichst gering gehalten werden, insbesondere bei dominanten Querschwingungen.

Die folgenden Befestigungsarten sind bei Beschleunigungsaufnehmern üblich:

- Schraubbefestigung mit Stiftschraube, Montagewürfel, Isolier- oder Klebeflansch
- Haftmagnet
- Klebefestigung mit Sekundenkleber, Bienenwachs, Epoxydharz
- Tastspitze mit Handandruck

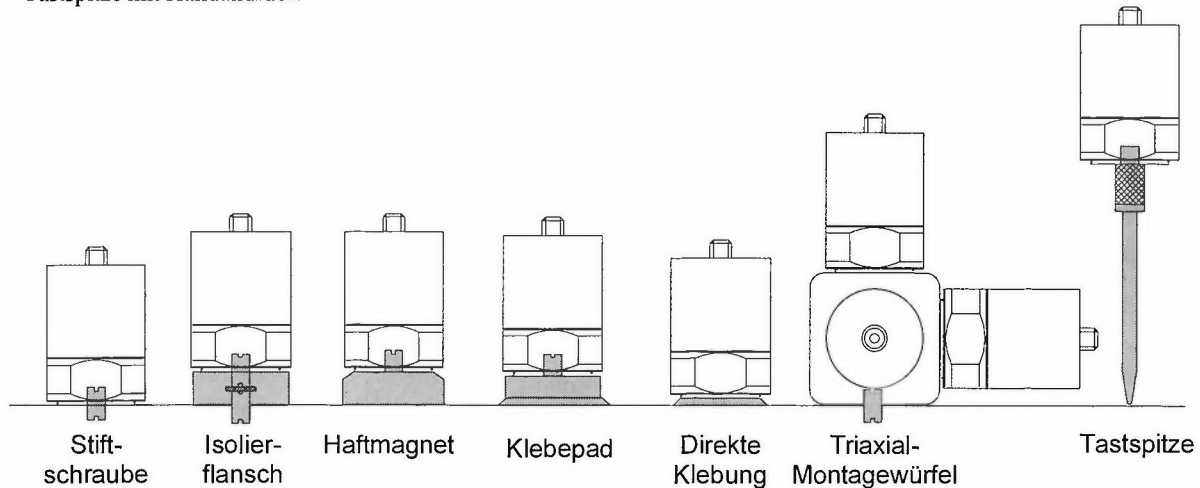


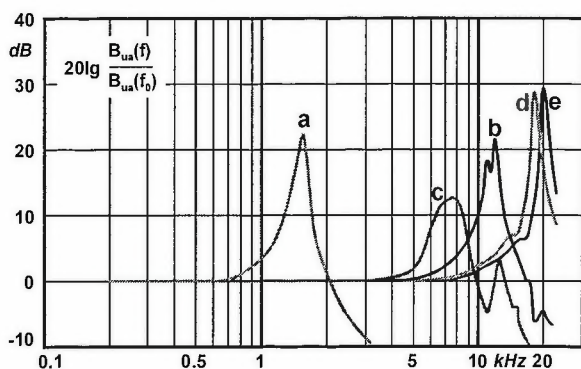
Bild 2: Befestigungsarten für Beschleunigungsaufnehmer

Die folgende Tabelle vergleicht einige übliche Ankopplungsarten für Beschleunigungsaufnehmer im Hinblick auf verschiedene Kriterien (Quelle: ISO5348).

| | Resonanzfrequenz | Temperatur | Sensormasse und Koppelsteifigkeit | Resonanzüberhöhung (Q) | Relevanz der Oberflächengüte |
|--------------------------|------------------|------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Stiftschraube | ● | ● | ● | ● | ● |
| Sekundenkleber | ● | ● | ● | ● | ○ |
| Bienenwachs | ○ | ○ | ○ | ● | ● |
| doppelseitiges Klebeband | ○ | ○ | ○ | ○ | ● |
| Haftmagnet | ○ | ● | ○ | ○ | ● |
| Tastspitze | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

● hoch ○ mittel ○ gering

Bild 3 vergleicht das Verhalten der verschiedenen Ankoppelarten bei höheren Frequenzen. Die Koppelresonanzen werden durch zusätzliche Massen und Nachgiebigkeiten verursacht.



- a Tastspitze
- b Isolierflansch
- c Haftmagnet
- d Klebefestigung
- e Stiftschraube

Bild 3: Resonanzfrequenzen typischer Befestigungsarten

Die Beschleunigungsaufnehmer von Metra können folgende Befestigungsgewinde haben: M3, M5 und M8.

Viele Typen sind in der Bestelloption „/01“ mit einem Zubehörset erhältlich. Darin enthalten sind alle passenden Befestigungsteile.

Die folgende Tabelle zeigt das verfügbare Befestigungszubehör von Metra:

| | |
|---|---|
| Stiftschrauben 021 (M3) 003 (M5) 043 (M8) 022 (M3 auf M5) 044 (M5 auf M8) 045 (M5 auf 10-32) 046 (M5 auf 1/4"-28) | → Für beste Ankoppelbedingungen. • Für dauerhafte Montage. • Gewindebohrung im Messobjekt erforderlich. • Etwas Silikonfett zwischen den Koppelflächen verbessert die Übertragung. • Empfohlenes Anzugsdrehmoment: 1 Nm. • Stiftschraube darf nicht zu lang sein, damit sich kein Spalt zwischen den Koppelflächen bildet. |
| Isolierflansche 106 (2 x M3) 006 (2 x M5) 206 (2 x M8) 129 (M3, kleben) 029 (M5, kleben) | → Vermeidet Erdschleifen. • Etwas schlechtere Übertragung bei hohen Frequenzen. • Typ 006 nicht für Einsatz über 100 °C. • Typen 029 und 129 für die Klebefestigung mit Sekundenkleber oder Epoxdharz. |
| Befestigungspads 129 (M3, klein) 329 (M3, groß) 029 (M5) 229 (M8) | → Zum Aufkleben, wenn keine Bohrungen zum Anschrauben des Sensors eingebracht werden können. • 129, 329 und 029 sind isolierend |

| | |
|---|--|
| Haftmagneten 108 (M3, klein) 308 (M3, groß) 408 (M4 Innengewinde) 008 (M5) 208 (M8) | → Für die schnelle Befestigung mit schlechterer Übertragung bei höheren Frequenzen. • Magnetische Messobjekte mit glatter und flacher Oberfläche erforderlich. Wenn nicht möglich, eine magnetische Edelstahlscheibe aufschweißen oder mit Epoxydharz aufkleben. • Wichtig: Magnet nicht auf das Messobjekt aufschnappen lassen, um starke Stoßbelastung des Sensors zu vermeiden. Langsam abrollen. • Nicht für seismische Aufnehmer verwenden - Bruchgefahr. |
| Triaxial-Befestigungswürfel 130 (M3) 030 (M5) 230 (M8) 330 (M10) | → Für zwei- oder dreiachsige Messungen mit einachsigen Schwingungsaufnehmern |
| Tastspitze 001 (M5) | → Für schnelle Überblicksmessungen zwischen 5 und 1000 Hz. • Befestigung über M5-Gewinde. Senkrecht auf Messobjekt drücken. Eine Senkbohrung im Messobjekt verbessert die Reproduzierbarkeit. |
| Klebewachs 002 | → Für schnelle Befestigung leichter Sensoren bei Raumtemperatur und tiefen Frequenzen. • Mit Fingern erwärmen, dünne Schicht auf das Messobjekt auftragen und Sensor andrücken. |
| Kabelklammern 004 (M5) 020 (M3) | → Vermeidet Krafteinleitung über das Kabel. • Gemeinsam mit dem Sensor auf das Messobjekt schrauben. |

Kabel und Steckverbinder sind in der Regel die schwächsten Glieder einer Messkette.

In unseren Sensordatenblättern bekommen Sie Empfehlungen für geeignete Kabeltypen zu jedem Beschleunigungsaufnehmer.

Besonders bei Aufnehmern mit Ladungsausgang ist die Wahl des richtigen Kabels entscheidend. Wenn ein Koaxialkabel Biege- oder Zugbeanspruchung ausgesetzt wird, kann es zu örtlichen Kapazitätsänderungen kommen, die wiederum zu Ladungsverschiebungen im Kabel führen. Diese Erscheinung nennt man Triboelektrischen Effekt. Das resultierende Ladungssignal am Messgeräteeingang lässt sich nicht vom eigentlichen Sensorsignal unterscheiden. Besonders bei tiefen Frequenzen und geringen Beschleunigungen kann es sehr stören. Zur Vermeidung dieses Problems bietet Metra zu seinen Ladungsaufnehmern störarme Kabel an. Diese zeichnen sich durch eine spezielle Ableitschicht auf dem Dielektrikum aus. Auch bei Verwendung störarmer Kabel sollte auf ordnungsgemäße Befestigung am Messobjekt geachtet werden.

Wichtig: Die Steckverbindungen von Ladungsaufnehmern müssen sehr sauber gehalten werden. Schmutz und Feuchtigkeit im Stecker kann den Isolationswiderstand verringern und damit die untere Grenzfrequenz verfälschen.

Die Kabellänge bei Ladungsaufnehmern sollte 10 m nicht überschreiten.

ICP®-kompatible Aufnehmer benötigen keine störarmen Spezialkabel. Sie lassen sich mit normalen Koaxialkabeln anschließen.

Starke Magnetfelder können zu Störungen führen. Dies ist besonders bei Ladungsaufnehmern der Fall. Daher sollte das Kabel immer so weit wie möglich von elektromagnetischen Störquellen, wie Motoren, Generatoren oder Wechselrichtern, entfernt verlegt werden. Das Sensorkabel sollte nicht parallel zu Starkstromleitungen verlaufen und diese möglichst rechtwinklig kreuzen.

Bewegung des Kabels relativ zum Sensor kann ebenfalls Messfehler verursachen, indem Kräfte über das Kabel in den Sensor eingeleitet werden. Miniaturaufnehmer und Beschleunigungsaufnehmer mit Kompressionskeramik („KD“-Typen“) sind dafür besonders anfällig. Dieses Problem kann durch ordnungsgemäße Kabelbefestigung mit Schellen o.ä. vermieden werden. Metra bietet dafür die Kabelschellen 004 und 020 als Zubehör an. Handelsübliche Kabelhalter mit Selbstklebesockel oder O-Ringe eignen sich ebenso (vgl. Bild 1).

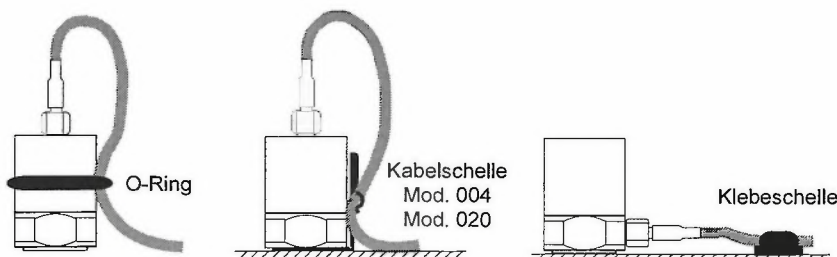


Bild 1: Kabelbefestigung

Bei der Befestigung des Kabels sollte eine hinreichende Schlaufe gelassen werden, damit keine mechanische Spannung auf den Sensor einwirkt.

Bevor Sie mit der Messung beginnen, überprüfen Sie bitte, dass alle Steckverbindungen ordnungsgemäß festgeschraubt sind. Lockere Steckermuttern sind eine häufige Fehlerursache. Verwenden Sie keine Zange, normalerweise reicht Handkraft aus. Eine geringe Menge Schraubensicherungskleber kann auf das Außengewinde als zusätzlicher Schutz gegen Lockerung aufgetragen werden. Vermeiden Sie dabei eine Verschmutzung des Isolators.

Die Standardkabel von Metra haben folgende Steckertypen:

- **Microdot:** Koaxialsteckverbindung mit UNF 10-32-Gewinde
- **Subminiatur:** Koaxialsteckverbindung mit M3-Gewinde
- **TNC:** Koaxialsteckverbindung mit UNF7/16-28-Gewinde und Schutzgrad IP44
- **BNC:** Koaxialsteckverbindung mit Bajonettverschluss
- **Binder 707:** 4-poliger Rundsteckverbinder mit M5-Gewinde
- **Binder 711:** 4-poliger Rundsteckverbinder mit M9-Gewinde
- **Binder 713:** 4-poliger Rundsteckverbinder mit M12-Gewinde und Schutzgrad IP67
- **Binder 718:** 4-poliger Rundsteckverbinder mit M8-Gewinde und Schutzgrad IP67

Die folgenden Kabeltypen sind standardmäßig lieferbar:

| Aufnehmertyp | 1. Ende | 2. Ende | Länge m | Ø mm | T _{MAX} °C | Typ |
|--------------|---------------|---------------|------------|---------|------------------------|--------|
| Ladung | Microdot | Microdot | 1.5 | 2,2 | 80 | 009 |
| Ladung | Microdot | Microdot | 1.5 | 2,0 | 200 | 009/T |
| Ladung | TNC | Microdot | 1.5 | 2,2 | 80 | 012 |
| Ladung | Subminiat. | Subminiat. | 1.5 | 2,2 | 80 | 013 |
| Ladung | Microdot | Microdot | 5 | 3,8 | 80 | 010/5 |
| Ladung | Microdot | Microdot | 10 | 3,8 | 80 | 010/10 |
| Ladung | Microdot | Microdot | 15 | 3,8 | 80 | 010/15 |
| Ladung | Microdot | Microdot | 20 | 3,8 | 80 | 010/20 |
| ICP® | Microdot | Microdot | 1.5 | 2,5 | 80 | 050 |
| ICP® | BNC | Microdot | 1.5 | 2,5 | 80 | 051 |
| ICP® | TNC | Microdot | 1.5 | 2,5 | 80 | 052 |
| ICP® | TNC | BNC | 1.5 | 2,5 | 80 | 053 |
| ICP® | Subminiat. | Microdot | 1.5 | 1,0 | 120 | 054 |
| ICP® | Binder 711 m. | Binder 711 f. | 1.5 | 2,8 | 80 | 080 |
| ICP® | Binder 713 | Drahtenden | 5 | 6,0 | 85 | 085 |
| ICP® | Binder 713 | BNC | 5 | 6,0 | 85 | 086 |
| ICP® | Binder 718 | Drahtenden | 5 | 3,9 | 80 | 087 |
| ICP® | Binder 718 | BNC | 5 | 3,9 | 80 | 088 |
| Ladung | Binder 718 | 3 x Microdot | 2,5 | 6,0 | 80 | 089 |
| Ladung | Binder 718 | 3 x BNC | 2,5 | 6,0 | 80 | 090 |
| ICP® | Binder 707 | Binder 711 | 3 | 3,0 | 80 | 091 |
| ICP® | Binder 707 | Binder 711 | 3 | 1,1 | 120 | 091/T |

Kundenspezifische Kabel fertigen wir auf Anfrage.

Die folgenden Steckeradapter sind erhältlich:

| Zweck | Typ |
|--|------|
| Adapter für Microdot-Stecker auf BNC-Buchse | 017 |
| Adapter für Microdot-Stecker auf BNC-Stecker | 117 |
| Adapter für Microdot-Stecker auf TNC-Buchse | 025 |
| Kupplung für 2 Microdot-Stecker | 016 |
| Abgedichtete Frontplattendurchführung für 2 Microdot-Stecker | 031 |
| Microdot-Buchse für Frontplattenmontage | 032 |
| Adapter Binder 711 (wbl.) auf 3 Microdot-Stecker (mnl.) | 033 |
| Adapter Binder 711 (wbl.) auf 3 BNC-Stecker (mnl.) | 034 |
| Stecker mit Schraubkontakten für Binder 713-Buchsen, gerade | 080G |
| Stecker mit Schraubkontakten für Binder 713-Buchsen, abgewinkelt | 080W |

Vermeidung von Erdschleifen

Zu den häufigsten Problemen bei Messaufbauten mit empfindlicher Sensorik zählen Erd- oder Masseschleifen. Diese entstehen durch ungewollte Potenzialunterschiede im Stromkreis zwischen Sensor und Messgerät. In der Regel treten sie auf Masseleitung, Erdung bzw. Schutzleiter auf. Ursachen dafür können sein:

- große Entfernung zwischen Messstelle und nachfolgendem Gerät
- Spannungsabfälle über zu schwachen Leitungsquerschnitten im Erdungs- oder Schutzleiternetz
- Messung in der Umgebung leistungsstarker elektrischer Maschinen und Einrichtungen, die starke Ausgleichsströme im Erdungssystem bewirken

Diese Potenzialdifferenzen können Ausgleichströme auf dem Schirm der Messleitung verursachen. Die Folge sind Spannungsabfälle, die sich dem Messsignal überlagern. Diese äußern sich häufig durch starke Störanteile bei 50 oder 100 Hz bzw. bei Wechselrichtern auch im höherfrequenten Bereich.

Der Stromweg über den Schirm sollte daher durch elektrische Isolierung unterbrochen werden.

Folgendes einfache Verfahren hat sich bei vielen Anwendungen bewährt:

Die ganze Messkette wird, falls überhaupt erforderlich, nur an einem Punkt mit dem Schutzleiter verbunden bzw. geerdet. Der Aufnehmer, ein ggf. notwendiger Vorverstärker und der Schirm der Kabel werden vom Messobjekt und allen Konstruktionsteilen elektrisch isoliert. Die Verbindung mit dem Schutzleiter- bzw. Erdanschluss wird im nachfolgenden Gerät hergestellt (vgl. Bild 2 und Bild 3).

Besonders wichtig ist ein zentraler Masse-/Erdungspunkt in Mehrkanal-Messsystemen.

Empfehlenswert ist der Einsatz von Sensoren mit isoliertem Gehäuse, z.B. die Typen **KS74** und **KS80**.

Schlechtes Erdungskonzept:

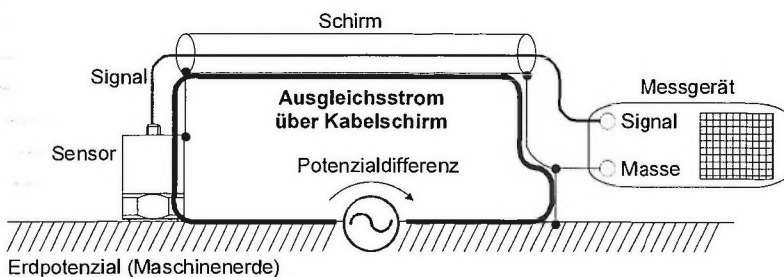


Bild 2: Sensormontage ohne Isolierung führt zu Ausgleichsströmen über das Sensorkabel

Besser:

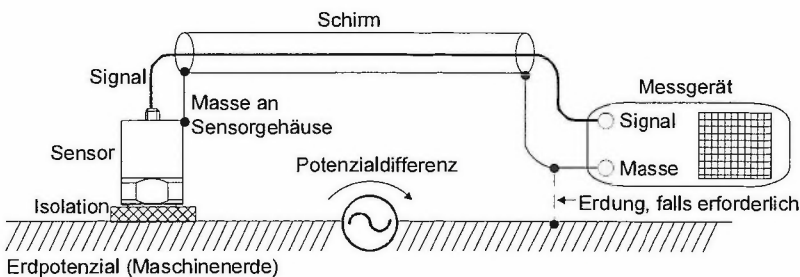


Bild 3: Unterbrechung des Erdungsstromkreises durch isolierte Sensormontage

Kalibrierung

Bei Einsatz unter Normalbedingungen sind piezoelektrische Sensoren äußerst stabil. Ihre Kalibrierwerte ändern sich kaum über die Zeit. Oft werden Sensoren jedoch unter extremen Bedingungen eingesetzt, z.B. Stoßbelastung, hohe Temperaturen oder Feuchtigkeit. Daher ist ein regelmäßiger Kalibrierzyklus zu empfehlen. Bei Gebrauch unter Normalbedingungen empfehlen wir eine Nachkalibrierung alle 2 Jahre und bei Einsatz unter Extrembedingungen im Anschluss an jede Messung.

Für eine Werkskalibrierung senden Sie den Aufnehmer bitte an Metra. Unser Kalibrierlabor arbeitet mit einer erstabgeleiteten Referenz der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

Viele Firmen ziehen es vor, eigene Kalibrierapparaturen anzuschaffen. Das kann kosten- und zeitsparend sein, sobald eine größere Anzahl von Aufnehmern im Einsatz ist. Oft ist es auch wünschenswert, den Sensor in einer ganzen Messkette oder Anlage zu kalibrieren, die sich nicht zum Einschicken eignet.

Zu diesem Zweck bietet Metra die batteriebetriebenen Schwingungskalibratoren der Serie VC1x an. Diese liefern ein geregeltes, quarzstabiles Schwingensignal von 10 m/s² (Schwingbeschleunigung), 10 mm/s (Schwinggeschwindigkeit) oder 10 µm (Schwingweg) bei einer Frequenz von 159,2 Hz.

Das Schwingungskalibriersystem VC100 hat eine einstellbare Schwingfrequenz von 70 bis 10 000 Hz. Es liefert 1 m/s² Schwingpegel. Auch Frequenzgänge können mit dem VC100 gemessen werden. Die Bedienung und die Anzeige der gemessenen Empfindlichkeit kann über ein LC-Display oder per PC-Software erfolgen.

Wenn kein Schwingungskalibrator verfügbar ist, kann die Messkette elektrisch kalibriert werden, indem

- Die Verstärkung des Messverstärkers auf die Empfindlichkeit des Aufnehmers abgeglichen wird. Einige Messverstärker bieten hierzu eine numerische Einstellmöglichkeit.
- Eingabe der Aufnehmerempfindlichkeit als Korrekturfaktor bei PC-Messsystemen.
- Ersatz des Aufnehmers durch ein Generatorsignal und Einspeisung der entsprechenden Spannung.

Bitte berücksichtigen Sie, dass der Kalibriergenauigkeit bei Schwingungsaufnehmern technische Grenzen gesetzt sind. Ein praktisch erreichbarer Wert für die Kalibrierunsicherheit ist $\pm 2 \%$.

Fehlerbetrachtung

Für die Bewertung der Messergebnisse ist es außerordentlich wichtig, die Messfehler abzuschätzen. Bei Anwendung von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern treten drei Fehlergruppen auf:

- **Fehler des Übertragungsfaktors:**
Kalibrierfehler, Linearitätsfehler, Frequenz- und Phasenfehler, Alterung, Temperatureinfluss durch Temperaturkoeffizienten.
- **Fehler durch Ankopplung an das Messobjekt:**
Einflüsse der Aufnehmermasse, der Koppelfläche, der Koppellemente, der Schwingungsrichtung durch den Querrichtungsfaktor
- **Fehler durch Störsignale:**
Rauschen, Dehnungsbeeinflussung, magnetische Felder (z.B. an elektrischen Maschinen), Temperaturschwankungen, Druckschwankungen (z.B. starker Schall), Verformung durch Kabelbewegung bei nicht festgelegtem Kabel, elektrische und magnetische Einwirkung insbesondere auf lange Kabel, Eigenstörspannung des Kabels bei Bewegung

Systematische Fehler sind rechnerisch korrigierbar, wenn ihr Wirkungsmechanismus bekannt ist. Ihre Auswirkung wird durch uns als Hersteller weitgehend ausgeschlossen oder beschrieben z.B. beim Einfluss der Frequenzabhängigkeit.

Werden die Ergebnisse von Messungen mit sehr ähnlichen Messbedingungen verglichen, z.B. durch Beziehen auf eine Anfangsmessung, so entfallen die meisten systematischen Fehlereinflüsse. Das ist besonders wichtig bei nicht bekannten systematischen Fehlern.

Die meisten Fehler treten zufällig auf bzw. sie lassen sich nicht mit einem berechenbaren systematischen Einfluss korrigieren, da Wirkungsweise und Größe der Ursache nicht bekannt sind.

Bei praktischen Messungen sind die zufälligen Fehler, bekannte, aber schwer korrigierbare systematische Fehler und nicht erfassbare, abzuschätzende systematische Fehler zu einer Kenngröße, der Messunsicherheit, zusammenzufassen.

Das folgende Beispiel soll verdeutlichen, wie die Messunsicherheit sich zusammensetzen kann und welche Größenordnung bei durchschnittlichem Aufwand erreicht wird.

- Aufnehmer:
 - Grundfehler 2 %
 - Frequenzfehler (Bandgrenze bei 5 % Toleranz) 5 %
 - Linearitätsfehler 2 %
 - Äußere Störeinflüsse 5 %
- Nachfolgeelektronik mit Effektivwertbildung:
 - Grundfehler 1 %
 - Frequenzfehler (Bandgrenze bei 5 % Toleranz) 5 %
 - Linearitätsfehler 1 %
 - Kurvenformfehler 1 %

Die quadratische Addition der Einzelfehler ergibt für dieses Beispiel eine Messunsicherheit $u = 9 \%$.

Bei der praktischen Schwingungsmessung ist eine Messunsicherheit unter 10 % nur einzuhalten, wenn die wichtigsten Fehlereinflüsse bekannt sind und die verwendete Messapparatur eine hohe Qualität aufweist.