

Manfred Weber

**Metra Mess- und Frequenztechnik
in Radebeul e.K.**



www.MMF.de

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer

Theorie und Anwendung



Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer

Theorie und Anwendung



Manfred Weber

Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.

Herausgeber:

Manfred Weber
Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.
Meißner Str. 58
D-01445 Radebeul

Telefon +49-351-836 2191
Fax +49-351-836 2940
Email info@MMF.de
Internet www.MMF.de

Bearbeitet von: Johannes Wagner (1993)
Jan Burgemeister (2021)

7. überarbeitete Auflage

© 2021 Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung.

Änderungen vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen	1
1.1 Wozu Schwingungssensoren?	1
1.2 Was sind das für Sensoren?	1
1.3 Welche Signalverarbeitung?	3
2. Funktion und Aufbau	4
2.1 Piezoelektrisches Prinzip	4
2.2 Piezosysteme	7
2.3 IEPE - Sensorelektronik	9
3. Sensordaten	14
3.1 Kennblatt	14
3.2 Übertragungsfaktoren	15
3.3 Frequenzgang	16
3.4 Richtungsselektivität	16
3.5 Maximalbeschleunigung	17
3.6 Linearität	18
3.7 Schwingungsunabhängige Kennwerte	18
3.7.1 Temperatureinflüsse	18
3.7.1.1 Arbeitstemperaturbereich	18
3.7.1.2 Temperaturkoeffizienten	18
3.7.1.3 Temperatursprungempfindlichkeit	20
3.7.2 Bodendehnung	20
3.7.3 Elektromagnetische Felder	21
3.7.4 Schalldruck	21
3.7.5 Innenkapazität	21
3.7.6 Eigenrauschen und Nachweisgrenze	22
4. Anwendung	25
4.1 Messverstärker	25
4.1.1 Aufnehmer mit Ladungsausgang	25
4.1.1.1 Ladungsverstärker	25
4.1.1.2 Spannungsverstärker mit hoher Eingangsimpedanz	27
4.1.2 IEPE-Aufnehmer	28

4.2 Elektronisches Datenblatt nach IEEE 1451.4.....	31
4.2.1 Einführung.....	31
4.2.2 Anordnung der TEDS-Daten im Speicher.....	33
4.2.2.1 Basic TEDS.....	33
4.2.2.2 Template Nr. 25.....	33
4.3 Vorbereitung der Messung.....	35
4.3.1 Auswahl der Messstelle.....	35
4.3.2 Auswahl des Sensors.....	36
4.3.3 Befestigungsarten.....	37
4.3.4 Kabel.....	44
4.3.5 Vermeidung von Erdschleifen.....	45
4.4 Kalibrierung.....	47
4.5 Fehlerbetrachtung.....	48
5. Normen für Schwingungssensoren.....	50

1. Vorbemerkungen

1.1 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, ungewollt als Begleiterscheinung 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 Lastwagens klirren die Gläser im Schrank.

Allen Störungen ist gemeinsam, dass ihre Ursache Schwingungen und Stöße sind. Wenn diese kontinuierlich oder im Turnus gemessen werden, können Fehlfunktion, Abnutzung und Schäden erkannt und behoben werden.

1.2 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 60 Jahren entwickelt und produziert, basieren auf dem piezoelektrischen Wirkprinzip. “Piezo” kommt aus dem Griechischen (πιέζειν) und steht für drücken oder pressen. Wird ein piezoelektrisches Material Druck oder mechanischen Spannungen ausgesetzt, produziert es elektrische Ladung. Wird es mit einer seismischen Masse kombiniert, liefert es ein Ladungssignal, das zur eingeleiteten Schwingbeschleunigung proportional ist.

Das aktive Element der Beschleunigungsaufnehmer von Metra besteht aus einer Piezokeramik mit ausgewählten Eigenschaften. Es handelt sich dabei um Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), das für stabile Übertragungseigenschaften gegenüber Umgebungseinflüssen und hohe Langzeitkonstanz optimiert wurde. Eine 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.

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

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

Die folgende Tabelle stellt weitere gebräuchliche Sensorarten für Schwingungen den piezelektrischen Beschleunigungsaufnehmern gegenüber.

	Vorteil	Nachteil
Piezoresistiv	Auch für statische Beschleunigung	Eingeschränkte Auflösung durch Widerstandsrauschen Nur für tiefe und mittlere Frequenzen Versorgungsspannung erforderlich
Elektrodynamisch (Geophon)	Sehr empfindlich	Nur für tiefe Frequenzen
Kapazitiv	Auch für statische Beschleunigung Preiswerte Herstellung mit Halbleitertechnologie	Geringere Auflösung Weniger robust

1.3 Welche Signalverarbeitung?

Der Wandlungsvorgang benötigt keine Hilfsenergie. Die an das nachfolgende Messgerät oder an den integrierten IEPE-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. IEPE-Aufnehmer benötigen zusätzlich eine Konstantstromversorgung. Hierfür eignen sich z.B. die Messverstärker M28, M33, M72 und M208 von Metra. Für Sensoren ohne Elektronik werden Ladungsverstärker benötigt, z.B. die Typen M72 oder IEPE100.

Nach der Vorverstärkung werden verschiedene Auswerteverfahren für das Schwingensignal angewandt:

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

Um die Leistungsfähigkeit moderner Messwertverarbeitungssysteme auszuschöpfen, ist es unumgänglich, das kritischste Glied der Messkette, den Sensor, genau zu kennen. Dabei soll Ihnen die vorliegende Anleitung helfen.

2. Funktion und Aufbau

2.1 Piezoelektrisches Prinzip

Im Aufnehmergehäuse ist ein piezoelektrisches Material befestigt. Bild 1 erläutert das Wirkprinzip am Beispiel einer Kompressions Scheibe. Diese ähnelt einem 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.

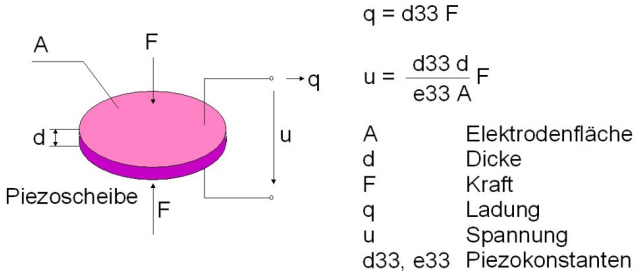


Bild 1: Piezoelektrischer Effekt, Grundberechnungen

Ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor besteht aus zwei Grundkomponenten:

- Piezoelektrisches Material
- Seismische Masse

Die eine Seite der Piezoscheibe ist mit der so genannten 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).

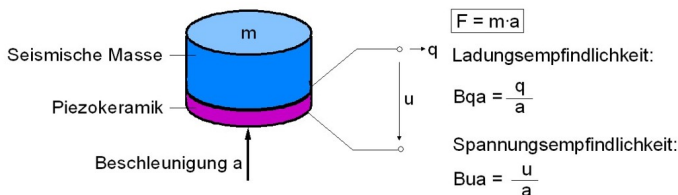


Bild 2: Wirkprinzip eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers

Das Piezoelement ist mit der Sensorbuchse über ein Drähtchen verbunden. Viele Beschleunigungsaufnehmer sind auch mit einem integrierten Impedanzwandler nach IEPE-Standard bestückt, womit die sehr hohe Impedanz der Piezokeramik in eine niedrigere umgesetzt wird (vgl. S. 9).

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 definiert. Um eine höhere Grenzfrequenz zu erzielen, 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.

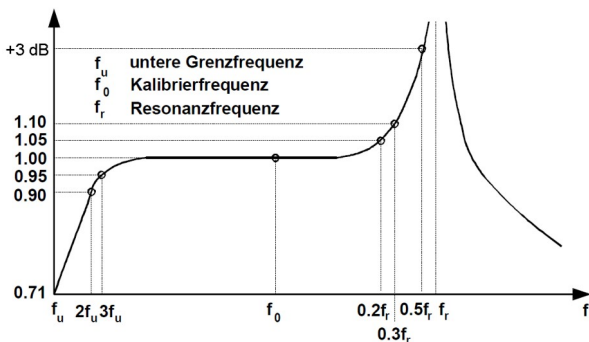


Bild 3: Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers

Aus dem Diagramm lassen sich folgende charakteristische Frequenzbereiche ablesen:

- Bei etwa $1/5$ der Resonanzfrequenz steigt die Empfindlichkeit auf das 1,05-fache. Der Messfehler gegenüber der Kalibrierfrequenz beträgt 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 liegt bei etwa der Hälfte der Resonanzfrequenz.

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

Für die Messung von Einzelstößen gilt die Regel, dass die Resonanzfrequenz des Sensors mindestens das Zehnfache der reziproken Impulsdauer betragen soll.

Die untere Grenzfrequenz wird hauptsächlich vom angeschlossenen Messverstärker bestimmt. Bei vielen Geräten ist sie wählbar. Bei Verwendung von Spannungsverstärkern (vgl. Seite 27) wird sie von der RC-Zeitkonstante bestimmt, die sich aus dem Verstärker-Eingangswiderstand, sowie den Kapazitäten von Sensor, Kabel und Verstärkereingang bildet.

2.2 Piezosysteme

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

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)

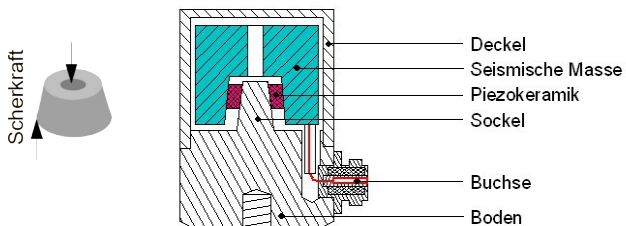
Die folgende Tabelle fasst die Vor- und Nachteile dieser drei Grundtypen zusammen:

	Scherung	Kompression	Biegung
Vorteile	Geringe Temperaturempfindlichkeit Geringe Beeinflussung durch Messobjektdehnung	Hohe Empfindlichkeit Robustheit Bewährte Technologie Preisgünstig herzustellen	Hohe Empfindlichkeit bei geringer Masse
Nachteile	Geringere Empfindlichkeit	Hoher Störeinfluss bei Temperatursprüngen Hoher Störeinfluss bei Messobjektdehnung	Bruchempfindlich Relativ hoher Störeinfluss bei Temperatursprüngen

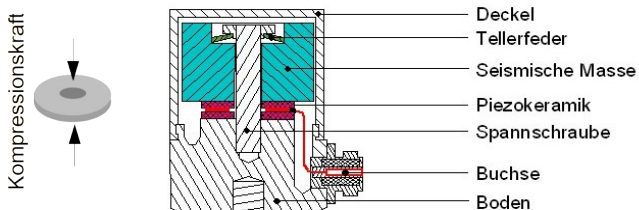
Die meisten neu entwickelten Beschleunigungsaufnehmer gehören zum Schertyp, wenngleich auch die anderen Bauweisen noch ihre Existenzberechtigung behalten.

Die folgenden Abbildungen zeigen die drei Grundtypen mit ihren wichtigsten Bestandteilen:

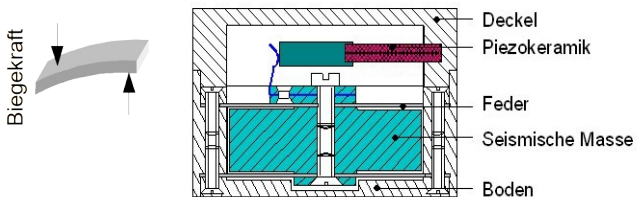
Schersystem (Ringkonus)



Kompressionssystem



Biegesystem



2.3 IEPE - Sensorelektronik

Metra fertigt eine Vielzahl von Beschleunigungsaufnehmern mit eingebautem Impedanzwandler oder Vorverstärker. Dieser wandelt das hochimpedante Signal der Piezokeramik in ein Spannungssignal mit 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“. Proprietäre Bezeichnungen anderer Hersteller für dasselbe Prinzip sind ICP®, Isotron®, Deltatron®, Piezotron®, LIVM®, CCLD® etc. Die eingebaute Elektronik wird über Konstantstrom versorgt (vgl. Bild 4).

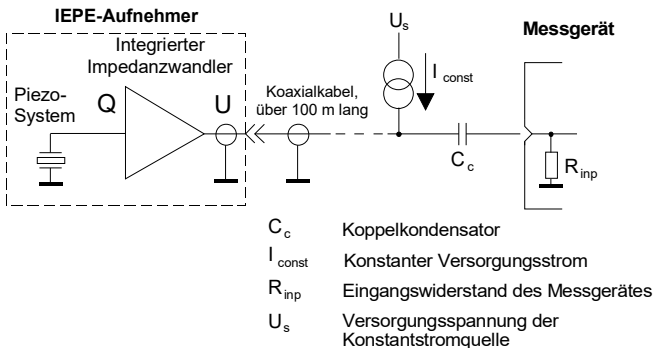


Bild 4: IEPE-Prinzip

Eine 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 Messgeräteeingang hält den Gleichanteil vom Messgerät fern. Da die Ausgangsimpedanz üblicher IEPE-Aufnehmer im Bereich 100 - 300 Ω liegt, darf das Kabel bis zu einigen hundert Metern lang sein, ohne die Signalqualität zu beeinträchtigen. Auf teure störarme Kabel kann zugunsten preiswerter Koaxialkabel verzichtet werden.

Der Konstantstrom kann zwischen 2 und 20 mA liegen (nicht zu verwechseln mit dem 4-20 mA-Stromschleifenstandard). 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 12 bis 14 V. Sie ist von der Temperatur und vom Speisestrom abhängig. Um diese Arbeitspunktspannung oszilliert das Sensorsignal (vgl. Bild 5). Die Sensorspannung kann dabei nie negativ werden. Die obere Aussteuerergrenze wird durch die Versorgungsspannung der Konstantstromquelle bestimmt. Diese sollte im Bereich von 24 bis 30 V liegen. Die untere Aussteuerergrenze wird durch die Sensorelektronik bestimmt. Metra garantiert eine Mindestaussteuerbarkeit je nach Typ von ± 5 V bis ± 6 V.

Neben den Standard-IEPE-Sensoren bietet Metra eine Low-Power-Variante an. Diese Typen sind mit einem „L“ gekennzeichnet. Sie eignen sich besonders für batteriebetriebene Anwendungen, z.B. Handmessgeräte oder Telemetriesysteme. Die Arbeitspunktspannung liegt hier bei 5 bis 7 V bei einem Konstantstrom zwischen 0,1 und 6 mA. Infolge der geringeren Arbeitspunktspannung ist die Aussteuerung auf ± 2 V begrenzt.

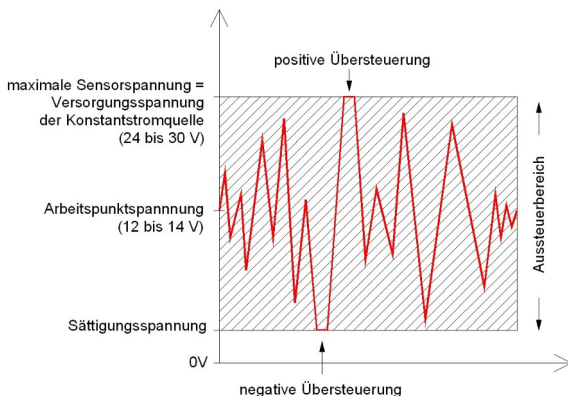


Bild 5: IEPE-Aussteuerergrenzen

Die untere Grenzfrequenz der IEPE-Beschleunigungsaufnehmer von Metra liegt bei 0,1 bis 0,3 Hz für die meisten Scher- und Biegesysteme sowie bei 3 Hz für Kompressionssysteme.

Die obere Grenzfrequenz hängt hauptsächlich von der mechanischen Konstruktion des Sensors 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 6 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.

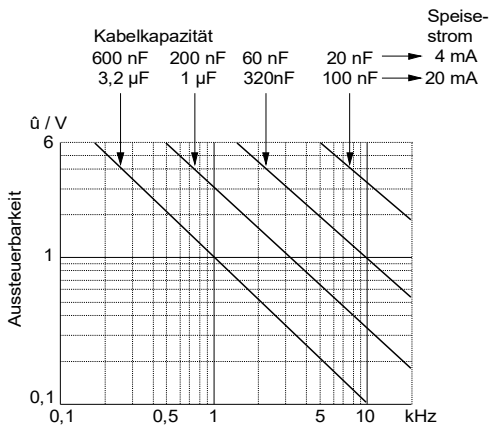


Bild 6: Aussteuerbarkeit von IEPE-Aufnehmern in Abhängigkeit von Kabelkapazität und Speisestrom

Bild 7 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 einem unverfälschten Frequenzgang gerechnet werden.

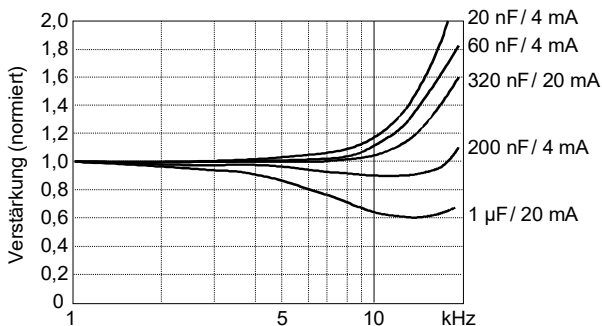


Bild 7: Frequenzgang eines IEPE-Ausgangs in Abhängigkeit von Kabelkapazität und Speisestrom

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

	IEPE-Ausgang	Ladungsausgang
Vorteil	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	Keine Stromversorgung erforderlich - ideal für Batteriegeräte Kein Rauschen - höchste Auflösung Hoher Dynamikbereich Höhere Umgebungstemperaturen möglich Kleinere Bauformen möglich
Nachteil	Konstantstromspeisung erforderlich (Energiebedarf) Interne Rauschquelle durch die Elektronik Umgebungstemperatur meist begrenzt auf 120 °C	Nur kurze Sensorkabel Spezielle störarme Kabel erforderlich Ladungsverstärker erforderlich

Weitere Informationen zu IEPE-Beschleunigungsaufnehmern finden Sie ab Seite 28.

3. Sensordaten

3.1 Kennblatt

Metra verwendet ein modernes PC-gestütztes Kalibriersystem.

Je nach Anforderung können sowohl Werkskalibrierungen als auch akkreditierte Kalibrierungen erfolgen. Das Kalibrierlabor von Metra ist nach ISO 17025 für Schwingbeschleunigung akkreditiert.

Unsere Aufnehmer werden, von wenigen Ausnahmen abgesehen, mit einem individuellen Kennblatt ausgeliefert (siehe Beispiel in Bild 8). Darauf sind alle individuell gemessenen Daten vermerkt, wozu Übertragungsfaktor (Empfindlichkeit), Richtungsselektivität (Querempfindlichkeit), Arbeitspunktspannung und Frequenzgang gehören. Weiterhin sind die verfügbaren typischen Kennwerte enthalten.

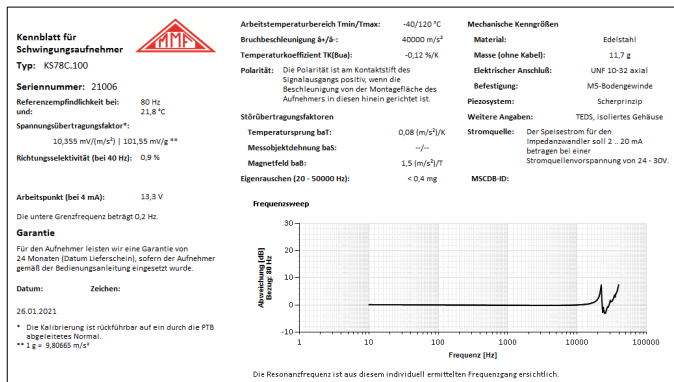


Bild 8: Kennblatt für Metra-Beschleunigungsaufnehmer

Die folgenden Abschnitte erläutern die im Kennblatt angegebenen Messgrößen.

3.2 Übertragungsfaktoren

Der Übertragungsfaktor, oft auch Empfindlichkeit genannt, beschreibt das Verhalten des Sensors gegenüber Beschleunigung.

Bei IEPE-Aufnehmern wird der Spannungsübertragungsfaktor in Millivolt je m/s^2 oder je g angegeben ($1 g = 9,80665 \text{ m/s}^2$).

Bei piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsausgang wird der Ladungsübertragungsfaktor in Picocoulomb (pC) je m/s^2 oder je g angegeben. Bei diesen Sensoren finden sich im Kennblatt zusätzlich die gemessene Innenkapazität und der Isolationswiderstand.

Gemessen wird bei einer Frequenz von 80 Hz, bei einigen hochempfindlichen Sensortypen alternativ bei 16 Hz. Die Kalibrierung erfolgt bei der angegebenen Temperatur mit 4 mA Konstantstromspeisung. Die Kalibrierbeschleunigung variiert je nach Sensortyp.

Die Messunsicherheit der Kalibrierung beträgt 0,7 % bei Referenzbedingungen.

Auf Wunsch kann die Kalibrierung mit davon abweichenden Bedingungen erfolgen.

Diese Messunsicherheit darf nicht mit der Toleranz vom Nennwert verwechselt werden, die bei einigen Typen angegeben wird. Der Beschleunigungsaufnehmer KS80 hat z.B. eine Toleranz von $\pm 5 \%$ bezogen auf die Nennempfindlichkeit von 100 mV/g. Die Standardtoleranz vom Nennwert 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 geringfügig 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.

Bei hohen Genauigkeitsanforderungen sollte ein regelmäßiger Nachkalibrierzyklus eingehalten werden (vgl. Seite 47).

3.3 Frequenzgang

Die Messung des Frequenzgangs erfolgt durch mechanische Anregung. Metra nutzt hierzu einen Hochfrequenz-Schwingungserreger, der mit Sinus-signalen gespeist wird. Die Beschleunigung wird mit Hilfe einer Referenzmesskette annähernd konstant gehalten. Die meisten Beschleunigungsaufnehmertypen werden mit einer individuell gemessenen Frequenzgangkurve ausgeliefert. Diese gibt die Änderung der Sensorempfindlichkeit in Dezibel bezogen auf die Kalibrierfrequenz 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 (vgl. Seite 6). 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 nicht ideal sind.

Die im Datenblatt angegebene Resonanzfrequenz gilt für den angekoppelten Zustand. Die freie Resonanz ist höher.

Durch sehr lange Sensorkabel kann das Frequenzverhalten von IEPE-Aufnehmern beeinträchtigt werden (vgl. Seite 11).

Die untere Grenzfrequenz von IEPE-Aufnehmern kann aus dem Kennblatt entnommen werden. Bei Aufnehmern mit Ladungsausgang erfolgt keine Angabe zur unteren Grenzfrequenz, da diese im Wesentlichen durch die Nachfolgeelektronik bestimmt wird.

3.4 Richtungsselektivität

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 dem maximalen Übertragungsfaktor quer zur Hauptrichtung und dem Übertragungsfaktor in Hauptrichtung nennt man Richtungsselektivität oder Querrichtungsfaktor. Diese ist winkelabhängig und hat eine Achtercharakteristik.

Im Kennblatt wird die Richtungsselektivität bei einigen Typen, z.B. Triaxialaufnehmern, angegeben. Sie wird als Verhältnis der Übertragungsfaktoren bei $f = 40$ Hz bestimmt. Üblich sind <5 % für Scheraufnehmer und <10 % für Kompressions- und Biegeaufnehmer.

Die maximal zulässigen Richtungsselektivitäten für alle Aufnehmer findet man im jeweiligen Datenblatt.

3.5 Maximalbeschleunigung

In den Technischen Daten sind folgende Grenzwerte angegeben:

- a_+ Maximale Beschleunigung in positiver Richtung, das Messobjekt bewegt sich zum Aufnehmer hin.
- a_- Maximale Beschleunigung in negativer Richtung, das Messobjekt bewegt sich vom Aufnehmer weg.
- a_q Maximale Beschleunigung in Querrichtung (bei Stoßaufnehmern).

Bei Ladungsaufnehmern werden diese Grenzwerte üblicherweise nur durch den mechanischen Aufbau des Sensors bestimmt. 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.

Bei IEPE-Aufnehmern werden die Grenzwerte a_+ und a_- in der Regel durch die Aussteuergrenzen des integrierten Impedanzwandlers bestimmt (vgl. Bild 5).

Weiterhin erfolgt die Angabe einer Bruchbeschleunigung a . Dies ist die Beschleunigung $a_{\max}$ in Messrichtung, bei der der Sensor irreversibel beschädigt wird, z.B. durch Ablösung der seismischen Masse oder Bruch der Piezokeramik.

3.6 Linearität

Die mechanischen Sensorelemente piezoelektrischer Sensoren weisen eine sehr hohe Amplitudenlinearität auf. Im angegebenen Messbereich liegt der Linearitätsfehler in der Regel unter 1 %.

Anders verhält es sich bei Sensoren mit IEPE-Ausgang. Hier kommen Linearitätsfehler der Sensorelektronik hinzu, die sich insbesondere bei höheren Ausgangsamplituden auswirken. Ein Linearitätsfehler unter 1 % ist in der Regel bis ca. 70 % der Maximalaussteuerung gewährleistet.

3.7 Schwingungsunabhängige Kennwerte

3.7.1 Temperatureinflüsse

3.7.1.1 Arbeitstemperaturbereich

Die obere Temperaturgrenze wird von der so genannten Curie-Temperatur des Wandlermaterials bestimmt, bei Blei-Zirkonat-Titanat-Keramik etwa 350 °C. Oberhalb dieser Temperatur degenerieren die piezoelektrischen Eigenschaften. Da bereits unterhalb der Curietemperatur irreversible Veränderungen eintreten, ist die obere Temperaturgrenze dadurch definiert, dass sich die Übertragungsfaktoren um nicht mehr als 3 % ändern. Bei geklebten Aufnehmern und Aufnehmern mit internem Verstärker ist die Temperaturbeständigkeit durch die verwendeten Klebstoffe bzw. die elektronischen Bauelemente festgelegt. Übliche Temperaturbereiche sind -10 bis 80 °C, -20 bis 120 °C oder -40 bis 250 °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. IEPE100 von Metra) kann das Sensorsignal zur Weiterleitung konditioniert werden.

3.7.1.2 Temperaturkoeffizienten

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

Im Datenblatt 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 einer Kapazität von 150 pF.

Bei IEPE-Aufnehmern wird der Temperaturkoeffizient des Spannungsübertragungsfaktors $TK(B_{ua})$ angegeben. Wie das Beispiel in Bild 9 zeigt, kann sich der Temperaturkoeffizient über den Arbeitstemperaturbereich ändern. Im Datenblatt werden deshalb mitunter Temperaturkoeffizienten für

Teilbereiche angegeben. Anderenfalls erfolgt die Angabe als Maximalwert im Arbeitstemperaturbereich.

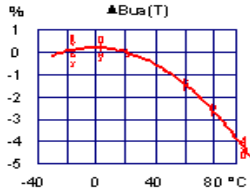


Bild 9: Beispiel für den Verlauf des Temperaturkoeffizienten eines IEPE-Aufnehmers

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. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der resultierende Übertragungsfaktor kleiner wird.

3.7.1.3 Temperatursprungempfindlichkeit

An Piezoelementen aus keramischem Material entstehen bei sprungartigen Temperaturänderungen Ladungsverschiebungen.

Ursache ist der so genannte pyroelektrische Effekt. Bei Scheraufnehmern mit ihrer gegenüber Kompressionsaufnehmern um den Faktor 100 geringeren Pyroelektrizität sind jedoch nur Störungen durch Wärmedehnung der Konstruktionsteile von Bedeutung. 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 von 20 auf 50 °C mit einer unteren Frequenzgrenze von $f_u = 1$ Hz ermittelt, wobei der Sensor auf einen Aluminiumblock mit 200 g Masse montiert ist.

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.

3.7.2 Bodendehnung

Durch Dehnung des Messobjektes wird bei fester Verbindung die Koppelfläche des Aufnehmers mit verformt. Diese Deformation bewirkt unterschiedliche Einwirkungen auf das 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 eliminierende Fehler, da sie bei schwingenden Teilen meist ein dem Nutzsignal ähnliches Spektrum hat. Stark ausgeprägt ist der Effekt bei Kompressionsaufnehmern, während Scher-Beschleunigungsaufnehmer kaum auf Messobjektdehnung reagieren.

3.7.3 Elektromagnetische Felder

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

Die den Aufnehmerdaten angegebenen Werte b_{aB} werden bei der magnetischen Flussdichte $B = 0,01 \text{ T}$ und der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ 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. Starke Magnetfelder können zum Beispiel in der Umgebung von elektrischen Maschinen und Frequenzumrichtern entstehen.

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 (siehe Seite 45). 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.

3.7.4 Schalldruck

Sehr hohe Schalldruckpegel bewirken eine Deformation des Aufnehmergehäuses, die in das Wandlerelement hineinwirkt. Der Schalleinfluss wird mit dem Störübertragungsfaktor für Schalldruck b_{aP} beschrieben.

Die bei einigen Aufnehmern 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 kann als Störgröße in der Regel vernachlässigt werden. Dominant ist meistens die durch Schalleinwirkung induzierte Vibration des Messobjekts.

3.7.5 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 (vgl. Seite 27). Neben der Aufnehmerkapazität wird im Kennblatt die Kapazität des mitgelieferten Kabels angegeben.

3.7.6 Eigenrauschen und Nachweisgrenze

Ein piezoelektrisches Sensorelement kann als rein kapazitive Quelle betrachtet werden und ist somit praktisch 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 frequenzunabhängig.

Bild 10 zeigt diesen Zusammenhang an einem typischen Rauschspektrum eines IEPE-Beschleunigungsaufnehmers.

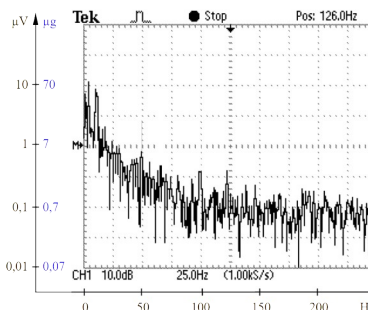


Bild 10: Typisches Rauschspektrum eines IEPE-Aufnehmers

Es ist zweckmäßig, das Rauschen am Signalausgang eines Aufnehmers auf dessen Eingangsgröße zu beziehen. 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.

Um die Auflösungsgrenze eines Aufnehmers abzuschätzen, wird in den Daten der meisten Sensoren das dem Rauschen äquivalente Beschleunigungssignal (a_n) als Effektivwert über den linearen Frequenzbereich sowie Rauschdichten für ausgewählte Frequenzen angegeben.

Beispiel für eine Rauschangabe im Sensordatenblatt:

Breitbandrauschen: $a_{n\text{ wb}} < 14 \mu\text{g}$ (0,5 bis 1000 Hz; ± 3 dB)

Rauschdichte bei $f_1 = 0,1$ Hz: $a_{n1} = 3 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Rauschdichte bei $f_2 = 1$ Hz: $a_{n2} = 1 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Rauschdichte bei $f_3 = 10$ Hz: $a_{n3} = 0,3 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Rauschdichte bei $f_4 = 100$ Hz: $a_{n4} = 0,1 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Das Breitbandrauschen ist der Effektivwert der äquivalenten Rauschbeschleunigung über den Nutzfrequenzbereich des Sensors.

Rauschdichten zeigen das Verhalten des Sensors bei bestimmten Frequenzen, was insbesondere bei tiefen Frequenzen wichtig sein kann. Um die äquivalente Rauschbeschleunigung in einem bestimmten Frequenzbereich ($f_{\min}$ bis $f_{\max}$) abzuschätzen, kann folgende Formel benutzt werden:

$$a_n(f_{\min} \cdots f_{\max}) = \sum_{i=j}^k a_{ni} \sqrt{(f_{i+1} - f_i)}$$

Darin sind a_{ni} die Rauschdichten, die in dem Frequenzbereich enthalten sind und f_i die zugehörigen Frequenzen.

Die Indizes j und k werden so gewählt, dass gilt: $f_j \leq f_{\min}$
 $f_k < f_{\max}$

Beispiel: Berechnung des Eigenrauschens eines Beschleunigungsaufnehmers mit den oben angegebenen Rauschdaten im Frequenzbereich von 0,1 bis 100 Hz:

$$\begin{aligned} a_n &= \sum_{i=1}^3 a_{ni} \sqrt{(f_{i+1} - f_i)} \\ a_n &= 3 \frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}} \sqrt{(1 \text{ Hz} - 0,1 \text{ Hz})} \\ &\quad + 1 \frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}} \sqrt{(10 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz})} \\ &\quad + 0,3 \frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}} \sqrt{(100 \text{ Hz} - 10 \text{ Hz})} \end{aligned} \quad a_n = 8,7 \mu\text{g}$$

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

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 Quotient der Quadrate von Nutzsignal (a) und Rauschsignal (a_n) und wird oft in Dezibel angegeben:

$$S_n = 10 \log \frac{a^2}{a_n^2} = 20 \log \frac{a}{a_n}$$

4. Anwendung

4.1 Messverstärker

4.1.1 Aufnehmer mit Ladungsausgang

4.1.1.1 Ladungsverstärker

Aufnehmer mit Ladungsausgang erzeugen ein Ausgangssignal in der Größenordnung von einigen Picocoulomb mit einer sehr hohen Ausgangs-impedanz. Um Standardmesstechnik zur Weiterverarbeitung nutzen zu können, muss das Sensorsignal 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 11 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Ladungsverstärkerstufe:

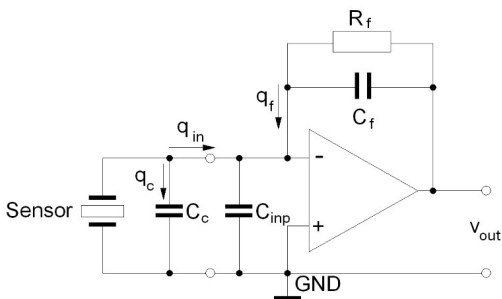


Bild 11: Ladungsverstärker

Die Eingangsladung q_{in} fließt in den Summenpunkt am 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 Spannungsdifferenz 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:

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

Es ist ersichtlich, dass die Ausgangsspannung eines Ladungsverstärkers lediglich von der eingespeisten Ladung und der Rückkoppelkapazität abhängt. Eingangs- und Kabelkapazitäten bleiben ohne Einfluss. Dies ist von Bedeutung, wenn ein Beschleunigungsaufnehmer mit unterschiedlichen Kabeln eingesetzt wird.

Der Rückkoppelwiderstand R_f in Bild 11 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 11 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 M72 oder der Ladungsvorverstärker IEPE100 von Metra.

4.1.1.2 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 12).

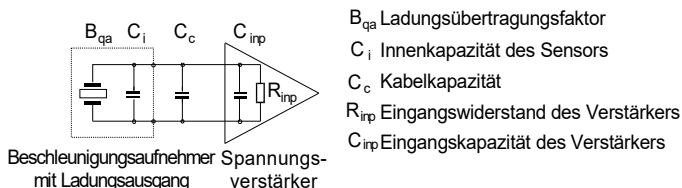


Bild 12: Ladungsaufnehmer an Wechselspannungsverstärker

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_u wird von C_c , C_{inp} und R_{inp} bestimmt:

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

Die untere Grenzfrequenz steigt mit sinkendem Verstärkereingangswiderstand.

Beispiel: An einen typischen Oszilloskopeingang mit $10\text{ M}\Omega$ Eingangswiderstand und 20 pF Eingangskapazität soll ein Beschleunigungsaufnehmer vom Typ KS93 mit einer Innenkapazität von $0,4\text{ nF}$ angeschlossen werden. Das Sensorkabel vom Typ 009-SUB-BNC-1,5 hat eine Kapazität von 135 pF . Ergebnis: Die untere Grenzfrequenz ist ca. 30 Hz .

4.1.2 IEPE-Aufnehmer

Eine Besonderheit von IEPE-Sensoren liegt in der Übertragung von Messsignal und Versorgungsenergie über eine gemeinsame Leitung. Daher kommen Aufnehmer dieses Typs, ebenso wie Ladungsaufnehmer, mit einem einadrigen geschirmten Kabel aus. Bild 13 zeigt das Prinzip der IEPE-Versorgung.

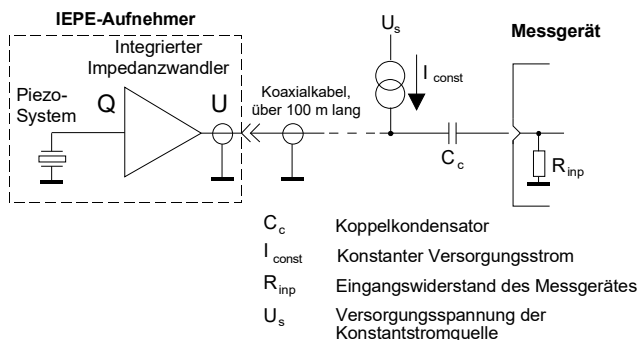


Bild 13: IEPE-Prinzip

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, zum Beispiel das Schwingungsmessgerät VM31, arbeiten auch mit 2 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. (vgl. Seite 11).

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.

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

Aus Bild 14 ist ersichtlich, dass IEPE-Beschleunigungsaufnehmer eine einfache Selbsttestmöglichkeit über ihre Arbeitspunktspannung haben.

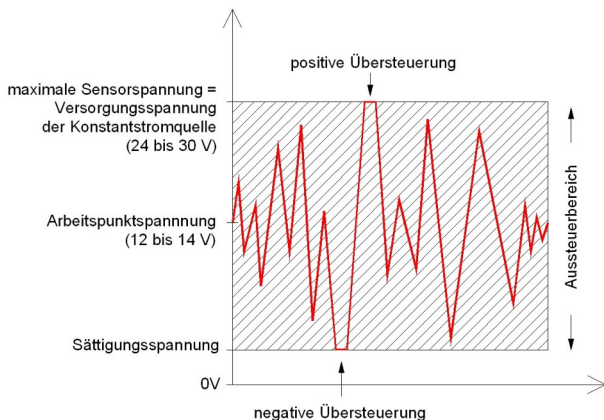


Bild 14: Aussteuerbereich eines IEPE-Aufnehmers

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

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

Aufnehmer mit IEPE-Ausgang besitzen eine innere Zeitkonstante, die näherungsweise einem R-C-Hochpass erster Ordnung entspricht. Wird ein Sprungimpuls an den Eingang gelegt, antwortet der Ausgang mit einer exponentiell abklingenden Amplitude (Bild 15).

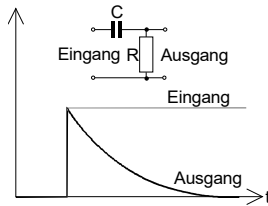


Bild 15: Sprungantwort eines IEPE-Aufnehmers

Sprungimpulse entstehen, wenn der Sensor an die IEPE-Versorgung angeschlossen wird oder wenn Stoßbeschleunigungen einwirken. Die Abklingzeit kann je nach unterer Grenzfrequenz bis zu einer Minute betragen. Dies ist insbesondere bei tieffrequenten Messungen zu beachten.

Eine Vielzahl von Messgeräten ist mit eingebauter IEPE-Versorgung ausgestattet. Beispiele von Metra sind die Messverstärker der Serie M72, M208 und M33, der Schwingungswächter M12 oder das Kalibriersystem VC120. Die IEPE-Versorgung kann auch eine separate Einheit sein, wie z.B. das Versorgungsmodul M29.

4.2 Elektronisches Datenblatt nach IEEE 1451.4

4.2.1 Einführung

Der 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 dem 64 + 256 Bit bzw. 1024 Bit großen EEPROM-Speicher sind für den Anwender relevante Sensordaten abgelegt. Auf Grund der geringen Speichergröße werden die Daten komprimiert in speziellen Zahlenformaten abgelegt.

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 selbstständig 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 verlorenen 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 16 erläutert das Prinzip.

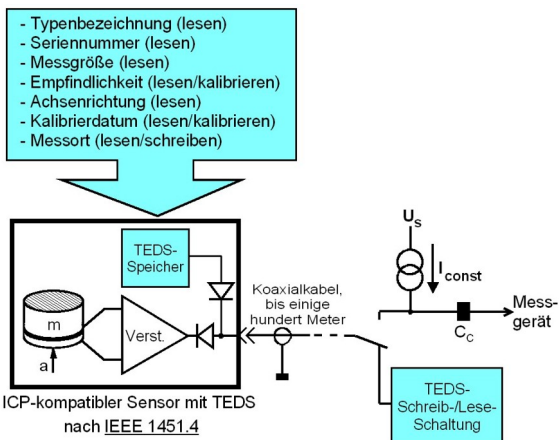


Bild 16: TEDS-Beschleunigungsaufnehmer

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 bzw. des 1024 Bit großen DS2431 erfolgt über die Sensorleitung. Die Kommunikation basiert auf dem 1-Wire® - Protokoll von Maxim Integrated. Der Datenaustausch erfolgt mit TTL-Pegel, wobei die Polarität umgekehrt zur Konstantstromquelle ist. Im Sensor werden die Analog- und Digitaldaten mittels Dioden getrennt.

Die Messverstärker M72 und M208A von Metra bieten TEDS-Unterstützung mit automatischer Normierung der Sensorempfindlichkeit.

4.2.2 Anordnung der TEDS-Daten im Speicher

4.2.2.1 Basic TEDS

In einem 64 Bit großen Teil des Speicherbausteins DS2430A, dem Applikationsregister, liegt das so genannte „Basic TEDS“. Es enthält grundlegende Informationen zur Identifikation des Sensors:

- Typenbezeichnung, Versionsnummer: Metra legt in diesem Bereich eine verschlüsselte Typenbezeichnung ab. Die vollständige Typenbezeichnung, z.B. „KS78.100“, befindet sich in einem nach IEEE 1451.4 standardisierten File, dem „Manufacturer Model Enumeration File“, das Sie im Download-Bereich unserer Internetseiten finden.
- Seriennummer: Die im Speicher abgelegte Seriennummer ist identisch mit der auf dem Gehäuse eingravierten.
- Herstellercode: Hier befindet sich eine herstellerspezifische, von der IEEE zugewiesene Nummer. Metra hat die Herstellernummer 61. Eine vollständig Liste der Herstellercodes finden Sie hier:
<http://standards.ieee.org/develop/regauth/manid/public.html>

Das Basic TEDS wird ausschließlich vom Hersteller gespeichert.

Beim neueren TEDS-Speicherbaustein DS2431 entfällt das Applikationsregister. Die Basic-TEDS-Daten liegen hier am Anfang des 1024 Bit großen Speicherbereiches.

4.2.2.2 Template Nr. 25

Die Kalibrierdaten liegen beim DS2430A in einem 256 Bit großen Bereich bzw. beim DS2431 im Bereich hinter dem Basic TEDS. Ihre Anordnung wird in so genannten Templates definiert. Für Schwingungsaufnehmer wird in den meisten Fällen das standardisierte Template Nr. 25 verwendet. Mit Hilfe von Schaltbits kann beim Template Nr. 25 zwischen TEDS-Daten mit oder ohne Übertragungsfunktion gewählt werden. Metra verwendet, wenn vom Kunden nicht anders gefordert, die Version mit Übertragungsfunktion. Die gespeicherten Angaben zur Übertragungsfunktion, z.B. untere Grenzfrequenz, Resonanzfrequenz und Güte, sind dabei typische Kennwerte. Im Einzelnen enthält das Template Nr. 25 folgende Angaben:

- Empfindlichkeit in $V/m/s^2$: Die im mitgelieferten Kennblatt angegebene Empfindlichkeit bei Referenzbedingungen
- Kalibrierfrequenz der Empfindlichkeit in Hz
- Untere Grenzfrequenz in Hz: Typischer Kennwert gemäß Datenblatt
- Messrichtung: Relevant bei Triaxialaufnehmern (0 = X; 1 = Y; 2 = Z; 3 = keine Angabe)
- Sensormasse in Gramm
- Polarität des Ausgangssignals bei positiver Beschleunigungsrichtung: 0 = positiv, 1 = negativ
- Tiefpassfrequenz in Hz (falls der Sensor einen Tiefpass enthält)
- Resonanzfrequenz in Hz: Typischer Kennwert gemäß Datenblatt
- Amplitudenanstieg in Prozent pro /Dekade
- Temperaturkoeffizient in Prozent pro Kelvin: Typischer Kennwert gemäß Datenblatt
- Kalibrierdatum (TT.MM.JJ)
- Initialen des Kalibrierenden (3 Großbuchstaben)
- Kalibrierintervall in Tagen: Empfohlene Zeit bis zur nächsten Kalibrierung

Diese Daten werden vom Hersteller bei Auslieferung gespeichert und können im Rahmen einer Nachkalibrierung auch von einem Kalibrierlabor verändert werden.

Darüber hinaus enthält der TEDS-Speicher einige Bytes messstellenspezifische Daten, die vom Anwender editiert werden können:

- Messstellennummer (1 bis 2046): Eine Nummer zur Identifikation der Messstelle
- Anwendertext: 13 Textzeichen

➔ Im Download-Bereich unserer Internetseite

<http://www.mmf.de/software-download.htm>

finden Sie einen TEDS-Editor, mit dem Sie über ein von Metra erhältliches Interface-Kabel die Sensordaten auslesen und editieren können.

4.3 Vorbereitung der Messung

4.3.1 Auswahl der Messstelle

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.)?

4.3.2 Auswahl des Sensors

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Auswahlkriterien:

Kriterium	Sensoreigenschaften
Amplituden- und Frequenzbereich	Übertragungsfaktor, Maximalbeschleunigung und Resonanzfrequenz auswählen, Stoßaufnehmer für extreme Amplituden, Seismische Aufnehmer für geringste Amplituden
Masse des Messobjektes	Aufnehmermasse $< 1/10$ der Masse des Messobjektes, Miniaturaufnehmer für leichte Messobjekte
Temperatursprünge, Messobjektdehnung, Magnetfelder, extreme Schallpegel	Einfluss mit Hilfe der Störübertragungsfaktoren abschätzen, Scheraufnehmer bei Temperatursprüngen und Messobjektdehnung, Edelstahlgehäuse bei starken Magnetfeldern
Feuchtigkeit und Staub	Industrieraufnehmer mit Schutzgrad IP67/68 verwenden
Messung von Schwinggeschwindigkeit und -weg	Einfach- und Doppelintegration (M33, M72, M208, M12, M14)
Befestigung Schnelle Messung mit geringer Genauigkeit unter 1 kHz Temporäre Messung ohne Eingriffe am Messobjekt Langzeitmessung	Tastspitze verwenden ¹ Befestigung mit Haftmagnet, Klebewachs oder Klebstoffen Befestigung mit Stiftschraube oder Isolierflansch
Erdungsprobleme, starke Ausgleichsströme	Isolierflansch oder isolierte Aufnehmer verwenden
Lange Entfernung zwischen Sensor und Messgerät	IEPE-Aufnehmer verwenden

1 Metra bietet mit dem Typ KST94 eine Kombination aus Beschleunigungsaufnehmer und federnd gelagerter, vom Gehäuse entkoppelter Tastspitze an

4.3.3 Befestigungsarten

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

Die Montage des Beschleunigungsaufnehmers sollte so dicht wie möglich an der Quelle der zu untersuchenden Schwingung erfolgen.

➔ Für höchste Genauigkeitsanforderungen, besonders bei höheren Frequenzen im Kilohertzbereich, müssen der Sensor und das Messobjekt saubere, ebene, glatte und gratfreie Koppelflächen haben.

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

Die Schwingungsübertragung bei höheren Frequenzen wird durch Behandlung der Koppelfläche mit Silikonfett verbessert.

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

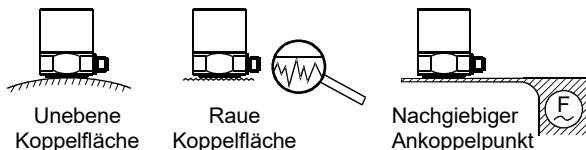


Bild 17: Häufige Ursachen von Ankoppelfehlern

Verfälschungen aufgrund von Eigenschwingungen des Sensors können durch eine symmetrische Ankopplung minimiert werden. Die Masse des Sensors inklusive Befestigungsteilen soll gering gegenüber der Messobjektmasse sein. Als Richtwert gelten 10 % der Messobjektmasse.

Fehlausrichtungen zwischen der Messachse des Aufnehmers und der zu messenden Richtung müssen möglichst gering gehalten werden, insbesondere bei dominanten Querschwingungen. Bei Schraubbefestigung ist darauf zu achten, dass die Schraube nicht länger als die Bohrung ist und kein Spalt unter dem Sensorboden entsteht.

Die folgenden Befestigungsarten sind bei Beschleunigungsaufnehmern üblich:

- Schraubbefestigung mit Stiftschraube, Isolier- oder Klebeflansch
- Haftmagnet
- Klebefestigung mit Bienenwachs, Sekundenkleber, Epoxydharz oder dünnem doppelseitigen Klebeband
- Tastspitze mit Handandruck
- Automatisierte Ankopplung mit beweglich gelagerter Tastspitze

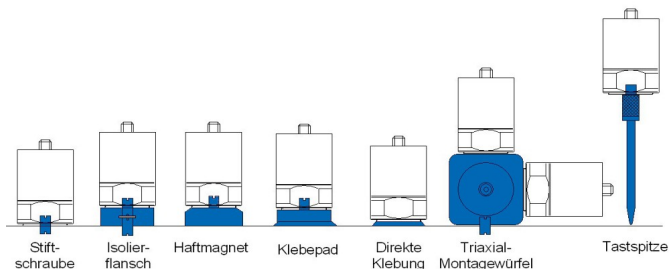


Bild 18: Befestigungsarten für Beschleunigungsaufnehmer



Bild 19: Beschleunigungsaufnehmer mit beweglicher Tastspitze KST94

Bild 20 vergleicht das Verhalten der verschiedenen Ankoppelarten bei höheren Frequenzen. Die Koppelresonanzen werden durch zusätzliche Massen und Nachgiebigkeiten verursacht.

Die idealisierten Frequenzgänge wurden mit einem etwa 25 Gramm schweren Beschleunigungsaufnehmer ermittelt. Es wird deutlich, dass Schraubmontage und Direktklebung mit Sekundenkleber die besten Übertragungseigenschaften liefern.

➔ Sekundenkleber lässt sich mit Aceton lösen und entfernen.

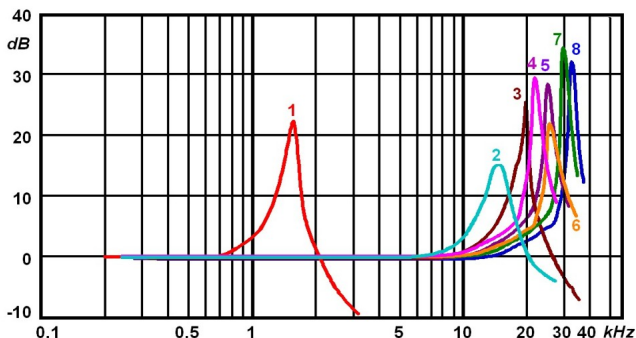


Bild 20: Resonanzfrequenzen typischer Befestigungsarten

- 1: handgehaltene Tastspitze
- 2: doppelseitiges Klebeband (dünn) mit Klebeflansch
- 3: Bienenwachs mit Klebeflansch
- 4: Sekundenkleber mit Klebeflansch
- 5: Bienenwachs, direkt
- 6: doppelseitiges Klebeband (dünn), direkt
- 7: Sekundenkleber, direkt
- 8: Stiftschraube

Je höher die zu messende Frequenz, desto wichtiger ist die Steifigkeit der Ankopplung.

Zur Ankopplung verwendete Zubehörteile, wie Magnete, Klebe- oder Isolierflansche sollen mindestens die Größe der Koppelfläche des Sensors haben.

Die folgende Tabelle vergleicht einige übliche Ankopplungsarten für Beschleunigungsaufnehmer im Hinblick auf verschiedene Kriterien.

	Resonanz- frequenz	Temperatur	Sensor- masse und Koppel- steifigkeit	Resonanz- überhöhung (Q)	Relevanz der Ober- flächengüte
Stift- schraube	●	●	●	●	●
Sekunden- kleber	●	●	●	●	◐
Epoxyd- harzkleber	●	◐	●	●	○
Bienen- wachs	◐	○	◐	●	●
Doppel- seitiges Klebeband	○	◐	○	○	●
Haftmagnet	◐	●	○	○	●
Tastspitze	○	○	○	○	○

● hoch ◐ mittel ○ gering

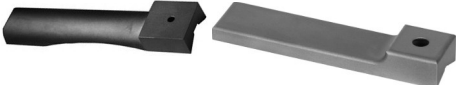
Die Beschleunigungsaufnehmer von Metra haben folgende Befestigungsgewinde: M3, M5 und M8. Einige Typen haben auch integrierte Befestigungsbolzen mit M4-, M6- oder M10-Gewinde.

Bei Klebefestigung sind Kleber zu verwenden, die im ausgehärteten Zustand eine hohe Steifigkeit aufweisen. Geeignet sind zum Beispiel Cyanacrylatkleber (Sekundenkleber), Epoxydharzkleber oder Heißkleber. Zum Kleben auf rauen Flächen, zum Beispiel auf Gusseisen, eignen sich zähflüssige Cyanacrylatkleber oder Epoxydharzkleber mit Füllstoff. Ungeeignet sind lösungsmittelbasierte Kleber, da sie die Tendenz haben, im Inneren weich zu bleiben. Die Klebeschicht muss möglichst dünn sein. Für die temporäre Befestigung leichter Aufnehmer kann auch dünnes doppelseitiges Klebeband nützlich sein.

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

Die folgende Übersicht 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)	➔ Vermeiden 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 Epoxydharz, wenn im Messobjekt keine Gewinde vorhanden sind. 
Nichtisolierende Befestigungspads 229 (M8)	➔ Für optimale Ankoppelung an Messobjekte, die keine ebenen und glatten Oberflächen und keine Gewinde aufweisen. Zur Klebefestigung mit Sekundenkleber (z.B. das gelartige Loctite 454) oder Epoxydharz. 

Triaxial- Befestigungswürfel 130 (M3) 030 (M5) 230 (M8) 330 (M10)	→ Für die dreiachsige Montage einachsiger Aufnehmer. 
Handgriffadapter 140 (M3) 141 (M5)	→ Für die Montage ein- und dreiachsiger Beschleunigungsaufnehmer mit M3-Gewinde auf gewölbten Oberflächen, z.B. auf Handgriffen von Elektrowerkzeugen. 
Handgehaltene Adapter 142 (M3) 143 (M5)	→ Für die Ankopplung ein- und dreiachsiger Beschleunigungsaufnehmer mit M3-Gewinde durch Handandruck auf gewölbten Oberflächen, z.B. auf Handgriffen von Elektrowerkzeugen. 

Haftmagnete 108 (klein, M3) 308 (groß, M3) 408 (M4-Bohrung) 008 (M5) 708 (M5) 208 (M8) 508 (M8-Bohrung) 608 (2 x M5)	→ Sehr starke Seltenerd-Magneten für die schnelle Befestigung, max. 120 °C Magnetische Messobjekte mit glatter und flacher Oberfläche erforderlich (kein Kippeln). Wenn nicht möglich, eine magnetische Edelstahlscheibe aufschweißen oder mit Epoxdharz aufkleben. Wichtig: Magnet nicht auf das Messobjekt aufsnappen lassen, um starke Stoßbelastung des Sensors zu vermeiden. Langsam abrollen. Nicht für seismische Aufnehmer verwenden.  Typ 608: Für Rohre etc.
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 die schnelle Befestigung leichter Sensoren bei Raumtemperatur und tiefen Frequenzen. Mit Fingern erwärmen, dünne Schicht auf das Messobjekt auftragen und Sensor andrücken. 

4.3.4 Kabel

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. 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 störrarme Kabel an. Diese zeichnen sich durch eine spezielle Ableitschicht auf dem Dielektrikum aus. Auch bei Verwendung störrarmer Kabel sollte auf ordnungsgemäße Befestigung am Messobjekt geachtet werden.

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

➔ Bei Ladungsaufnehmern sollte die Kabellänge nicht über 10 m sein.

IEPE-Aufnehmer benötigen keine störrarmen 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. Miniaturladungsaufnehmer 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 21).

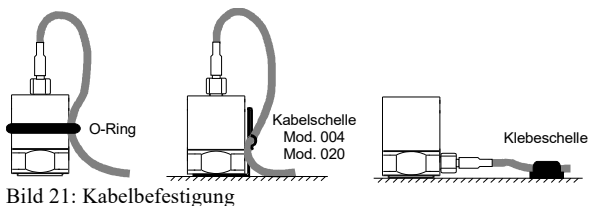


Bild 21: Kabelbefestigung

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 UNF 7/16-28-Gewinde, IP64
- *BNC*: Koaxialsteckverbindung mit Bajonettverschluss
- *Binder 707*: 4-poliger Rundsteckverbinder mit M5-Gewinde, IP67
- *Binder 711*: 4-poliger Rundsteckverbinder mit M8-Gewinde
- *Binder 713*: 4-poliger Rundsteckverbinder mit M12-Gewinde, IP67
- *Binder 718*: 4-poliger Rundsteckverbinder mit M8-Gewinde, IP67
- *1/4-28 UNF*: 4-poliger Rundsteckverbinder

4.3.5 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 Messgerät
- 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, bei Frequenzumrichtern 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 22 und 23).

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:

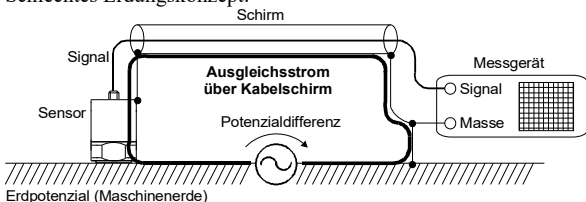


Bild 22: Sensormontage ohne Isolierung führt zu Ausgleichsströmen über das Sensorkabel

Besseres Erdungskonzept:

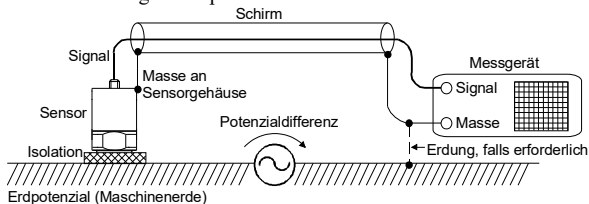


Bild 23: Unterbrechung des Erdungsstromkreises durch isolierte Sensormontage

4.4 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 1 bis 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 einem erstabgeleiteten Referenznormal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Auf Wunsch bieten wir neben Werkskalibrierungen auch akkreditierte Kalibrierungen nach ISO 17025 an.

Viele Firmen ziehen es vor, eigene Testausrüstungen 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 überprüfen, die sich nicht zum Einschicken eignet. Zu diesem Zweck bietet Metra die batteriebetriebenen Schwingungskalibratoren der Serie VC2x an. Typ VC20 liefert ein geregeltes, quarzstabiles Schwingensignal von 10 m/s^2 (Schwingbeschleunigung), 10 mm/s (Schwinggeschwindigkeit) oder $10 \text{ }\mu\text{m}$ (Schwingweg) bei einer Frequenz von 159,2 Hz. Der VC21 bietet 7 Frequenzen von 15,92 / 40 / 80 / 159,2 / 320 / 640 / 1280 Hz mit bis zu 5 Amplituden von 1 bis 20 m/s^2 .

Das Schwingungskalibriersystem VC120 hat Schwingfrequenzen von 70 bis 10000 Hz. Es liefert 1 m/s^2 Schwingpegel. Auch Frequenzgänge können mit dem VC120 gemessen werden. Die Bedienung und die Anzeige der gemessenen Empfindlichkeit kann über ein LC-Display oder per PC-Software erfolgen.

Falls kein Schwingungskalibrator verfügbar ist, kann die Messkette justiert werden, indem

- die Verstärkung des Messverstärkers auf die Empfindlichkeit des Aufnehmers abgeglichen wird. Einige Messverstärker bieten hierzu eine numerische Einstellmöglichkeit,
- die Aufnehmerempfindlichkeit als Korrekturfaktor eingegeben wird, z.B. bei PC-Messsystemen,
- der Aufnehmer durch ein Generatorsignal ersetzt wird und ein entsprechendes Sinussignal eingespeist wird.

Bitte berücksichtigen Sie, dass der Kalibriergenauigkeit bei Schwingungsaufnehmern technische Grenzen gesetzt sind. Ein praktisch erreichbarer Wert für die Kalibrierunsicherheit ist 1 %.

4.5 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, Verformung durch Kabelbewegung bei nicht befestigtem Kabel, elektrische und magnetische Einwirkung, insbesondere auf lange Kabel, Eigenstörspannung des Kabels bei Bewegung

Systematische Fehler sind mathematisch korrigierbar, wenn ihr Wirkmechanismus 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 Bezug auf eine Anfangsmessung, so entfallen die meisten systematischen Fehlereinflüsse. Das ist besonders wichtig bei nicht bekannten systematischen Fehlern.

Die meisten Fehler treten zufällig auf oder 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	1 %
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 erreichbar, wenn die wichtigsten Fehlereinflüsse bekannt sind und die verwendete Messapparatur eine hohe Qualität aufweist.

5. Normen für Schwingungssensoren

Auswahl von Standards mit Bezug zu piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern:

- **ISO 2041:** Mechanische Schwingungen und Stöße - Begriffserklärung
- **ISO 2954:** Mechanische Schwingungen an rotierenden und Hubkolbenmaschinen - Anforderungen an Schwingstärkemessgeräte
- **ISO5347:** Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern (mehnteilige Normenreihe)
- **ISO 5348:** Mechanische Schwingungen und Stöße - Mechanische Ankopplung von Beschleunigungsaufnehmern
- **ISO 8041:** Schwingungseinwirkung auf den Menschen - Messeinrichtung
- **ISO 8042:** Stoß- und Schwingungsmessung - Technische Daten seismischer Beschleunigungsaufnehmer
- **ISO 10816:** Mechanische Schwingungen - Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen
- **ISO 15242:** Wälzlager - Geräuschprüfung (Körperschallmessung)
- **ISO 16063:** Verfahren zur Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern (mehnteilige Normenreihe)
- **DIN 4150:** Erschütterungen im Bauwesen
- **DIN 5426:** Laufgeräusche von Wälzlagern
- **DIN 45661:** Schwingungsmesseinrichtungen - Begriffe
- **DIN 45662:** Schwingungsmesseinrichtungen - Allgemeine Anforderungen und Prüfungen
- **DIN 45669:** Messung von Schwingungsimmissionen