



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:

- Berührunglose 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

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 der Serie M68 oder IEPE100.

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 Kompressionscheibe. Diese ähnelt einem Keramikcondensator 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.

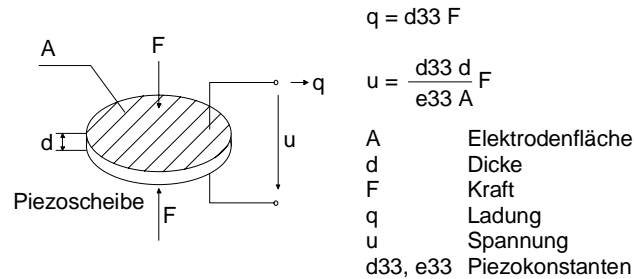


Bild 1: Piezoelektrischer Effekt, Grundberechnungen

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).

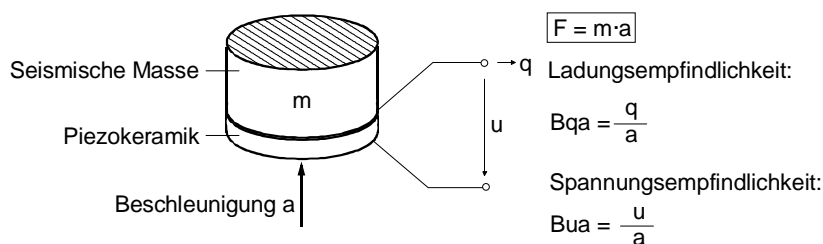


Bild 2: Wirkprinzip eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers

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.

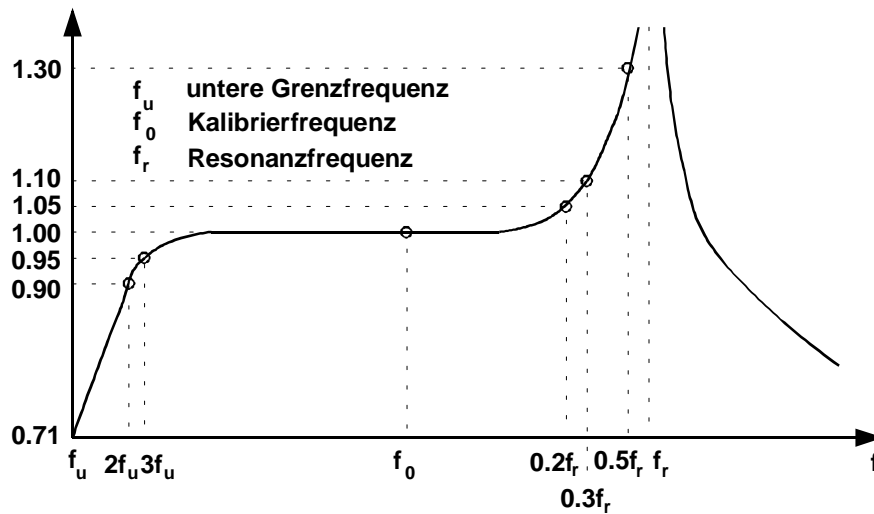


Bild 3: Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers

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.

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 100Ω 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.

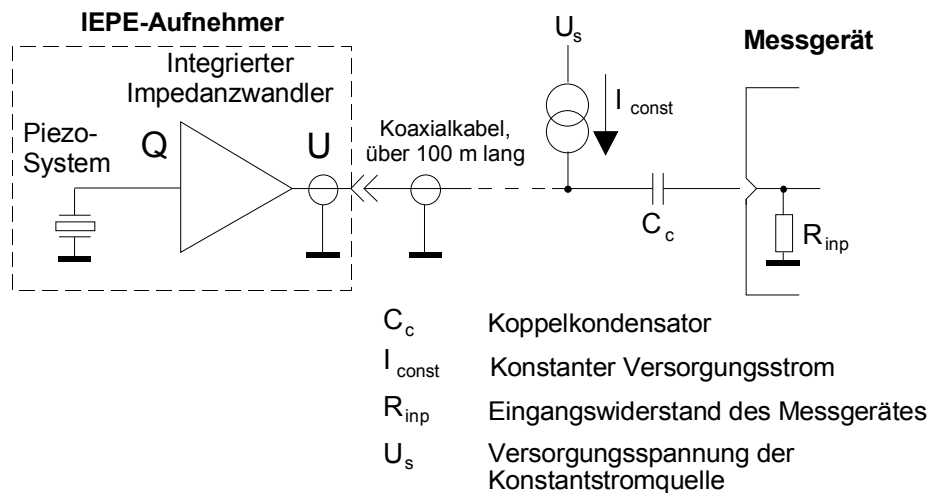


Bild 1: IEPE-Prinzip

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 ± 6 V.

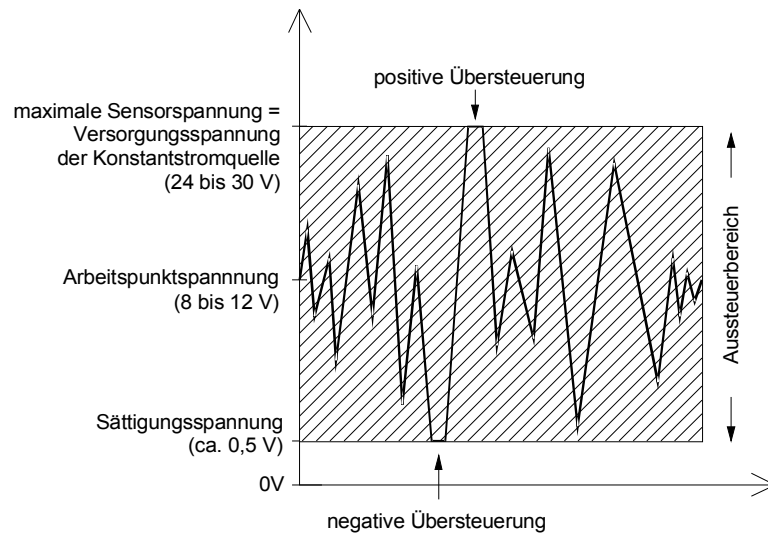


Bild 2: Aussteuer Grenzen IEPE-Sensoren

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.

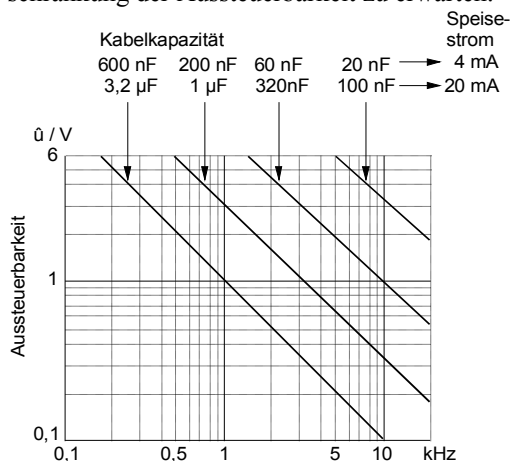


Bild 3: Aussteuerbarkeit eines IEPE-Impedanzwandlers in Abhängigkeit von Kabelkapazität und Speisestrom

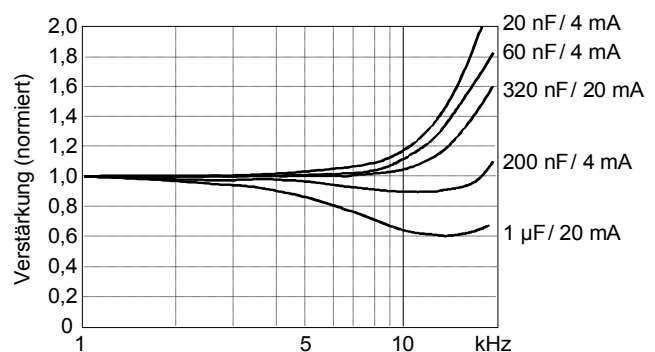


Bild 4: Frequenzgang eines IEPE-Impedanzwandlers in Abhängigkeit von Kabelkapazität und Speisestrom

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.

AN3

Applikationsschrift
Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer
IEPE - Sensoren



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 °C	<ul style="list-style-type: none">• Nur kurze Sensorkabel• Spezielle störarme Kabel erforderlich• Ladungsverstärker erforderlich