

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 Aussteuergrößen 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 sprungartigen 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 Konstruktionssteile 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 Nutzsinal ähnliches Spektrum hat. Stark ausgeprägt ist der Effekt bei Kompressionsaufnehmern, während Scherbeschleunigungsaufnehmer kaum auf Messobjektdehnung reagieren.

Magnetfelder

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 $B = 0,01$ 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.

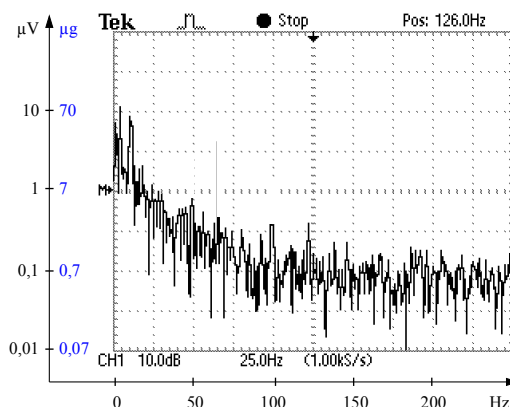


Bild 2: Typisches Rauschspektrum eines IEPE-Beschleunigungsaufnehmers

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