



# Überlegungen zur Auswahl von Beschleunigungsaufnehmern: Piezoelektrische Aufnehmer mit Ladungsausgang und integrierter ICP®-Elektronik

Jim Lally,  
PCB Piezotronics, Inc. Depew, NY 14043

Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsausgang (PE) und integrierter Elektronik (ICP®) stehen in reicher Auswahl für Schock- und Schwingungsmessungen zur Verfügung. Zu den Auswahlkriterien gehören die elektrischen und physikalischen Eigenschaften des Beschleunigungsaufnehmers, seine Leistungsmerkmale sowie Überlegungen bezüglich Umgebungs- und Einsatzbedingungen. Ein Vergleich der Vorteile und Einschränkungen zwischen den beiden Grundtypen kann bei der Wahl des am besten geeigneten Beschleunigungsaufnehmers und Messsystems für eine spezielle Anwendung im Prüfstand, im Gelände, in der Fabrik, unter Wasser, auf einem Schiff, in einem PKW oder Flugzeug hilfreich sein.

## Einführung

Die vorliegende Information soll der Aufnehmersauswahl bezüglich der beiden Grundtypen piezoelektrischer Sensoren dienen. Da ist einmal der PE-Typ mit hochohmigem Ladungsausgang und zum anderen der ICP®-Typ mit seinem charakteristischen niederohmigen Ausgang. Zusätzlich zu den elektrischen und physischen Eigenschaften eines Aufnehmers spielen noch verschiedene andere Faktoren eine Rolle bei der Auswahl für eine bestimmte Anwendung. Zu diesen Faktoren gehören die Umgebungs- und Einsatzbedingungen, die Anzahl der Kanäle und die Systemverträglichkeit.

## PIEZOELEKTRISCHE (PE) BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMER

PE-Beschleunigungsaufnehmer liefern ein hochohmiges, elektrostatistisches Ladungssignal als Reaktion auf eine mechanische Belastung, die auf das piezokeramische Quarz-Sensorelement einwirkt. Wegen ihrer hohen Ladungsempfindlichkeit sind Piezo-Keramiken in Beschleunigungsaufnehmern mit Ladungs- oder Spannungsausgang weit verbreitet. Quarz, das allgemein als das stabilste aller piezoelektrischen Materialien angesehen wird, findet man außerdem häufig in universell einsetzbaren ICP®-Beschleunigungsaufnehmern, Kalibriernormalen und PE-Druck- und Kraftaufnehmern. Systeme mit Ladungsausgang sind seit langer Zeit erhältlich. PE-Beschleunigungsaufnehmer werden über ein störspannungsarmes Kabel mit dem hochohmigen Eingang eines Ladungsverstärkers verbunden, der das Ladungssignal in ein brauchbares niederohmiges Spannungssignal für Akquisitionszwecke umformt. Der Ladungsverstärker sorgt für die Impedanzwandlung des Signals, für die Normierung und für die Anpassung von Verstärkung und Bereich. Zu den Optionen zählen Filter, Integration für die Geschwindigkeit und/oder den Weg sowie Einstellungsmöglichkeiten für die Eingangszeitkonstante, welche die Übertragungseigenschaften im niederfrequenten Bereich bestimmt. Moderne Ladungsverstärker sind mit wirkungsvollerer rauscharmer Elektronik ausgestattet und können vereinfachte LCD-Anzeigen und digitale Einstellelemente enthalten. Erhältlich sind auch Modelle mit Doppelfunktion, an die sich PE- und ICP®-Beschleunigungsaufnehmer anschließen lassen. Der Hauptvorteil für Laborsysteme mit Ladungsausgang ist die Flexibilität bei der Anpassung und Steuerung des elektrostatischen Ladungsausgangs des PE-Beschleunigungsaufnehmers. Miniatur-Ladungsverstärker mit konventionellen elektronischen Bauteilen, meist ohne Umschaltmöglichkeiten, wurden in der Vergangenheit in der Luftfahrt eingesetzt. PE-Beschleunigungsaufnehmer können außerdem höhere Temperaturen als ICP®-Beschleunigungsaufnehmer mit integrierter Elektronik vertragen.

Die Haupteinschränkungen eines PE-Systems mit Ladungsausgang betreffen die Systemkomplexität, Erschwernisse beim Betrieb, die zusätzlich erforderliche Wartung hochohmiger Schaltungen in widriger Umgebung und der Störspannungsanstieg bei Verwendung langer Kabel. Hochohmige Schaltungen sind allgemein empfindlicher für elektrische Störungen.

## PIEZOELEKTRISCHE BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMER MIT INTEGRIERTER ELEKTRONIK (ICP®)

ICP®-Beschleunigungsaufnehmer enthalten einen internen mikro-

elektronischen Ladungs- oder Spannungsverstärker, der hochohmige elektrostatische Ladungen vom PE-Sensorelement in ein niederohmiges Spannungssignal umwandelt. Bei hermetisch verschweißten Konstruktionen sind alle hochohmigen Schaltungen im Beschleunigungsaufnehmer eingebettet und elektrisch geschirmt. ICP®-Beschleunigungsaufnehmer wurden erstmals in der Mitte der 60er Jahre gefertigt.

ICP®-Beschleunigungsaufnehmer werden aus einer preisgünstigen Konstantstromquelle über eine Zweidrahtleitung gespeist, wobei der Transport des Signals und des Stroms über einen Leiter erfolgt und der andere Leiter als Masseleiter dient. Das Kabel kann ein einfaches Koaxial- oder Flachkabel sein. Störspannungsarmes Kabel ist nicht erforderlich. Der Konstantstrom zur Versorgung des Beschleunigungsaufnehmers stammt aus einer separaten Stromversorgung oder wird heute meist vom Aufzeichnungs- oder Auswertesystem, z.B. in einem FFT-Analysator oder Datenerfassungsgerät, bereitgestellt. Beschleunigungsaufnehmer mit integrierter Elektronik sind unter verschiedenen Handelsnamen bekannt, wie ICP® (PCB Piezotronics), Isotron® (Endevco), Delta-Tron® (B&K) und Piezotron® (Kistler), um nur einige zu nennen. Obwohl die interne Elektronik ein Allgemeingut darstellt, sind Beschleunigungsaufnehmer mit integrierter Elektronik nicht zwangsläufig untereinander austauschbar oder miteinander kompatibel. Einige enthalten MOSFET-Schaltungen, andere IFETS. Manche verwenden mikroelektronische Hybrid-Ladungsverstärker, andere Spannungsfolger. Wenn auch die meisten Beschleunigungsaufnehmer mit integrierter Elektronik für den Betrieb mit einem Konstantstrom von 2 bis 4 mA ausgelegt sind, kommen einige mit 0,5 mA aus um eine niedrige Leistungsaufnahme zu gewährleisten; andere benötigen bis zu 20 mA um lange Kabelstrecken bei hohen Frequenzen überwinden zu können.

Es wird empfohlen die Spezifikationen des ICP®-Aufnehmers und der Stromversorgung zu überprüfen um die Kompatibilität zu verifizieren.

Der Hauptvorteil des niederohmigen Betriebes ist die störfreie Signalübertragung über normale Koaxialkabel, und das auch über große Entfernungen und unter widrigen Umgebungsbedingungen. Auch die Auflösung des Messsignals verschlechtert sich hierbei nicht. Die Kosten pro Kanal sind geringer, da keine störspannungsarmen Kabel und keine Ladungsverstärker erforderlich sind. Die Haupteinschränkungen liegen im Betrieb bei Temperaturen oberhalb von 163 °C. Mit Quarz-Sensorelementen und spezieller Elektronik ausgestattete ICP®-Beschleunigungsaufnehmer arbeiten gut bei Tiefstemperaturen.



Tabelle 1 enthält eine umfassende Liste der Vorteile und Einschränkungen von PE- und ICP®-Beschleunigungsaufnehmern. Diese Zusammenstellung ist als dynamisch anzusehen, d.h. sie ist offen für weitere

Einträge von Vorteilen und Einschränkungen. Jeder dieser Aspekte soll nun sowohl für PE- als auch für ICP®-Beschleunigungsaufnehmer genauer untersucht werden.

**Tabelle 1**

## ÜBERLEGUNGEN ZUR AUSWAHL VON PE- und ICP®-BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERN

### PE-Aufnehmer

#### Vorteile

Flexibilität bei der Einstellung der elektrischen Ausgangscharakteristik des Beschleunigungsaufnehmers

großer Dynamikbereich

Betrieb bei höheren Temperaturen (> 260 °C)

Kompatibilität zu vorhandenen Ladungssystemen

erweiterter Frequenzgang im niederfrequenten Bereich

#### Einschränkungen

Kenntnisse und Erfahrung im Umgang mit hochohmigen Schaltungen notwendig

kapazitive Einflüsse von Beschleunigungsaufnehmer und Kabel erhöhen Störspannungen und verringern die Auflösung

hochohmige Schaltungen müssen sauber und trocken gehalten werden (Aufnehmer, störspannungsarmes Kabel und Ladungsverstärker)

störspannungsarmes Spezialkabel zur Minimierung triboelektrischer Störspannungen

hochohmige Systeme sind empfindlicher für elektrische und hochfrequente Einstreuungen

Größe und Empfindlichkeit von PE-Beschleunigungsaufnehmern hängen direkt miteinander zusammen. Kompromiss bezüglich Empfindlichkeit, Größe und Massenladung erforderlich.

höhere Kosten pro Kanal als beim ICP®-Typ (wegen des erforderlichen störspannungsarmen Kabels und Ladungsverstärkers)

### ICP®-Aufnehmer

#### Vorteile

vereinfachter Betrieb; weniger Aufmerksamkeit, Kenntnisse und Erfahrung des Benutzers erforderlich

einfaches Koaxial- oder Flachkabel

große Kabellängen ohne Erhöhung der Störspannung oder Verschlechterung der Auflösung

Betrieb mit kostengünstiger Konstantstromquelle

direkter Anschluss an viele Auswertungsgeräte ohne Zusatzkomponenten

geringes Gewicht von Miniatur-Aufnehmer hilft den „Mass-Loading“-Effekt zu reduzieren

niederohmige Systeme sind unempfindlicher gegen Verschmutzung und elektrische Einstreuungen

höhere Systemzuverlässigkeit

Dynamikbereich typisch besser als 100.000 zu 1 (>100 dB)

Bereich und Auflösung sind Datenblattspezifikationen

Fehlstromüberwachung erkennt Kabelfehler (Kurzschlüsse oder Unterbrechungen)

Integration eines selbst identifizierenden TEDS-Chips und steilen Filtern möglich

Betrieb über Schleifringe möglich

geringere Kosten pro Kanal als mit PE-Aufnehmern

#### Einschränkungen

elektrische Eigenschaften, Empfindlichkeit, Bereich und Entladungszeitkonstante innerhalb des Aufnehmers fest vorgegeben

eingeschränkter Temperaturbereich (-196 °C bis +163 °C)

### VORTEILE VON PE-BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERN

#### Flexibilität

Ein Ladungsverstärker für die Laborumgebung besitzt normalerweise Einstellelemente zur Beeinflussung des Ausgangssignals vom PE-Beschleunigungsaufnehmer. Zumindest gibt es Möglichkeiten zur Normierung der Empfindlichkeit sowie zur Einstellung von Verstärkung und Endbereich sowie zur Erdung. Zusätzlich kann ein Ladungsverstärker noch Funktionen zur Filterung, Integration und Einstellung der Entladungszeitkonstanten, die den Frequenzgang im niederfrequenten Bereich bestimmt, aufweisen. Ladungsverstärker mit Doppelfunktion liefern außerdem einen Konstantstrom, wodurch die Verwendung von ICP®- und PE-Beschleunigungsaufnehmern mit Ladungsausgang möglich ist.

#### Dynamikbereich

Ein hochempfindlicher PE-Beschleunigungsaufnehmer besitzt einen großen Dynamikbereich (>100 dB). Zusammen mit einem Labor-Ladungsverstärker kann die Ausgangsspannung für Vollausschlag auf einen beliebigen g-Wert innerhalb des Maximalbereichs gesetzt werden. Der Dynamikbereich lässt sich als der Betriebsbereich definieren, in dem der Aufnehmer vom kleinsten bis zum maximalen Wert seine Spezifikationen einhält. Allerdings sind weder der Dynamikbereich noch die Auflösung für die meisten PE-Beschleunigungsaufnehmer mit ke-

ramischem Kristall-Sensorelement spezifiziert. Der Maximalbereich ist manchmal durch die maximal akzeptierbare Nichtlinearität bestimmt, die mit dem Einsatz in einem höheren Bereich in Verbindung gebracht wird. Die Nichtlinearität wird häufig als Prozent von x g, z.B. 1 % von 500 g, angegeben. Die Auflösung basiert auf dem Systemrauschen, das durch den Verstärkungsfaktor des Verstärkers und durch die kapazitive Belastung von Eingangskabel und Beschleunigungsaufnehmer auf den Eingang des Ladungsverstärkers bestimmt wird.

#### Betrieb bei hoher Temperatur

Da ein PE-Beschleunigungsaufnehmer keine interne Elektronik besitzt, wird die Betriebstemperatur allein durch das Sensorelement und das verwendete Konstruktionsmaterial begrenzt. PE-Beschleunigungsaufnehmer können im allgemeinen bei Temperaturen bis zu 260 °C eingesetzt werden. Sonderausführungen sind für Temperaturen von über 538 °C erhältlich. Zum Erreichen der höchsten Genauigkeit muss der Beschleunigungsaufnehmer bei seiner Betriebstemperatur kalibriert werden.

#### Austauschbarkeit

Praktisch jeder PE-Beschleunigungsaufnehmer ist in einem System mit Ladungsausgang austauschbar; ausgenommen sind einige Modelle mit sehr geringem Isolationswiderstand bei hohen Temperaturen. Für



den Betrieb mit niederohmigen Eingangssignalen sind spezielle Ladungsverstärker erhältlich.

#### **Erweiterter Frequenzgang im niederfrequenten Bereich**

Quarz-Kraftaufnehmer werden häufig in kraftgeregelten Shaker-Anwendungen eingesetzt. Bei Anschluss an elektrostatische Ladungsverstärker mit hoher Eingangsimpedanz ( $> 10^{12}$  Ohm) besitzen Quarz-Kraftaufnehmer Entladungszeitkonstanten in der Größenordnung von einigen Hundert oder Tausend Sekunden; sie bieten damit einen hervorragenden Frequenzgang im niederfrequenten Bereich und machen eine statische Kalibrierung möglich.

#### **EINSCHRÄNKUNGEN BEI PE-BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERN** **Fachkenntnisse**

Zum Verstehen, Betreiben und Warten von Systemen mit Ladungsausgang sind Fachkenntnisse und Erfahrung notwendig. Erforderlich sind Grundkenntnisse über hochohmige Schaltungen, störspannungsarme Kabel, Aufnehmerempfindlichkeit [pC/g], kapazitive Lasteinflüsse, Systemrauschen sowie zum Umgang mit Ladungsverstärkern und zum Sauber- und Trockenhalten des Systems. Neuere Ladungsverstärker besitzen digitale Einstellmöglichkeiten, hierdurch wird die Eingabe von Empfindlichkeit und Bereich vereinfacht.

#### **Auflösung**

Obwohl die Auflösung von PE-Beschleunigungsaufnehmern als unendlich angesehen werden kann, ist sie im allgemeinen auf dem Datenblatt nicht angegeben, da sie vom Systemrauschen bestimmt wird. Solange Kapazitätswerte für den Aufnehmer und das Eingangskabel sowie der am Verstärker eingestellte Verstärkungsfaktor nicht angegeben sind, bleibt die Auflösung unbekannt. Dadurch können Unsicherheiten bei der Messung niedriger Pegel über lange Kabel auftreten. Obwohl längere Kabelstrecken die Empfindlichkeit nicht beeinflussen, sind Auswirkungen auf das Systemrauschen und die Auflösung vorhanden. Die beschränkten Möglichkeiten für den Einsatz langer Kabel bedeuten eine der Haupteinschränkungen für PE-Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsausgang. Neue, modernere Ladungsverstärker mit rauscharmer Schaltung verringern das Problem. Triboelektrische Störspannungen aufgrund von Bewegungen des Eingangskabels können die Auflösung ebenfalls verschlechtern.

#### **Betriebsumgebung**

Hochohmige PE-Beschleunigungsaufnehmer und Ladungsverstärker sind am besten für den Einsatz unter sauberen Laborbedingungen geeignet. Sie arbeiten in widrigen Umgebungen wie Fabriken, Schiffsbau oder unter Wasser nicht gut. Alle hochohmigen Komponenten wie Beschleunigungsaufnehmer, störspannungsarmes Kabel und Ladungsverstärker müssen sauber und trocken gehalten werden. Eine Verschmutzung der hochohmigen Schaltungen verursacht Verschlechterungen des elektrischen Widerstandes, Beeinträchtigungen des Frequenzganges im niederfrequenten Bereich und Nullpunktverschiebungen.

#### **Kabel und Anschlüsse**

PE-Beschleunigungsaufnehmer verlangen störspannungsarme Koaxialkabel mit hohem Isolationswiderstand. Bei störspannungsarmem Kabel ist die dielektrische Schicht in ein Graphit-Schmiermittel eingebettet, um die Reibung und damit die Erzeugung triboelektrischer, statischer Elektrizität zu minimieren. Die durch die Bewegung des Kabels erzeugte elektrostatische Ladung ist die gleiche wie die vom Piezo-Element erzeugte Ladung. Der Ladungsverstärker kann nicht zwischen den beiden unterscheiden. Bei den Kabelanschlüssen handelt es sich meist um den Typ Microdot® 10-32 koaxial. Die Auswahl an Kabeln und Anschlüssen ist begrenzt.

#### **Größe und Empfindlichkeit**

Größe, Empfindlichkeit und Frequenzgang von PE-Beschleunigungsaufnehmern sind direkt miteinander verknüpft. Je größer der

Beschleunigungsaufnehmer ist, desto höher ist die Empfindlichkeit, aber umso schlechter ist der Frequenzgang und umgekehrt. Wenn eine Messung einen Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer für geringe Massenladung verlangt, ist möglicherweise ein Kompromiss durch die Auswahl eines größeren Beschleunigungsaufnehmers, der eine angemessene Empfindlichkeit bietet, notwendig

#### **Kosten**

Die Kosten eines PE-Beschleunigungsaufnehmers sind im wesentlichen die gleichen wie für einen vergleichbaren ICP®-Typ. Da PE-Aufnehmer jedoch störspannungsarme Kabel und Ladungsverstärker benötigen, liegen die Kosten pro Kanal höher als bei einem ICP®-Aufnehmer mit Spannungsausgang. Die Kabel und Ladungsverstärker bilden den Hauptkostenfaktor bei mehrkanaligen Messsystemen.

#### **VORTEILE VON ICP®-BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERN**

##### **Einfacher Betrieb**

ICP®-Beschleunigungsaufnehmer-Systeme bieten einen einfacheren Betrieb; vom Benutzer werden weniger Kenntnisse, Erfahrung und Aufmerksamkeit gefordert. ICP®-Aufnehmer liefern ein nicht einstellbares niederohmiges Ausgangssignal [mV/g], das unabhängig von Kabeltyp und -länge und den betrieblichen Umgebungsbedingungen ist.

##### **Auflösung**

Die Auflösung von ICP®-Beschleunigungsaufnehmern ist unabhängig von Kabeltyp oder -länge. Die Auflösung ist ein Standardwert in den Spezifikationen. Lange Kabel können ohne Verschlechterung der Störspannung, der Auflösung oder der Signaldämpfung eingesetzt werden. Messleitungen mit einer Länge von 100 Metern und mehr können als Tiefpass bei ultrahohen Frequenzen wirken. Diese Eigenschaft ist jedoch normalerweise nur bei ICP®-Druckaufnehmern für die Messung von Schocks und Druckwellen im Mikro-Sekundenbereich von Bedeutung.

##### **Betriebsumgebung**

Hermetisch dichte ICP®-Beschleunigungsaufnehmer sind gut für den Einsatz unter widrigen Umgebungsbedingungen geeignet. Sie sind widerstandsfähig gegen Verschmutzung, da alle hochohmigen Schaltungen sicher im hermetisch dichten Beschleunigungsaufnehmer untergebracht sind. Dicht verschweißte Konstruktionen sind gegen Verschmutzung grundsätzlich unempfindlicher als mit Epoxid abgedichtete Gehäuse. Die Einsatzfähigkeit auch bei widrigen Umgebungsbedingungen macht ICP®-Beschleunigungsaufnehmer zur ersten Wahl für Zustandsüberwachungen an Maschinen in der Industrie, unter Wasser, auf Schiffen, an Fahrzeugen und im Gelände.

##### **Kabel und Verbindungen**

Der niederohmige Ausgang von ICP®-Beschleunigungsaufnehmern erlaubt die völlige Freiheit bei der Wahl des Kabeltyps und der Anschlüsse. Die richtige Wahl der Kabel und Anschlüsse kann bei bestimmten Anwendungen unter hohen oder tiefen Temperaturen, Drücken, im Vakuum und bei korrodierenden Flüssigkeiten wichtig sein. Miniatur-ICP®-Beschleunigungsaufnehmer besitzen häufig Lötanschlüsse, die den Einsatz leichter, flexibler Kabel zur Minimierung von Biege- und „Mass Loading“-Effekten erlauben. Industrie-Beschleunigungsaufnehmer verwenden große, kräftige Anschlüsse und/oder vulkanisierte Verbindungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit unter rauen Bedingungen. Die Verwendung von Standardkabeln und -anschlüssen in ausgedehnten Mehrkanalsystemen begünstigt ein wirkungsvolles Kabelmanagement und ist ein deutlicher Faktor für Kosteneinsparungen.

##### **Größe und Empfindlichkeit**

Durch Integration eines Verstärkers in Miniatur-ICP®-Beschleunigungsaufnehmern lassen sich Anwendungen realisieren, die Aufnehmer mit geringer Masse, hoher Empfindlichkeit und weitem Frequenzgang verlangen. Ein interner Verstärker verbessert auch die Auflösung keramischer ICP®-Beschleunigungsaufnehmer, die einen Hybrid-Ladungsverstärker verwenden. Einige ICP®-Beschleunigungsaufnehmer



enthalten Spannungsverstärker; obwohl dadurch der Signalpegel für Aufzeichnungsgeräte und lange Kabel erhöht wird, gilt das auch für die Störspannungen.

### Dynamikbereich

ICP®-Beschleunigungsaufnehmer besitzen einen sehr hohen Dynamikbereich. Die Angabe „begrenzter und nicht einstellbarer Dynamikbereich“ wird manchmal als eine Einschränkung für ICP®-Beschleunigungsaufnehmer betrachtet. Die meisten ICP®-Beschleunigungsaufnehmer besitzen einen Dynamikbereich von größer als 100.000 zu 1 (>100 dB). Manche seismischen Modelle mit besonders rauscharmer Elektronik haben einen Bereich von größer als 500.000 zu 1. Sowohl der Dynamikbereich als auch die Auflösung sind bekannte Datenblattspezifikationen. Noch bedeutender ist die Tatsache, dass ein ICP®-System seinen Dynamikbereich trotz zusätzlicher Kabellängen und Änderungen der Systemkonfiguration nicht verschlechtert.

### Stromversorgung für ICP®-Beschleunigungsaufnehmer

Je nach Modell werden ICP®-Beschleunigungsaufnehmer mit Konstantstrom von 0,5 mA bis 20 mA bei einer Spannung von 3 bis 30 VDC betrieben. Für einen erweiterten Dynamikbereich sind Sondermodelle für Betriebsspannungen bis zu 35 VDC erhältlich. Wie schon warnend erwähnt, enthalten nicht alle ICP®-Beschleunigungsaufnehmer die gleiche Elektronik und sind somit nicht unbedingt zu jeder Konstantstromquelle kompatibel. Der Leckstrom des Sensorelementes und die Versorgungsspannung beeinflussen beide den Dynamikbereich. Der zur Verfügung stehende Versorgungsstrom beeinflusst die Signalübertragung bei großen Kabellängen, und dies vor allem bei hohen Frequenzen. ICP®-Versorgungen sind heutzutage für Batterie- oder Netzbetrieb, mit oder ohne Verstärkung erhältlich und können manuell oder per PC eingestellt werden. Stromversorgungen für ICP®-Sensorelemente liefern im allgemeinen einen Strom von 2 bis 4 mA. Sie sind jedoch meistens auch auf 20 mA einstellbar, wenn lange Kabel und hohe Frequenzen eine Rolle spielen. Viele handelsüblichen Auswertungsgeräte wie FFT-Analysatoren und Erfassungsgeräte für Schwingungen besitzen eine Konstantstromquelle für einen direkten Anschluss von ICP®-Beschleunigungsaufnehmern. Ladungsverstärker mit Doppelfunktion enthalten Konstantstromquellen zum Betreiben von PE- und ICP®-Beschleunigungsaufnehmern.

### Kabelüberwachung

Bei Zweileitersystemen für ICP®-Sensorelemente werden Nutzsignal und Stromversorgung über den einen Leiter geführt und der Rückfluss (Masse) erfolgt über den anderen. Durch Überwachung des charakteristischen DC-Leckstromes, der auf der Leitung vorhanden ist, lässt sich ein Kurzschluss oder ein Bruch des Kabels erkennen. Die Stromversorgungen für ICP®-Sensorelemente enthalten häufig Anzeigen mit roten, grünen und gelben Feldern oder LEDs zur Angabe von Normalbetrieb oder Kabelfehlern.

### Betrieb über Schleifringe

Bei bestimmten Schwingungsmessungen an rotierenden Maschinen müssen Schleifringe eingesetzt werden. Die übliche niederohmige Ausgangsspannung von ICP®-Beschleunigungsaufnehmern ist für einen Betrieb mit Schleifringen geeignet.

### Elektronisches Datenblatt des Aufnehmers (TEDS)

Die Integration eines TEDS-Speichers in den ICP®-Beschleunigungsaufnehmer erlaubt die Speicherung von Information zur Selbstidentifikation wie Hersteller, Sensortyp, Modell, Seriennummer, Empfindlichkeit, Kalibrierdatum, Kanalkennung, Einsatzort und mehr. TEDS-Beschleunigungsaufnehmer arbeiten in einem gemischten Analog- oder Digital-Modus. Der TEDS-Zugang erfolgt über dieselbe Leitung, die normalerweise für die Analogmessung benutzt wird. Nach Zugriff auf die Speicherdaten kann der Digitalspeicher ausgeschaltet

werden und der Beschleunigungsaufnehmer ist für den normalen Analogbetrieb bereit.

### Kosten

Obwohl die meisten ICP®- und PE-Beschleunigungsaufnehmer ungefähr den gleichen Preis haben, sind die Kosten eines ICP®-Systems deutlich geringer, da keine besonderen störspannungsarmen Kabel und Ladungsverstärker notwendig sind. Die Kosteneinsparungen können enorm sein, wenn mehrkanalige Systeme verglichen werden. Aus Sicht des Benutzers sind weniger Pflege, Sorgfalt und Aufwand für Betrieb und Wartung niederohmiger Systeme erforderlich.

### EINSCHRÄNKUNGEN BEI ICP® BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERN Nicht veränderbare Ausgangscharakteristik

Elektrische Eigenschaften wie Empfindlichkeit, Bereich, Auflösung und Endladungszeitkonstante sind bei ICP®-Beschleunigungsaufnehmern fest eingestellt. Eine nicht einstellbare Entladungszeitkonstante ist bei Beschleunigungsaufnehmern weniger eine Einschränkung als bei Quarz-Druck- und Kraftaufnehmern, die im Langzeit-Konstantmodus für quasistatische Kalibrierzwecke betrieben werden können.

### Temperaturbereich

Die meisten universell einsetzbaren ICP®-Beschleunigungsaufnehmer haben einen begrenzten Temperaturbereich von etwa -54 °C bis +121 °C. Besondere Modelle arbeiten bis zu -195 °C im Minusbereich und bis zu +163 °C im positiven Bereich.

### FAZIT

Systeme mit Ladungsverstärkern profitieren von dem sehr großen Dynamikbereich von PE-Beschleunigungsaufnehmern, indem sie Flexibilität bei der Anpassung der elektrischen Ausgangseigenschaften wie Empfindlichkeit und Bereich bieten. Sie sind für den Betrieb bei hohen Temperaturen gut geeignet. Moderne Ladungssysteme besitzen verbesserte Störspannungseigenschaften, vereinfachte digitale Einstellmöglichkeiten und zwei Betriebsarten, so dass der Anschluss von Ladungsaufnehmern und oder ICP®-Aufnehmern möglich ist. Hochohmige Schaltungen sind für den Einsatz in der Produktion oder im Gelände weniger gut geeignet. Die Auflösung von PE-Beschleunigungsaufnehmern braucht nicht spezifiziert oder bekannt zu sein, da Störspannungen systemabhängig sind, d.h. von der Kabellänge und Verstärkung bestimmt werden. ICP®-Beschleunigungsaufnehmer operieren aus einer Konstantstromquelle und liefern eine hohe Signalspannung [mV/g] mit niedriger Impedanz. Sie arbeiten mit langen, normalen Koaxialkabeln in widriger Umgebung ohne Verschlechterung der Signalqualität. Sie haben einen eingeschränkten Bereich für hohe Temperaturen. ICP®-Aufnehmer sind einfach einzusetzen. Auflösung und Betriebsbereich sind spezifizierte Größen. Die Kosten pro Kanal sind im Vergleich zu PE-Systemen geringer, da kein störspannungsarmes Kabel und keine Ladungsverstärker erforderlich sind.

### BIBLIOGRAPHY

„General Guide to ICP® Instrumentation,” PCB Technical Bulletin G-0001 Lally, R.W., „Application of Integrated-Circuits to Piezoelectric Transducers,” ISA Conference & Exhibit 1967, Preprint Number P4-2-PHYMMID-67  
Goldman, Steve, „Vibration Spectrum Analysis,” 2nd Ed, Industrial Press, 1999  
Lally, J.F., „Accelerometer Cable, Wiring, and Connections,” PCB Recommended Practices, RP-59  
Wilson, Jon, „Dynamic & Environment Effects on Performance,” SENSORS, Mar. 1999

Hochwertige Messtechnik und Beratung aus einer Hand

 **PCB SYNOTECH** GmbH

PCB Synotech GmbH  
Porschestr. 20 – 30 ▪ 41836 Hückelhoven  
Tel.: +49 (0) 24 33/44 44 40 – 0  
E-Mail: info@synotech.de ▪ www.synotech.de