



Piezelektrische Aufnehmer mit eingebauter Mikroelektronik nach dem ICP®-Konzept

Die schnell voranschreitende Entwicklung und Miniaturisierung in der Halbleitertechnologie beeinflussen heutzutage die Entwicklung in den verschiedensten Bereichen der Technik. Doch bereits vor nahezu 40 Jahren wurden die ersten piezelektrischen Vibrationsensoren mit integrierter Elektronik entwickelt und unter der Bezeichnung ICP®-Sensoren (ICP = Integrated Circuit Piezoelectric) angeboten. Damals noch vom Mitbewerb belächelt, hat sich dieses Verfahren durchgesetzt. Heute stellen fast alle Anbieter von Schwingungsmessgeräten, FFT-Analysatoren oder Messwerterfassungssystemen ihre Geräte mit der entsprechenden Stromversorgung aus. Somit können Signale aus ICP®-Aufnehmern ohne jegliche Zusatzgeräte von diesen Systemen erfasst werden. Nachfolgend sollen die Grundlagen des ICP®-Konzeptes (ICP: eingetragenes Warenzeichen der Firma PCB Piezotronics) vorgestellt und weiterhin aufgezeigt werden, wie durch konsequente Anwendung neuester Technologie piezelektrische Messverfahren vereinfacht und problemloser gestaltet werden können.

Konventionelle piezelektrische Aufnehmer

Um den großen Fortschritt in der piezelektrischen Messtechnik zu erkennen, ist es sinnvoll, in wenigen Worten die Grenzen oder Fehlerquellen bei konventionellen piezelektrischen Aufnehmern aufzuzeigen. Die konventionellen piezelektrischen Aufnehmer, d. h. piezokeramische Aufnehmer und Aufnehmer aus natürlichen bzw. synthetischen Kristallen ohne eingebaute Elektronik können in zwei Arten betrieben werden; dem Spannungsbetrieb und dem Ladungsbetrieb.

Spannungsbetrieb

Einige keramische Aufnehmer haben eine sehr große interne Kapazität, und die gespeicherte Ladung kann direkt durch hochohmige Anzeigeräte (z. B. Oszillografen) ausgewertet werden.

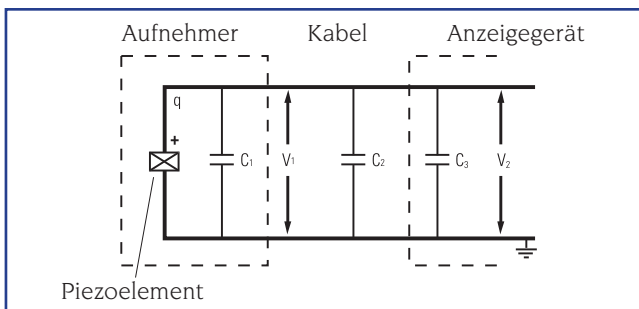


Bild 1: Konventionelles piezelektrisches Messsystem, bestehend aus dem Aufnehmer, Kabel, Anzeigerät oder Verstärker.

Andere Aufnehmer mit einer geringeren internen Kapazität erfordern hingegen Spannungsverstärker.

Die Empfindlichkeit des Aufnehmers bei offenem Ausgang ist:

$$U1 = \frac{q}{C1} \frac{V}{\text{bar, N, g}}$$

Hierbei sind:

q = Grundempfindlichkeit

C1 = interne Kapazität des Aufnehmers in pF

Die Gesamtempfindlichkeit des in Bild 1 dargestellten Systems wird jedoch reduziert auf

$$U2 = \frac{q}{C1 + C2 + C3} \frac{V}{\text{bar, N, g}}$$

q und C1 wie oben definiert

C2 = Kabelkapazität

C3 = Eingangskapazität des Anzeigegerätes

Die Abhängigkeit der Gesamtempfindlichkeit des Messsystems von der wirksamen Kapazität parallel zum Quarz bewirkt eine starke Beschränkung der Kabellänge.

Dies erklärt, warum die Spannungsempfindlichkeit eines Aufnehmers mit hochohmigen Ausgang bei einer bestimmten Kabelkapazität angegeben wird. Wird diese Kapazität verändert, z. B. durch Veränderung der Länge oder der Art des Kabels, muss das System neu kalibriert werden.

Die sehr hohe Impedanz des Quarzes verlangt die Verwendung von „Low-Noise“-Kabel und schließt den Einsatz in feuchter und schmutziger Umgebung weitgehend aus.

Ladungsbetrieb

Das Problem der kapazitiven Abschwächung wird durch Verwendung eines Ladungsverstärkers gelöst, da hier die Ausgangsspannung nur vom Verhältnis der Eingangskapazität zur Rückkopplungskapazität abhängt (siehe Bild 2). Jedoch auch bei Einsatz eines Ladungsverstärkers treten ernste Einschränkungen auf, besonders wenn lange Strecken zwischen Aufnehmer und Verstärker zu überbrücken sind, wie z. B. bei Messaufgaben im Freien.

Das elektrische Rauschen am Ausgang des Ladungsverstärkers ist abhängig vom Verhältnis der Gesamteingangskapazität (C1+C2+C3) zur Rückführungskapazität.

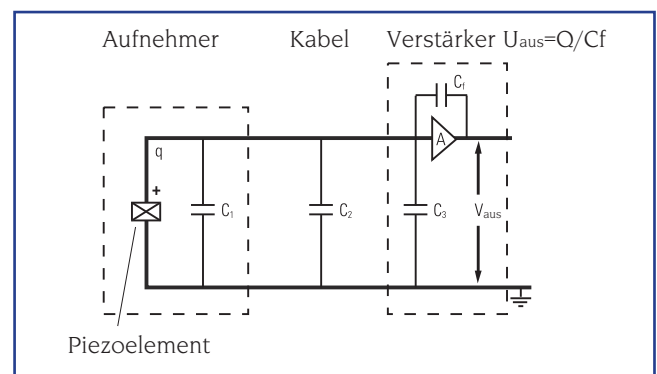


Bild 2: Ladungsbetrieb

Aus diesem Grunde ist auch hier die Kabellänge wie im Spannungsbetrieb begrenzt. Auch hier ist die Verwendung von teurem „Low-Noise“-Kabel erforderlich, da es sich um ein hochohmiges System handelt. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass der Isolationswiderstand am Eingang des Ladungsverstärkers nicht durch äußere Einflüsse (z. B. Feuchte) reduziert wird, da hierdurch Driftprobleme entstehen könnten.

Diese Gründe gestatten es in vielen Fällen nicht, piezelektrische Aufnehmer mit Ladungsausgang für Messungen unter schlechten äußeren Umgebungsbedingungen einzusetzen, es sei denn, man verwendet teure feuchteunempfindliche Kabel- und Steckverbindungen.



Das ICP®-Konzept

Das ICP®-Konzept basiert auf der Kombination des piezoelektrischen Elementes mit einem miniaturisierten Spannungsfolger (Impedanzkonverter) in einem gemeinsamen Gehäuse, das nicht größer ist als bei Aufnehmern ohne Verstärker.

Durch diese Kombination entsteht ein einfach einzusetzendes System mit folgenden Besonderheiten:

- feste Empfindlichkeit, unabhängig von der Kabellänge und Kapazität
- niederohmiger Ausgang (100 Ω), der den Einsatz auch in feuchten und schmutzigen Umgebungen erlaubt
- ein 2. Leitersystem, bei dem normales koaxiales Kabel oder sogar normale zweiadrige Leitung verwendet wird
- hohe Ausgangsspannung (± 5V, ± 10V)
- geringeres Ausgangsrauschen
- erweiterter Frequenzbereich
- einfacher Selbsttest der Messkette
- geringe Kosten pro Kanal
- einfach zu versorgen (Netz, Akku)
- reduzierter Kalibrieraufwand
- Anschluss aller Auswertegeräte (DVM, Schreiber, Oszillografen) möglich

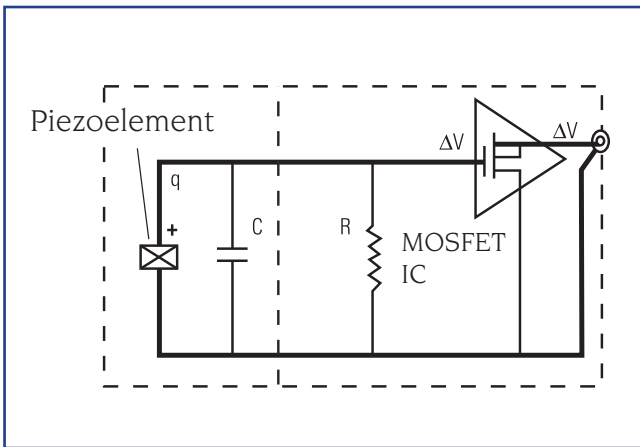


Bild 3: Aufbau eines ICP®-Aufnehmers

Bild 3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines ICP®-Aufnehmers, der aus dem piezoelektrischen Element und dem Verstärker, einem MOSFET Spannungsfolger besteht.

Eine Änderung der Messgröße generiert im Piezoelement die Ladungsänderung Q. Diese Ladungsänderung ruft eine Änderung der Spannung U von:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C}$$

Diese Spannungsänderung erscheint unverzögert an der Source des MOSFET's, die im Ruhezustand ein Spannungspotential von +8...+11V aufweist.

Die Quellimpedanz am Sourceanschluss ist kleiner als 100 Ω.

Der ICP®-Verstärker in Bild 3 ist ein nicht invertierender Gleichspannungsverstärker mit einer Bandbreite von mehr als 1 MHz bei einer Aussteuerung von ±5V. Der Frequenzgang eines bestimmten Aufnehmers wird jedoch durch andere Werte begrenzt, die später noch genauer beschrieben werden.

Speisung von ICP®-Aufnehmern

Ein typisches ICP®-System, bestehend aus Aufnehmer, Kabel und Versorgungseinheit ist in Bild 4 dargestellt. Der einfache Aufbau dieses Zweileitersystems ist direkt erkennbar.

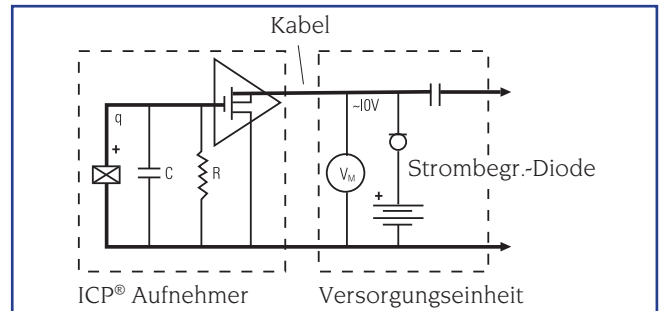


Bild 4: Typ. Aufbau eines ICP®-Aufnehmers

Die Versorgungseinheit besteht aus einer Gleichspannungsquelle (18-24V), einer Konstantstromdiode und einer Signalkopplung. Das Messinstrument V zeigt die Ruhespannung (typ. 9...12V) am Ausgang des Aufnehmers an. Es kann weiterhin zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Aufnehmers und der Messleitung verwendet werden.

Die stromregelnde Diode wurde aus verschiedenen Gründen einem Widerstand vorgezogen.

Der sehr hohe dynamische Widerstand der Diode ermöglicht dem Spannungsfolger eine Verstärkung von exakt 1, unabhängig von der Eingangsspannung. Außerdem kann die Diode größere Ströme zum Treiben langer Leitungen liefern.

Der Aussteuerbereich

Der normale Bereich der Versorgungsspannung für ICP®-Aufnehmer und Verstärker beträgt 18...24V.

Bild 5 zeigt die Übertragungscharakteristik eines ICP®-Verstärkers. Nimmt man ca. 1V Spannungsabfall für die Konstantstromdiode an, so erlaubt eine Versorgungsspannung von 18V einen positiven dynamischen Aussteuerbereich von

$$18V - (1 + 11V) = 6V$$

Soll die Ausgangsspannung bedingt durch eine entsprechend hohe Belastung des Aufnehmers über diesen Wert steigen, so ist dies nicht möglich, d. h. die Aussteuerung wird nicht mehr symmetrisch.

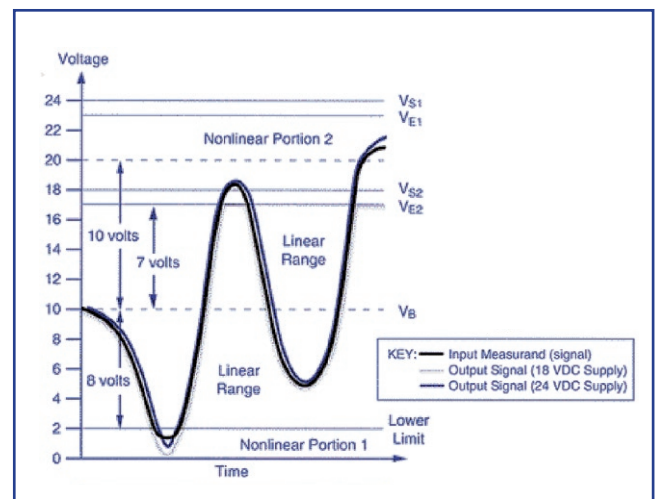


Bild 5: Übertragungs-Charakteristik eines ICP®-Aufnehmers



Eine Versorgungsspannung von 24V erweitert den positiven Aussteuerbereich, bei gleicher Ruhespannung von +11V, auf über 10V. In beiden Fällen beträgt der Bereich der negativen Aussteuerung ungefähr 10V.

Niederfrequenzverhalten

In ICP[®]-Systemen gibt es 2 Faktoren, die das NF-Verhalten beeinflussen. Dies sind

- die Entladezeitkonstante des Aufnehmers (konstanter Wert für jeden Aufnehmer, siehe techn. Spezifikationen)
- die Zeitkonstante des Entkopplungsnetzwerkes, das die AC-Nutzkomponente von der Ruhespannung trennt

Wird kein Entkopplungsnetzwerk benutzt, so entfällt Punkt b.

Für den Einsatz von ICP[®]-Systemen ist es wichtig, beide obengenannten Faktoren zu berücksichtigen.

Entladezeitkonstante des Aufnehmers

Dies ist die wichtigste Größe für die Beeinflussung des Niederfrequenzverhaltens, da sie für jeden Aufnehmer vorgegeben ist und vom Anwender nicht beeinflusst werden kann.

Werden auch die physikalischen Eigenschaften des Sensorelementes nach Messgröße (Kraft, Druck, Beschleunigung) und Messbereich variieren, so gilt für alle Arten die hier aufgeführte Betrachtung:

Wird das Quarzelement zum Zeitpunkt $t = t_0$ mit einer Sprungfunktion beaufschlagt (z. B. plötzliche Druckänderung), so wird zu diesem Zeitpunkt eine proportionale Ladungsänderung Q generiert. Diese Ladung wird im Kondensator C gesammelt und entsprechend der Formel

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C}$$

Q = generierte Ladung

C = gesamt wirksame Kapazität, aus Kondensator, Eingangskapazität des FET, Streukapazität

eine Spannung erzeugt. Da der Spannungsfolger einen Verstärkungsfaktor von nahezu 1 hat, wird dieselbe Spannung zum Ruhepegel am Source des FET hinzuaddiert. Der Kondensator C wird sich direkt nach dem Erscheinen der Ladungsänderung durch den Widerstand R entladen.

Dieser Entladevorgang vollzieht sich gemäß der folgenden Gleichung:

$$q = Q * e^{-(t/RC)}$$

Q = Anfangsladung

R = Widerstand von R in Ω

C = Gesamtkapazität

t = Zeit nach t_0 in sec

Der Verlauf dieser Entladung ist in Bild 6 dargestellt. Die Ausgangsspannung folgt diesem Entladevorgang, bis sie wieder den Ruhepegel von +11V erreicht.

Das Produkt von R und C ergibt die Entladezeitkonstante des Aufnehmers. Sie wird im Prüfprotokoll eines jeden Aufnehmers angegeben. Die mögliche Zeitkonstante von ICP[®]-Aufnehmer reicht von weniger als 1 Sekunde bis hin zu 2000 Sekunden.

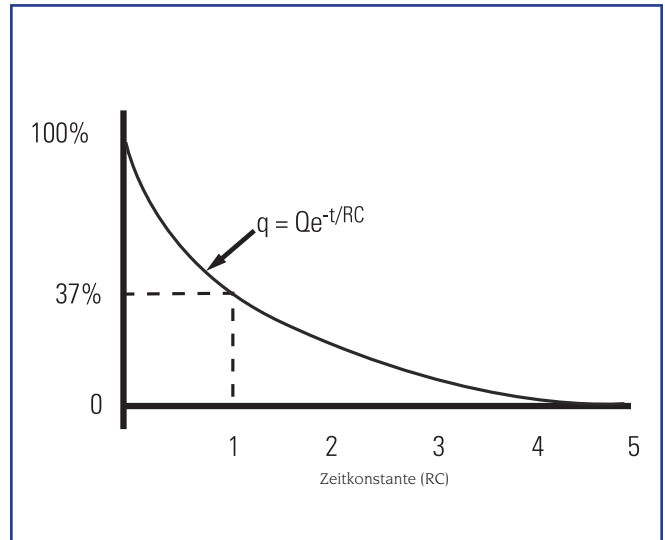


Bild 6: Entladevorgang

Der Wert des Kondensators C und die Grundempfindlichkeit des Sensorelementes bestimmen die Empfindlichkeit des Aufnehmers. Die höchstmögliche Empfindlichkeit wird erreicht mit dem kleinsten Kondensator (bzw. ohne). Um die Empfindlichkeit des Aufnehmers zwecks Erzielung eines größeren Messbereiches zu verringern, wird der Kondensator durch Parallelschaltung auf den erforderlichen Wert vergrößert.

Der Widerstand R in Bild 3 hat zwei Funktionen:

- er zieht das Gate des FET auf Drainpotential und legt so den richtigen Arbeitspunkt fest
- er dient zur Ableitung von unerwünschten (normalerweise langsamen) Ladungsänderungen, die durch thermische Effekte an den Metallverbindungen entstehen. Diese Ladungen können, falls sie nicht abgeleitet werden, zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes führen und den Aufnehmer sogar bis zum Sättigungsbereich aussteuern

Einfluss der Entladezeitkonstante auf das Niederfrequenzverhalten

Die Entladezeitkonstante eines ICP[®]-Aufnehmers beeinflusst das Niederfrequenzverhalten wie ein RC-Hochpassfilter 1. Ordnung (Bild 7a). Bild 7b zeigt die entsprechende Übertragungsfunktion (Bodediagramm).

Die Grenzfrequenz (-3dB) wird durch folgende Gleichung bestimmt:

$$f_0 = \frac{0,16}{RC} \text{ (Hz)}$$

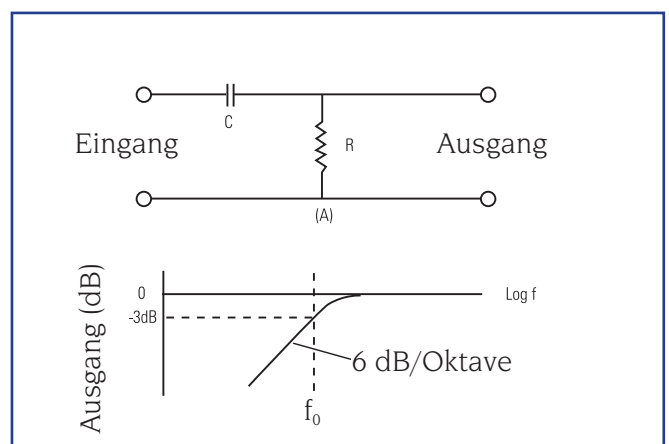


Bild 7a und 7b



Die folgende Tabelle vereinfacht die Bestimmung des Niederfrequenzverhaltens für verschiedene Zeitkonstanten.

Zeitkonstante RC (sec)	Frequenz (Hz) bei % Dämpfung			
	-1%	-5%	-10%	-30% (-3dB)
0,1	10,60	5	3,40	1,60
1	1,00	0,50	0,34	0,16
5	0,20	0,10	0,07	0,03
10	0,11	0,05	0,03	0,016
100	0,01	0,005	0,003	0,0016

Bild 8: Niederfrequenzverhalten von ICP®-Aufnehmern

Einfluss der Entladezeitkonstante auf das Rechteck-Übertragungsverhalten

Oft ist es erforderlich Sprungfunktionen, deren Dauer nur einige Prozent der Entladezeitkonstante des Aufnehmers betragen, zu erfassen. Dies wird vor allem bei der statischen Eichung von Druck- und Kraftaufnehmern verlangt. Hierbei gilt es, folgendes zu beachten:

Die Verringerung der Ausgangsspannung und die vergangene Zeit (in % der Zeitkonstante) haben bis ca. 10% der Zeitkonstante ein Verhältnis von ungefähr 1:1.

Bild 9 zeigt die Antwort des Aufnehmers auf eine sprunghafte Änderung der Eingangsgröße (Druck, Kraft, Beschleunigung).

Die Ausgangsspannung wurde hier direkt am Sourceanschluss des Aufnehmers gemessen.

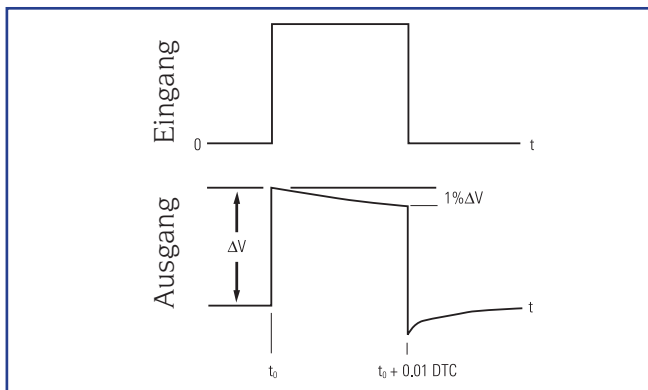


Bild 9: Sprungantwort des ICP®-Aufnehmers

Zum Zeitpunkt $t = t_0$ wird der Aufnehmer für die Dauer von 1% der Entladezeitkonstante mit dem Meßwert M_1 belastet.

Die erzeugte Spannungsänderung ΔU , die zur Ruhespannung addiert am Sourceanschluss erscheint, beginnt sich bereits zum Zeitpunkt $t = t_0$ zu verringern. Nach Ablauf von 1% der Entladezeitkonstante ist die Ausgangsspannung um 1% von ΔU gesunken. Dieses Verhältnis bleibt linear bis ca. 10% der Entladezeitkonstante, d. h., wird der Aufnehmer erst nach $0,1\tau$ entlastet, so ist die Ausgangsspannung bereits auf ca. $0,9\Delta U$ entladen. Wie bei allen Entladevorgängen, die nach einer e-Funktion verlaufen, ist die Entladung nach 5τ praktisch abgeschlossen, d. h. der Ruhepegel von +11V erreicht.

Nach der Entlastung des Aufnehmers wird das Ausgangssignal um den gleichen Betrag der Entladung unter das Ruhepotential von +11V absinken und sich anschließend wieder mit der gleichen Zeitkonstante auf +11V aufladen.

Die Grenzen einer statischen Kalibrierung des piezoelektrischen Aufnehmers werden hier deutlich.

Einfluss der Entkopplungswerke auf das Niederfrequenzverhalten

Wie bereits vorher erwähnt, wird bei einer Gleichspannungskopplung des Ausgangssignals das Niederfrequenzverhalten des Messkreises nur durch die Entladezeitkonstante des Aufnehmers bestimmt.

Wird jedoch das Signal des Aufnehmers kapazitiv ausgekoppelt, kann u. U. die Zeitkonstante des Entkopplungsnetzwerkes der begrenzende Faktor im Niederfrequenzverhalten des Messaufbaus sein.

Bild 10 zeigt die kapazitive Auskopplung des Messsignals durch einen $10\mu F$ Kondensators. Die Zeitkonstante (Produkt von R_1 und C) sollte bedeutend größer sein als die Zeitkonstante des Aufnehmers. Ein Wert von 10M für R_1 ergibt eine Entkopplungszeitkonstante von 100 sec.

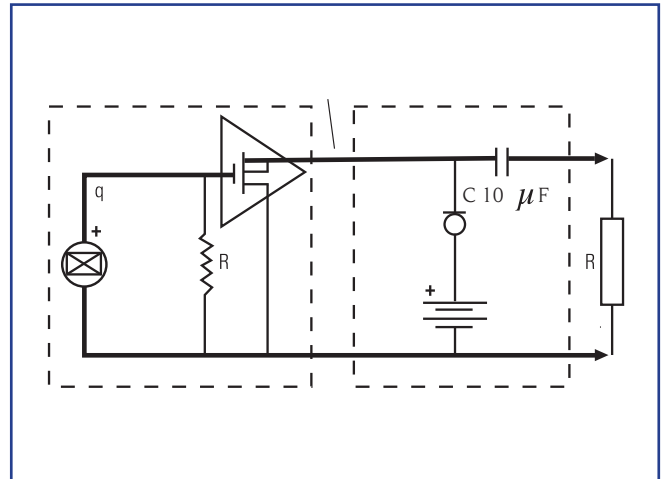


Bild 10: Kapazitive Auskopplung des Messsignals

Zusammenfassung

Die ICP®-Technik ermöglichte durch ihren einfachen Aufbau, durch die problemlose Anwendung und die Robustheit des Messsignals neue Wege beim Einsatz von piezoelektrischen Aufnehmern vor allem unter industriellen Einsatzbedingungen.

Durch die Beseitigung entscheidender Nachteile konventioneller Aufnehmer mit Ladungsausgang können ICP®-Aufnehmer auch in solchen Anwendungsgebieten problemlos eingesetzt werden, in denen bisher der Einsatz piezoelektrischer Aufnehmer zu aufwendig und unsicher war.

Nachteile konventioneller Aufnehmer mit Ladungsausgang:

- Kalibrierung der Messstrecke
- begrenzte Kabellänge
- Drifterscheinungen
- Einsatz in feuchten Umgebungen nur sehr schwer möglich

Hinzu kommt weiterhin, dass der Preis pro Messkanal d. h. Aufnehmer, Messleitung und Versorgungseinheit bei der ICP®-Technik im Vergleich zu Aufnehmer, Messleitung und Ladungsverstärker bei der konventionellen Technik bedeutend niedriger liegt. Einen weiteren Schub erhielt die ICP®-Technik durch die Einführung der TEDS-Technologie (Transducer Electronic Data Sheet). Solche Sensoren enthalten einen Speicherchip, in dem seine wesentlichen Charakteristiken in einer gemäß IEEE 1451.4 definierten Form gespeichert sind. Das Auslesen dieser Daten durch das Messsystem kann über die normale 2-adrige Messleitung erfolgen.

Hochwertige Messtechnik und Beratung aus einer Hand

PCB SYNOTECH GmbH

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