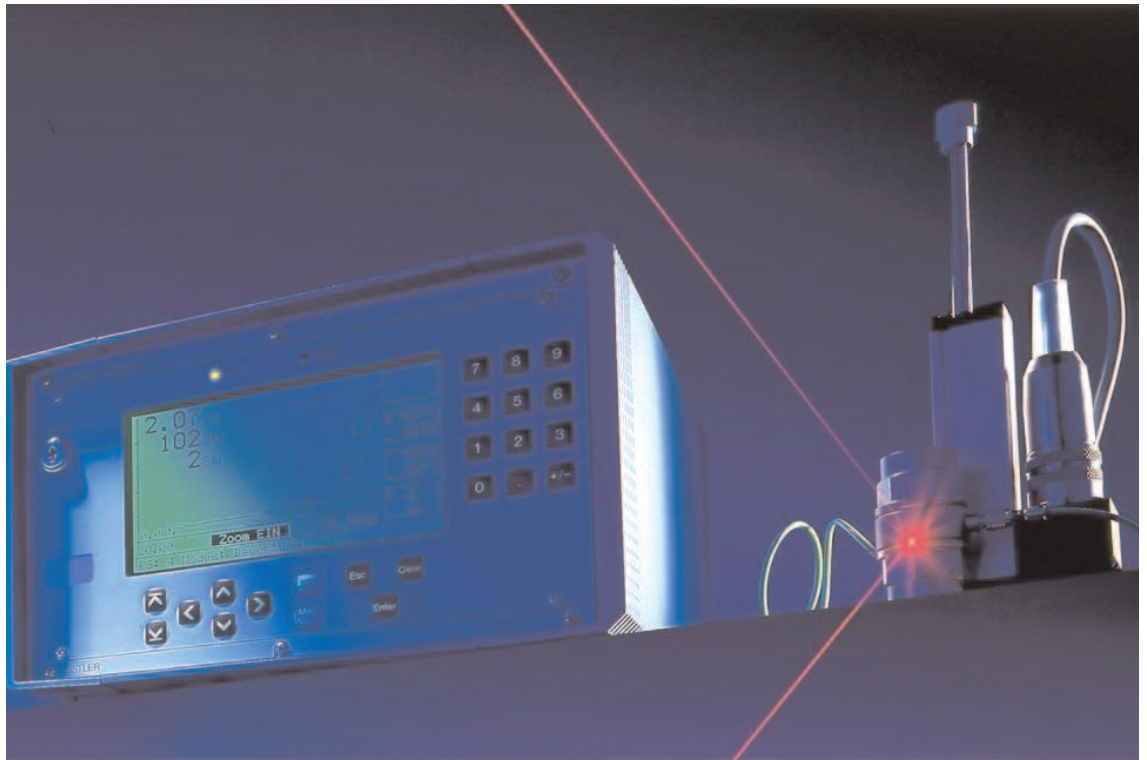


Rolf H. Kuratle, André Signer
Kistler Instrumente AG Winterthur, Schweiz

Robuste Signale von mechanischen Messgrößen



Kistler Instrumente AG Winterthur

Winterthur, Schweiz
Tel + 41 - 52 - 224 11 11, Fax 224 14 14
sales@kistler.ch

Kistler Instrumente GmbH

Ostfildern, Deutschland
Tel (07 11) 34 07-0, Fax (07 11) 34 07-159
info@kistler-deutschland.de

Kistler SA

Les Ulis Cédex, Frankreich
Tel 01 69 18 81 81, Fax 01 69 18 81 89
info@kistler.fr

Kistler Instruments Ltd.

Hampshire, UK
Tel (0 14 20) 54 44 77, Fax (0 14 20) 54 44 74
sales@kistler.co.uk

Kistler Italia s.r.l.

Milano, Italien
Tel (02) 481 27 51, Fax (02) 481 28 21
kistler@tin.it

Kistler Instrument Corp.

Amherst, NY, USA
Tel (716) 691 51 00, Fax (716) 691 52 26
kicsales@kistler.com

Kistler Japan Co., Ltd.

Tokyo, Japan
Tel (03) 35 78 02 71, Fax (03) 35 78 02 78
sales@kistler.co.jp

Kistler Instruments (Pte) Ltd.

Singapore
Tel 469 67 73, Fax 469 56 84
kiros@singnet.com.sg

Kistler China Ltd.

North Point, Hong Kong
Tel 2591 5930, Fax 2591 1885
kcplibin@vol.net

Kistler-Schmidt Korea Co., Ltd.

Seoul, ROK
Tel (02) 737 26 30, Fax (02) 737 26 32
kistler@netsgo.com

Robuste Signale von mechanischen Messgrössen

Rolf H. Kuratle, André Signer

Kistler Instrumente AG Winterthur, Schweiz

Piezoelektrische Sensoren haben sich für das Messen von schnellen und zyklischen Vorgängen bestens bewährt. Kraft-, Druck- oder Beschleunigungssensoren werden heute in unterschiedlichsten Fertigungsvorgängen zur Qualitätssicherung eingesetzt, insbesondere in Produktionsanlagen der Automobil- und Elektronikindustrie. Entsprechende Prozesskenntnisse, gepaart mit dem geeigneten Messsystem, ermöglichen eine Nullfehler-Produktion. Der folgende Beitrag stellt die eher wenig bekannte piezoelektrische Messtechnik vor und zeigt, welche Entwicklungen ihr in letzter Zeit zum Durchbruch verholfen haben.

Piezoelektrische Sensoren zum Messen von Kraft, Druck und Vibration werden in der Industrie insbesondere dort eingesetzt, wo schnelle Vorgänge über lange Zeit zuverlässig überwacht werden sollen. Häufig dient die Messung der Qualitätssicherung und -dokumentation. Die Vorteile gegenüber anderen Messwertaufnehmern sind:

- lange Lebensdauer ohne Alterung
- hohe Empfindlichkeit
- niedrige Ansprechschwelle
- grosser nutzbarer Messbereich
- praktisch wegloses Messen
- hohe Eigenfrequenz
- hoher Temperaturbereich

Beispiele für Anwendungen von piezoelektrischen Sensoren in der Industrie sind:

- Messen des Werkzeuginnendrucks beim Spritzgiessen von Kunststoffen
- Zylinderdrucküberwachung an Diesel- und Gasmotoren
- Pressenkraftüberwachung
- Überwachen von Fügekräften an Montageautomaten
- Überwachen von vibrierenden Maschinen

- Prozessüberwachung bei der spanabhebenden Metallbearbeitung.

Der piezoelektrische Sensor

Der piezoelektrische Sensor besteht aus einem piezoelektrischen Material, welches in einem geeigneten Gehäuse verpackt wird. Piezoelektrisch heisst, dass der Sensor unter Kraftbelastung eine der Kraft F streng proportionale elektrische Ladung Q mit der Einheit [pC] (1 Picocoulomb = 10^{-12} Coulomb) abgibt. Er ist deshalb ein *aktives* Messelement. Die Natur hat mit dem Quarz (Siliziumdioxid SiO_2) ein ideales Material zur Verfügung gestellt.

Heute wird der Quarz unter grossem Druck und hoher Temperatur synthetisch gezüchtet. Für spezielle Anwendungen werden auch andere piezoelektrische Materialien verwendet. Je nach Ausrichtung des Quarzes im Sensor ergeben sich unterschiedliche Effekte (Bild 1), welche durch unterschiedliche Schnittwinkel erzeugt werden können.

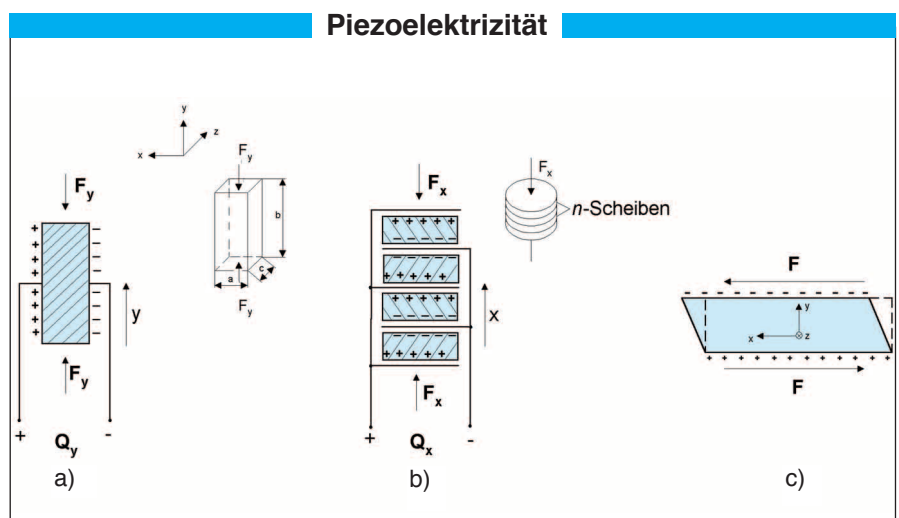


Bild 1: Piezoelektrische Effekte – Schematischer Aufbau unterschiedlicher Sensoren

a) Transversaleffekt

Die Ladungsabgabe erfolgt senkrecht zu den Kraftangriffsflächen. Die Ladung ist abhängig von der Geometrie des Quarzes, genauer gesagt von dessen Schlankheit. Die Quarzelemente sind deshalb häufig stabförmig. Die Ladungsabgabe beim reinen Transversalschnitt beträgt bei den in Bild 1 dargestellten Abmessungen:

$$Q_y = -2,3 \frac{\text{pC}}{\text{N}} \cdot F_y \cdot \frac{b}{a}$$

Typische Sensoren mit Transversaleffekt sind Drucksensoren und hochempfindliche Kraftsensoren.

b) Longitudinaleffekt

Die Ladungsabgabe erfolgt an den Kraftangriffsflächen. Im Gegensatz zum Transversalquarz ist die Ladung nicht abhängig von der Quarzgeometrie, sondern allein von der aufgebrachten Kraft und beträgt

$$Q_x = -2,3 \frac{\text{pC}}{\text{N}} \cdot F_x$$

Die Quarzelemente sind deshalb häufig scheibenförmig. Die einzige Möglichkeit, die Ladungsausbeute zu erhöhen, besteht darin, mehrere Quarzscheiben kraftmässig in Reihe und elektrisch parallel zu schalten. Bei n Scheiben beträgt die Ladung dann

$$Q_x = -n \cdot 2,3 \frac{\text{pC}}{\text{N}} \cdot F_x$$

Typische Aufnehmer mit Longitudinaleffekt sind Kraftmess-Unterlagscheiben.

c) Schubeffekt

Bei Schubkraft erfolgt die Ladungsabgabe an den Kraftangriffsflächen. Die Empfindlichkeit beträgt

$$Q = -4,6 \frac{\text{pC}}{\text{N}} \cdot F$$

Wie beim Longitudinaleffekt spielt die Geometrie des Quarzes für seine Empfindlichkeit keine Rolle. Typische Sensoren mit Schubeffekt sind 3-Komponenten-Kraftsensoren und Momentensensoren.

Verstärker für piezoelektrische Sensoren

Funktionsprinzip

Die sehr kleine vom Sensor abgegebene elektrische Ladung Q muss zur Auswertung – z.B. in einem PC oder einer SPS – in eine Spannung U (5 V oder 10 V) oder einen Strom I (4 ... 20 mA) umgewandelt werden. Dazu eignen sich sogenannte Ladungsverstärker. Diese Bezeichnung ist in der Messtechnik allgemein gebräuchlich, wenn auch sprachlich nicht korrekt, denn der Ladungsverstärker verstärkt keine Ladung, sondern wandelt sie vielmehr in eine proportionale Spannung um. Im Prinzip besteht der Ladungsverstärker aus einem Spannungsverstärker

Die Beziehung (Bild 2) zwischen Eingang Q und Ausgang U_{out} ist:

$$U_{\text{out}} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{v}\right) \cdot C_B + \frac{1}{v} \cdot (C_S + C_K)}$$

F	mechanische Belastung des Sensors (z.B. Kraft)
Q	abgegebene Ladung des Sensors (z.B. 4 pC/N)
C_S	Kapazität des Sensors (z.B. 50 pF)
C_K	Kapazität des Kabels (ca. 100 pF/m)
C_B	Kapazität des Bereichskondensators
R_i	Isolationswiderstand des Eingangskreises (Sensor, Kabel, Verstärkereingang)

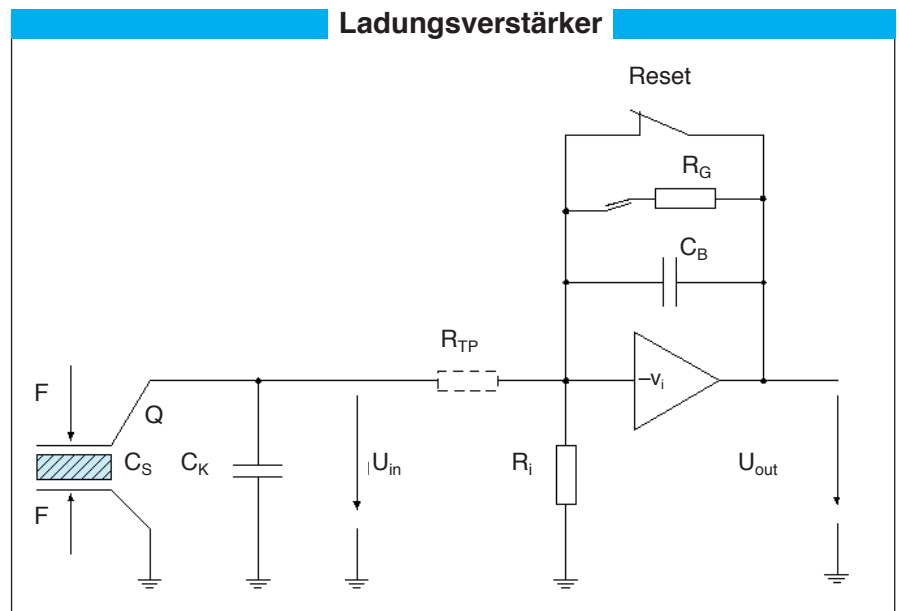


Bild 2: Schematische Darstellung eines Ladungsverstärkers

hoher Verstärkung mit einem MOS- oder J-FET am Eingang zum Erreichen des hohen Isolationswiderstandes. Er ist über einen hochisolierenden Bereichskondensator gegengekoppelt und wirkt somit als Integrator für Eingangsströme, die über den Ladungseingang fließen. Sie werden durch Ladungsänderungen (bzw. mechanische Belastungsänderungen) des Sensors erzeugt. Am Ausgang erscheint das Integral der vom piezoelektrischen Sensor abgegebenen Ladungsänderung und damit ein der gesamten Ladungsänderung (bzw. der mechanischen Belastungsänderung) proportionales Spannungssignal.

R_G	Widerstand für Zeitkonstante (untere Grenzfrequenz)
R_{TP}	Widerstand des Eingangstiefpassfilters
v_i	Verstärkungsfaktor des Operationsverstärkers (ca. 100'000)
U_{in}	Spannung am Verstärkereingang
U_{out}	Spannung am Verstärkerausgang
Reset	Schalter zum Kurzschliessen des Bereichskondensators (Nullen des Verstärkers)

Durch die grosse Verstärkung des Operationsverstärkers (idealerweise $v \rightarrow \infty$) werden die Kapazitäten des Sensors und des Kabels praktisch vernachlässigbar, und die Ausgangsspannung ist rein

proportional zum Quotienten aus Ladung und Bereichskapazität:

$$U_{out} \approx \frac{Q}{C_B}$$

Ladungsverstärker müssen eingangsseitig hochisolierend sein (R_i Grössenordnung 10^{14} Ohm) – wie auch der Sensor und das Kabel inklusive Steckverbindungen – da bei jedem nicht unendlichen Widerstand ein Strom [$pC/s = pA$] fliesst, welcher das Ausgangssignal davondriften lässt.

Drift

Wie bereits erwähnt wird die hohe Isolation am Verstärkereingang mit einem MOSFET realisiert. Die besten zur Zeit erhältlichen MOSFET haben einen Eingangsleckstrom in der Grössenordnung von einigen fA. Daraus ergibt sich die für gute Ladungsverstärker typische Drift von ± 0.03 pC/s. Der kleine Leckstrom der Eingangsstufe ist dafür verantwortlich, dass mit piezoelektrischen Systemen keine rein statischen Messungen über lange Zeit gemacht werden können. Die prozentuale Drift des Messsignals pro Minute lässt sich berechnen:

$$Drift [\% / \text{Min}] = \frac{0,03 pC \cdot 60 \text{ sec} \cdot 100 \%}{E \cdot F}$$

Empfindlichkeit des Sensors [E] = pC/N
zu messende Kraft in [F] = N

Anhand eines praktischen Beispiels mit einem Quarz-Kraftsensor (Empfindlichkeit 4 pC/N) lässt sich die Grenze für die quasistatische Messung piezoelektrischer Signale leicht angeben. Bei einem Messbereich von 1000 N ergibt sich ein Messfehler von 0.045 % pro Minute oder eine Messzeit von 22 Minuten, ohne dass der Messfehler 1 % übersteigt. Diese Drift ist unabhängig vom gewählten Bereichskondensator. Jedoch gilt: je höher die Empfindlichkeit des Sensors und je grösser die zu messende Kraft, desto kleiner ist der Fehleranteil durch Drift.

Reset

Der ebenfalls hochisolierende 'Reset'-Schalter ermöglicht das Rücksetzen des Ausgangssignals auf Null. Dabei wird der Bereichskondensator kurzgeschlossen.

Bei vielen Anwendungen ist diese Art der Tarierung sogar erwünscht, da dadurch z.B. das Eigengewicht von Maschinenteilen nicht in die Kraftmessung eingeht.

Normalerweise wird vor jedem Messzyklus bei mechanisch unbelastetem Sensor ein Reset durchgeführt. Die Reset-Zeitdauer ist mit ca. 5 ... 100 ms kurz und somit für eine hohe Taktrate in einer zyklischen Mess- oder Überwachungsapplikation geeignet.

Die Ansteuerung des Reset-Schalters erfolgt je nach Ladungsverstärker manuell oder über ein externes digitales Eingangssignal. Als hochisolierende Reset-Schalter werden Halbleiterschalter oder Reed-Relais verwendet, welche normalerweise im stromlosen Zustand geschlossen sind. Dies um eine Beschädigung des hochisolierenden Eingangs infolge statischer Ladung zu vermeiden.

Messbereiche

Ein Ladungsverstärker hat oft auch verschiedene Messbereiche. Die Wahl des Messbereiches erfolgt durch das Umschalten entsprechender Bereichskondensatoren C_B . Nachgeschaltete Verstärkerstufen ermöglichen ein skaliertes 10 V Ausgangsspannungssignal. Dadurch wird die Verwendung eines einzigen Ladungsverstärkers für Sensoren verschiedenster Empfindlichkeit und Messbereiche möglich.

Die Genauigkeit des Ladungsverstärkers wird im Wesentlichen durch die Toleranz der Bereichskondensatoren C_B bestimmt. Die Linearität ist mit ± 0.05 % FS hervorragend. Deshalb ist beim Kalibrieren der ganzen Messkette, bzw. beim Abstimmen des Verstärkers auf den jeweiligen Sensor, der Fehler einfluss des Ladungsverstärkers vernachlässigbar klein.

Ladungsverstärker sind in gewissen Grenzen Überlast sicher. Bestimmende Überlastparameter sind die Signalanstieggeschwindigkeit und die Grösse der Ladung. J-FET-Verstärker sind unempfindlicher auf statische Entladung bei unsachgemäßem Anschliessen des Sensors als MOS-FET-Verstärker, haben aber ein deutlich schlechteres Drift- und Temperaturverhalten.

Eingangs-Tiefpassfilter

Beim Messen an vibrierenden Maschinen entstehen durch die Massenschwingungen Kräfte am Sensor, die dieser natürlich mitmisst, die aber für die Steuerung oder Überwachung der Maschine nicht von Interesse bzw. störend sind.

Mit einem geeigneten Eingangs-Tiefpassfilter lassen sich die Störungen ausblenden. Bei den meisten Anwendungen haben sich Filter im Bereich von 10 ... 100 Hz bestens bewährt. Sie lassen sich bereits beim Verstärkereingang mittels eines RC-Gliedes realisieren. Benutzt man die Kabel- und Sensorkapazität als C, so erhält man je nach zusätzlich in Serie eingebautem Widerstand R_{TP} im Kabel einen Tiefpassfilter.

$$f_{Tiefpass} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{TP} \cdot (C_S + C_K)}$$

Zeitkonstanten (Hochpassfilter)

Eine sogenannte Zeitkonstante wirkt wie eine AC-Kopplung, wie sie z.B. von Oszilloskopen her bekannt ist. Der statische Signalanteil wird weggefiltert, und nur das dynamische Signal pendelt sich je nach Signalform um den Nullpunkt herum ein. Realisiert werden Zeitkonstanten mit einem parallel zum Bereichskondensator geschalteten Widerstand R_G . Der Isolationswiderstand wird sozusagen künstlich reduziert. Dies ist natürlich nur bei schnellen Messvorgängen sinnvoll.

Im AC-Mode verhält sich der Ladungsverstärker wie ein Hochpassfilter. Die untere Grenzfrequenz berechnet sich aus dem Wert des eingeschalteten Bereichskondensators und des Zeitkonstantenwiderstandes folgendermassen:

$$f_u = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_G \cdot C_B} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau}$$

untere Grenzfrequenz [f_u] = Hz
Zeitkonstante [τ] = s

Zeitkonstanten werden dann in Ladungsverstärker eingebaut, wenn man bei schnellen Vorgängen nur am dynamischen Signalanteil interessiert ist. Ein Reset vor jedem Zyklus erübrigt sich in vielen Fällen bei Messungen mit Zeitkonstanten.

	Industrie	Labor
Bauform	<ul style="list-style-type: none"> robustes Metall- oder schlagfestes Kunststoffgehäuse geeignet zur Montage an einer Maschine kleine Abmessungen schock- und vibrationsfester Aufbau der Elektronik IP-Schutzklasse (min. IP 64) diverse Eingangsanschlüsse 	<ul style="list-style-type: none"> Tischgehäuse oder 19"-Rack-System nach DIN 41494
Messkanäle	<ul style="list-style-type: none"> ein- oder mehrkanalig 	<ul style="list-style-type: none"> ein- oder mehrkanalig
Messbereiche	<ul style="list-style-type: none"> intern einstellbar sensorspezifisch abgeglichen lieferbar 	<ul style="list-style-type: none"> intern/extern einstellbar Einstellwerte numerisch ersichtlich
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> Halbleiter-Reset galvanische Trennung Differenzeingang 	<ul style="list-style-type: none"> Tiefpassfilter einstellbar Zeitkonstante (Hochpassfilter) einstellbar Overloadüberwachung Nullpunktüberwachung
Ausgangssignal	<ul style="list-style-type: none"> $\pm 5 \text{ V} / \pm 10 \text{ V}$ $0 \dots 20 \text{ mA} / 4 \dots 20 \text{ mA}$ 	<ul style="list-style-type: none"> $\pm 10 \text{ V}$
Speisung	<ul style="list-style-type: none"> $10 \dots 36 \text{ V DC}$ 	<ul style="list-style-type: none"> $115/230 \text{ V AC}$
Anschlüsse	<ul style="list-style-type: none"> diverse Eingangsanschlüsse 	<ul style="list-style-type: none"> BNC
Schnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> keine 	<ul style="list-style-type: none"> serielle RS-232C parallele IEEE-488

Bild 3: Merkmale von industriellen bzw. Laborladungsverstärkern

Industrie-Ladungsverstärker versus Labor-Verstärker

In der obigen Übersicht sind die wichtigsten Merkmale von industriellen bzw. Labor-Ladungsverstärkern zusammengestellt.

Anwendungsbezogene Lösungen

In den vergangenen Jahren wurden von Kistler Ladungsverstärker entwickelt, welche für bestimmte Anforderungen massgeschneidert sind. Der Schwerpunkt lag dabei bei Verstärkern für den industriellen Einsatz.

Miniaturisierung

Dank der Hybridtechnik wurde es möglich, den eigentlichen Ladungsverstärker stark zu miniaturisieren. Er ist dadurch auch robuster geworden und lässt sich bedeutend näher am Messort unterbringen, z.B. direkt auf bewegten Maschinenteilen. Die relativ heikle Signalübertragungsdistanz vom Sensor zum Verstärker wird stark reduziert. Hybridverstärker verfügen über einen fixen Messbereich. Mittels eingebauten Spannungsverstärkern lassen sich aber trotzdem verschiedene Messbereiche konfigurieren. Der zur Zeit kleinste 'In-Line Amp' Ladungsverstärker Typ 5027 (Bild 4) mit einem Gehäuse von nur 45 x 16 mm ist mit 3 unterschiedlichen

Messbereichen erhältlich, wobei der Feinabgleich innerhalb jedes Bereiches mittels eingebautem Potentiometer erfolgt.

Verträglichkeit gegenüber elektrischen Störungen

In industriellen Produktionsanlagen sind die elektrischen Umgebungsbedingungen oft alles andere als ideal. Erdschleifen infolge unterschiedlicher Massepotentiale an der Maschine sowie elektromagnetische Felder können ein ursprünglich hervorragendes Messsignal so stark stören, dass es seine Aussagekraft verliert. Zwar sind die Ursachen immer im System (Maschine/Messkette/Verkabelung/Umfeld) zu suchen. Es werden jedoch Ladungsverstärker angeboten, welche durch geeignete Wahl der Schaltung und des Erdungskonzeptes gegen Störungen praktisch immun sind. Grundsätzlich sind sämtliche Kistler Ladungsverstärker zusammen mit den gängigen Sensoren und Kabeln bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit EN 50081-1/2

(Störaussendung) und EN 50082-1/2 (Störimmunität) geprüft. Erfüllt werden ebenfalls die sicherheitstechnischen Anforderungen gemäss EN 61010-1. Zusätzlich werden z.B. die neuen Verstärker Typ 5034 mit vollständiger galvanischer Trennung angeboten. Das bedeutet, dass die Massepotentiale von Speisung sowie Mess-Signalein- und -ausgang mittels Optokopplern getrennt sind und dadurch keine Störungen (z.B. «Netzbrumm») durch Erdschleifen auftreten können.

Externe Bereichsumschaltung

Piezoelektrische Sensoren zeichnen sich unter anderem durch ihren sehr grossen Messbereich aus. Um ihn auszunützen braucht es Ladungsverstärker mit umschaltbaren Messbereichen. Damit kann z.B. der Kraftverlauf in einer Maschine sowohl im tiefen Bereich von wenigen N als auch im Bereich von vielen kN mit hoher Auflösung gemessen werden. Die Verstärker Typen 5034 und 5039 ermöglichen eine von aussen gesteuerte Umschaltung der Messbereiche. Mittels Schaltsignalen wird der Messbereich während der Messung umgeschaltet.

Mehrkanal-Verstärker

Für Messungen mit mehreren Sensoren stehen modulare Mehrkanalverstärker mit bis zu 3 Kanälen zur Verfügung, welche in einem kompakten Gehäuse untergebracht sind (z.B. Typ 5038, Bild 5). Piezoelektrische Sensoren lassen sich übrigens problemlos elektrisch parallel schalten.



Bild 4: Kleinster Kistler-Ladungsverstärker Typ 5027

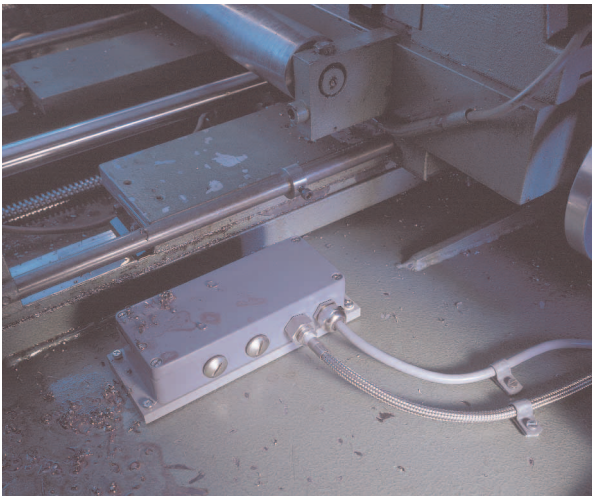


Bild 5: Ladungsverstärker in robustem und dichtem Gehäuse
Typ 5034/5038

Externe Ansteuerung

Die Steuereingänge zur Reset/Operate- oder Bereichsumschaltung können direkt mit jeder Maschinensteuerung verbunden werden. Alle industriellen Verstärker können mittels TTL-Signalen oder über Optokoppler angesteuert werden. In einigen Fällen ist zusätzlich die nicht galvanisch getrennte Ansteuerung mit einem einfachen Schalter möglich. Die Stromversorgung von Industrie-Ladungsverstärkern erfolgt üblicherweise mit 24 V DC. Der Stromverbrauch ist mit <math><100\text{ mA}</math> gering.



Bild 6: Modulare Lösung mit Steckkarten
Typ 5058

Control Monitore

Produktionsprozesse müssen heute zur Qualitätssicherung dauernd überwacht werden. Die Messsignale können dazu entweder von einer SPS ausgewertet oder direkt vor Ort zu aussagekräftigen Parametern verdichtet werden. Programmierbare Kistler Control Monitore sind in der Lage, Gut- bzw. Schlecht-Teile direkt anhand des Messsignals auszuscheiden (Bild 7). Dadurch wird die SPS von rechenintensiven Arbeiten entlastet. In den Control Monitoren sind Ladungsverstärker eingebaut. Zusätzlich können auch Signale von Sensoren mit anderen Messprinzipien (z.B. Weggeber) angeschlossen und in Funktion der ersten Messgröße dargestellt und bewertet werden.

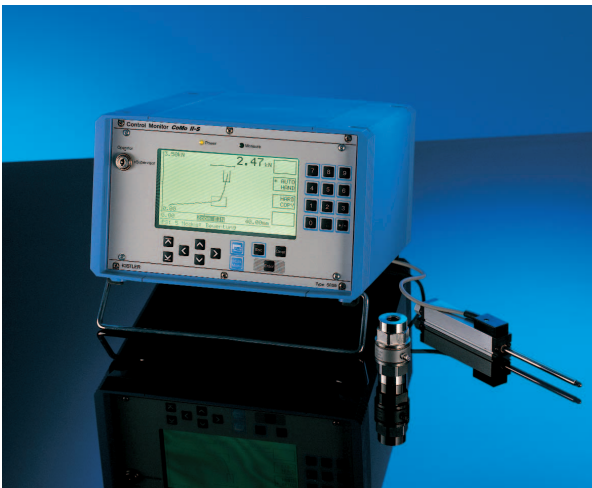


Bild 7: Neuester Control-Monitor «CoMo II-S»
Typ 5859

Literatur

- [1] Dipl.-Ing. R. Kail und Dipl.-Ing. W. Mahr; Piezoelektrische Messgeräte und ihre Anwendungen; Kistler Sonderdruck 20.116d
- [2] R. Kuratle; Motorenmesstechnik; Vogel Buchverlag; Würzburg
- [3] J. Tichi, G. Gautschi; Piezoelektrische Messtechnik; Springer-Verlag

Eine typische Anwendung sind sogenannte Messplattformen, z.B. zur Ermittlung von Kräften in der mechanischen Bearbeitung.

Die Plattform ist dabei auf vier Sensorfüßen gelagert. Die Ladungssignale der einzelnen Sensoren können zusammengeführt, d.h. addiert werden und auf einen einzigen Verstärkerkanal geleitet werden.

Rackebau

Der Ladungsverstärker Typ 5058 ist auf Europa-Karten Format aufgebaut. Er lässt sich in Racks bzw. Schaltschränke montieren. Damit lassen sich kundenspezifische Messanlagen bauen (Bild 6).