

## Optimale Ergebnisse beim Einsatz von piezoelektrischen Kraftaufnehmern

Piezoelektrische Kraftaufnehmer werden zur Messung dynamischer Kräfte empfohlen. Sie sind nicht für die Messung statischer Kräfte geeignet. Die Messung dynamischer Kräfte und Stöße mit schnellem Wechsel von Druck/Zug unter sich ändernden Bedingungen macht spezielle Aufnehmer erforderlich. Kurze Anstiegszeit, Robustheit, hohe Steifigkeit, große Messbereiche und die Fähigkeit, quasistatische Kräfte messen zu können, sind typische Eigenschaften von piezoelektrischen Kraftaufnehmern.

Die folgende Information erläutert wesentliche Aspekte, die beim Einsatz piezoelektrischer Kraftaufnehmer zu beachten sind. Sie soll zu einem besseren Verständnis führen und so die Ergebnisse dynamischer Untersuchungen verbessern.

Abbildung 1 zeigt einen typischen Quarzkraftaufnehmer im Querschnitt. Dieser Aufnehmer der Serie 208 eignet sich zur Messung von Druck- und Zugkräften und besitzt eine integrierte Elektronik.

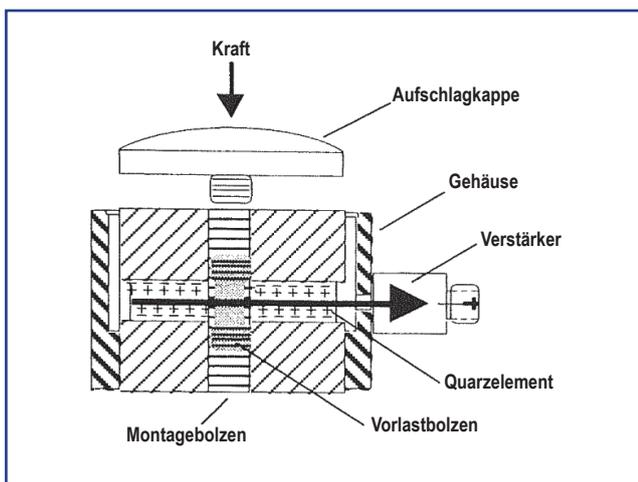


Abbildung 1 Aufnehmer für Druck/Zug/Aufprall der Serie 208

Wird auf diesen Aufnehmer eine Kraft ausgeübt, erzeugen die Quarzkristalle eine elektronische Ladungverschiebung, die zur einwirkenden Kraft proportional ist. Dieses Ausgangssignal wird auf den Elektroden, die schichtweise zwischen den Kristallen angeordnet sind, gesammelt und dann entweder in einem externen Ladungsverstärker in eine Spannung umgewandelt oder auch bereits innerhalb des Aufnehmers durch einen integrierten Verstärker in ein niederohmiges Spannungssignal umgeformt. Beide Betriebsarten werden in den folgenden Abschnitten näher betrachtet.

### Konventionelle Aufnehmer mit Ladungsausgang

Erfährt ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer eine Anregung, kommt es zu einer elektrostatischen Ladungverschiebung auf den Kristallen. Diese hochohmige Ladung muss über ein störspannungsarmes Kabel (Low Noise-Kabel) an einen Ladungsverstärker übertragen werden. Die direkte Verbindung eines Aufnehmers mit einem Anzeigegerät (z.B. ein Oszilloskop) zur Darstellung hochfrequenter Aufprallvorgänge ist zwar möglich, aussagefähige Messergebnisse sind auf diesem Wege nicht realisierbar.

Die Hauptaufgabe des Ladungs- oder Spannungsverstärkers liegt darin, das hochohmige Ladungssignal in ein für Registrierzwecke

geeignetes niederohmiges Spannungssignal umzuwandeln. Labor-Ladungsverstärker liefern zusätzliche Möglichkeiten zur Normierung, Bereichswahl und Filterung. Die Ladungsverstärker von PCB bieten außerdem Einstellungen für quasistatische Messungen, statische Kalibrierung und driftfreien dynamischen Betrieb. In die Messleitung eingefügte Miniaturverstärker (Inline-Verstärker) haben im Allgemeinen fest eingestellte Verstärkungen und Frequenzbereiche.

Quarz-Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang können bei Betriebstemperaturen bis + 204 °C eingesetzt werden.

Beim Einsatz von Aufnehmern mit Ladungsausgang ist zu beachten, dass es sich bei dem von dem Sensorelement generierten Ausgangssignal um eine reine elektrostatische Ladungverschiebung handelt. Die internen Komponenten des Kraftaufnehmers und der elektrische Anschluss verlangen einen sehr hohen Isolationswiderstand (typ.  $10^{13}$  Ohm), damit die erzeugte Ladung nicht abgebaut wird. Folglich müssen alle verwendeten Anschlüsse, Messleitungen und Verstärker einen sehr hohen Isolationswiderstand besitzen, um die Integrität des Signals aufrecht zu erhalten. Verschmutzungen aus der Umwelt wie Feuchtigkeit, Staub, Öl oder Fett am Anschluss verringern den Isolationswiderstand und führen zum Driften des Signals und zu inkonsistenten Messergebnissen.

Für die Übertragung des Ladungssignals ist ein störspannungsarmes Kabel erforderlich. Übliche zweiadrige Messleitungen oder Koaxkabel erzeugen, wenn sie gebogen werden, eine Ladungsverchiebung zwischen den Leitern. Dieses sogenannte triboelektrische Störsignal kann nicht vom elektrostatischen Ausgangssignal des Aufnehmerkristalls isoliert werden. Störspannungsarme Kabel sind mit einer besonderen Grafitfettung zwischen dem Dielektrikum und dem Schirmgeflecht ausgestattet, wodurch der triboelektrische Effekt gering gehalten wird.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen ein typisches Messsystem mit Ladungsverstärker. Es besteht aus Aufnehmer, störspannungsarmem Kabel und Ladungsverstärker.

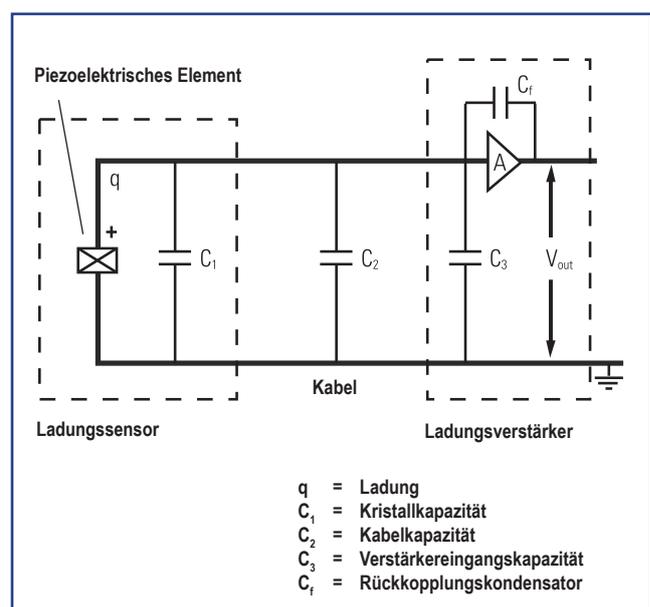


Abbildung 2 Prinzip eines Messsystems mit einem Aufnehmer mit Ladungsausgang

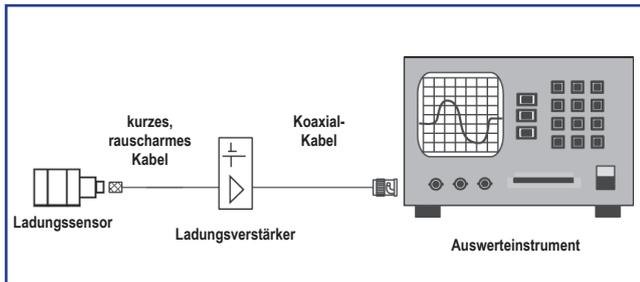


Abbildung 3 Messkette mit einem Aufnehmer mit Ladungsausgang

### Kraftaufnehmer mit integriertem ICP®-Verstärker

Solche Kraftaufnehmer besitzen einen internen MOSFET-Miniaturverstärker, der das hochohmige Ladungssignal in ein niederohmiges Spannungssignal umwandelt. Solche ICP®-Aufnehmer (ICP®: integrated circuit piezoelectric) werden durch einen Konstantstrom gespeist und können auch über lange Messleitungen betrieben werden, ohne dass die Signalqualität leidet. Aufgrund der niedrigen Quellimpedanz beeinflussen triboelektrische Effekte oder Verschmutzungen die Signalqualität nicht.

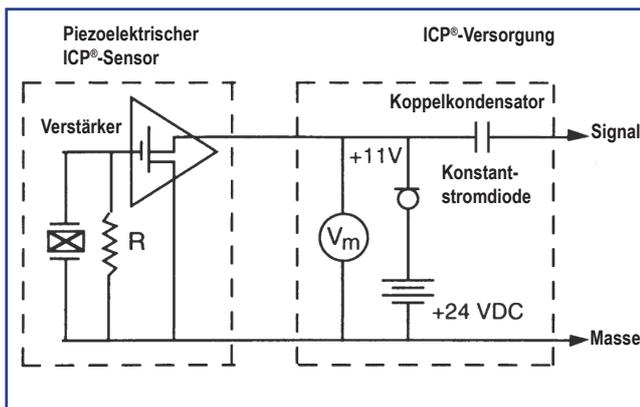


Abbildung 4 Aufbau einer Messkette mit ICP®-Aufnehmer

Die Versorgung von ICP®-Aufnehmern wird in der Praxis durch eine preisgünstige Konstantstromquelle mit 24 bis 27 VDC bei 2 bis 20 mA übernehmen. Abbildung 4 zeigt schematisch eine typische ICP®-Messkette. PCB Piezotronics bietet verschiedene Netz- und Batteriegespeiste ein- oder mehrkanalige Messverstärker mit oder ohne einstellbarem Verstärkungsfaktor zum Einsatz mit Kraftaufnehmern an. Weiterhin besitzen viele Datenerfassungssysteme bereits eine solche Konstantstromquelle, so dass ICP®-Aufnehmer direkt angeschlossen werden können. Für statische Kalibrierungen oder quasistatische Kurzzeit-Messungen, die bis zu einigen Sekunden dauern können, bietet PCB Piezotronics auch Messverstärker mit DC-gekoppelter Signal-einspeisung.

In Abbildung 5 sind verschiedene Messketten mit ICP®-Sensoren dargestellt.

Zusätzlich zu den Vereinfachungen beim Betrieb bieten ICP®-Kraftaufnehmer weitere beachtliche Vorteile gegenüber Modellen mit Ladungsausgang. Wegen ihres niederohmigen Ausgangs und ihres hermetisch dichten Gehäuses sind ICP®-Kraftaufnehmer für den Dauereinsatz auch unter rauen Betriebsbedingungen, wie sie in Produktionsanlagen vorkommen, geeignet. Außerdem sind die Kosten pro Messkanal bei ICP®-Aufnehmern deutlich geringer, da die Signalübertragung mittels preisgünstigen Koaxialkabeln erfolgt und keine teuren Ladungsverstärker erforderlich sind.

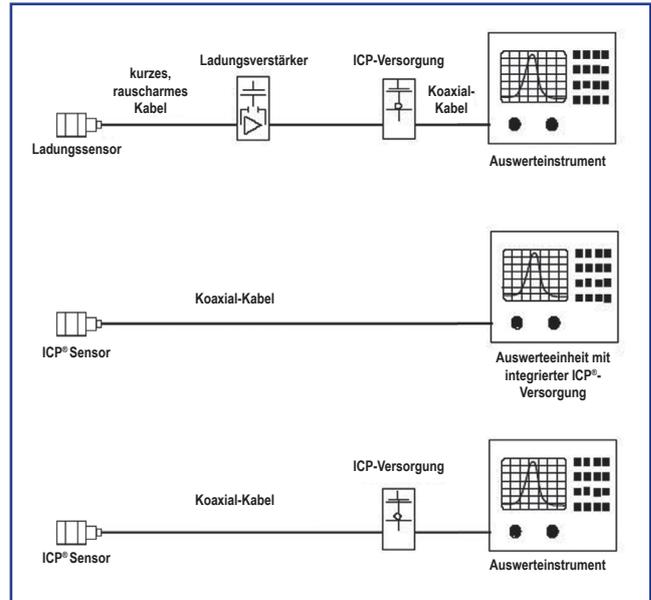


Abbildung 5 Typische Messketten

### Polarität

Die Polarität der Ausgangssignals eines ICP®-Kraftaufnehmers ist positiv für Druck- und negativ für Zugkraftmessungen. Die Polarität der Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang ist genau umgekehrt: negativ für Druck und positiv für Zug. Der Grund ist, dass Aufnehmer mit Ladungsausgang gewöhnlich zusammen mit externen Ladungsverstärkern eingesetzt werden, die eine Phasendrehung verursachen. Somit wird die Polarität des Ausgangssignals eines Systems mit Ladungsverstärker positiv für Druck und negativ für Zug wie bei einer ICP®-Messkette. Aufnehmer mit umgekehrter Polarität des Ausgangssignals sind als Option ebenfalls erhältlich.

### Piezoelektrische Kraftaufnehmer sind nur zur Messung dynamischer Kräfte geeignet

Die Quarzkristalle eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers erzeugen eine elektrostatische Ladungsverschiebung nur bei einer sich verändernden Krafteinwirkung. Obwohl der elektrische Isolationswiderstand sehr hoch ist, entlädt sich die elektrische Ladung über den Pfad mit dem niedrigsten Widerstand. Das heißt, bei Einwirkung einer statischen Kraft auf einen piezoelektrischen Kraftaufnehmer driftet die ursprünglich erzeugte elektrostatische Ladung auf Null zurück.

Die Geschwindigkeit, mit der die Ladung auf Null abklingt, hängt vom Pfad mit dem niedrigsten Isolationswiderstand ab, also vom Aufnehmer, von der Messleitung und von dem Eingangswiderstand und -kapazität des verwendeten Verstärkers.

Bei Kraftaufnehmern mit Ladungsausgang wird die Leckrate gewöhnlich vom Widerstand und von der Kapazität des Messkabels sowie vom verwendeten externen Ladungsverstärker bestimmt.

In einem Kraftaufnehmer mit internem ICP®-Verstärker bestimmen die Eigenschaften des Verstärkers das Entladeverhalten.

Wirkt eine schnelle dynamische Kraft auf einen piezoelektrischen Aufnehmer ein, tritt sehr rasch die elektrostatische Ladungsverschiebung auf und geht bei einer ausreichend großen Entladungszeitkonstante nicht auf null zurück. Es gibt allerdings einen Punkt, in dem eine langsame dynamische Kraft quasistatisch wird und die Entladung größer ist als die Geschwindigkeit der sich ändernden Kraft. Die Frage



ist, wann ein Kraftverlauf für den piezoelektrischen Kraftaufnehmer zu langsam wird, um noch korrekt gemessen zu werden. Die Antwort finden Sie im nächsten Abschnitt.

### Entladezeitkonstante(DTC)

Tritt das Abfließen einer Ladung (oder Spannung) in einer RC-Schaltung auf, verläuft die Entladung exponentiell. Ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer verhält sich ähnlich, da das Abfließen der elektrostatischen Ladung über den kleinsten Widerstand ebenfalls exponentiell verläuft. Das Produkt aus elektrischer Kapazität des Systems (in Farad) multipliziert mit dem elektrischen Widerstand (in Ohm) ergibt die Entladezeitkonstante DTC (in Sekunden).

Die DTC ist als die Zeit definiert, in der bei einem Aufnehmer oder Messsystem das Signal einer Sprungfunktion auf 37 % des ursprünglichen Wertes abgeklungen ist. Dies gilt für jeden piezoelektrischen Aufnehmer, und zwar unabhängig davon, ob es sich um einen Kraft-, Druck- oder Vibrationsaufnehmer handelt. Die DTC eines Systems ist ein direktes Maß für seine Messeigenschaften bei niedrigen Frequenzen und hat besondere Bedeutung für die Ausführung quasistatischer Messungen bei der Überwachung von Kräften.

### Entladezeitkonstante DTC bei einem Aufnehmer mit Ladungsausgang

Aufnehmer mit Ladungsausgang enthalten keinerlei interne Verstärker. Somit wird die DTC für gewöhnlich durch die Einstellungen und Daten des externen Ladungsverstärkers bestimmt. Ein Rückkopplungswiderstand bestimmt zusammen mit der Kapazität des Verstärkers die Zeitkonstante. Die Labor-Ladungsverstärker von PCB Piezotronics lassen sich auf kurze, mittlere oder lange DTC einstellen. Es wird vorausgesetzt, dass der elektrische Isolationswiderstand des Kraftaufnehmers und der Kabelverbindung zum Ladungsverstärker größer sind als der Rückkopplungswiderstand im Ladungsverstärker; andernfalls tritt eine Drift auf. Um diese Entladung klein zu halten, sind die Anschlüsse des Kraftaufnehmers und das Messkabel unbedingt sauber und trocken zu halten.

### Niederfrequenzverhalten von ICP®-Systemen

Bei ICP®-Aufnehmern sind zur Messung niederfrequenter Signale zwei Faktoren zu beachten:

1. Die Entladezeitkonstante des Kraftaufnehmers
2. Die Entladezeitkonstante der AC-Kopplung für den Messverstärker (bei DC-Kopplung ist nur die Beachtung von Punkt 1 notwendig)

Es ist wichtig, dass der Benutzer beide Faktoren berücksichtigt, damit die genaue Messung niederfrequenter Größen gewährleistet ist.

### Entladezeitkonstante von ICP®-Kraftaufnehmern

Die Entladezeitkonstante DTC wird durch die Komponenten im internen Verstärker des ICP®-Aufnehmers festgelegt, sie ist in den jeweiligen Spezifikationen angegeben.

Beim Messen mit ICP®-Aufnehmern gibt es zwei Zeitkonstanten, die für niedrige Frequenzen zu beachten sind: die eine ist die des Aufnehmers mit einem festen Wert, die andere ist die der Ankopplung des Messverstärkers.

Wird ein ICP®-Kraftaufnehmer mit einer Sprungfunktion beaufschlagt, tritt eine Ladungsverschiebung  $\Delta q$  proportional zur mechanischen Eingangsgröße auf. Die Ausgangsspannung ist  $\Delta V = \Delta q/C$ , wobei C die Gesamtkapazität von Sensorelement, Verstärker und Bereichs-

wahlkondensator ist. Diese Spannung wird anschließend mit einem MOSFET-Verstärker verstärkt, womit die endgültige Aufnehmerempfindlichkeit festgelegt ist. Nach der Sprungfunktion klingt das Ladungssignal gemäß der Funktion  $q = Qe^{-t/RC}$  ab, wobei gilt:

- q** = Augenblicksgröße der Ladung (pC)
- Q** = Anfangswert der Ladung (pC)
- R** = Wert des Leckwiderstandes (Ohm)
- C** = Gesamtkapazität (pF)
- t** = Zeit nach  $t_0$
- e** = Basis des natürlichen Logarithmus (2,718)

Die Abklingfunktion des Signals ist in Abbildung 6 grafisch dargestellt.

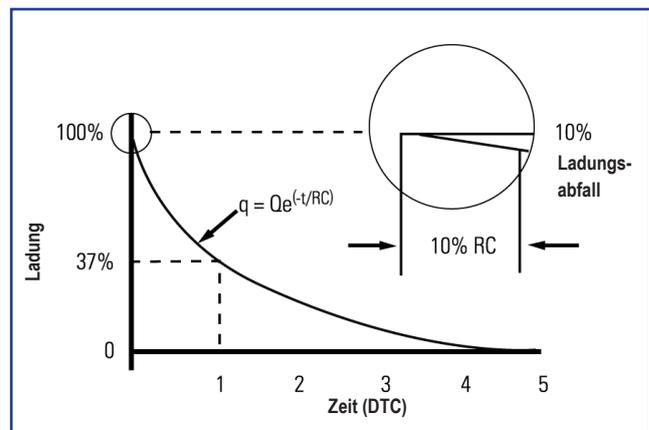


Abbildung 6 Exponentielles Abklingen des piezoelektrischen Signals

Das Produkt aus R und C verkörpert die Entladezeitkonstante DTC (in Sekunden) des Aufnehmers. Aufnehmerzeitkonstanten können für Standardaufnehmer von wenigen Sekunden bis zu über 2000 Sekunden betragen. Spezielle Zeitkonstanten sind durch Änderung des Widerstandes R im integrierten Mikroelektronik-Verstärker des Aufnehmers realisierbar.

Die meisten Anzeige- und Registriergeräte weisen eine Eingangsimpedanz von größer 1 MOhm auf. Für diese Systeme wird die Zeitkonstante des Aufnehmers die bestimmende Größe, die zur Ermittlung der Abklingrate des Signals dienen kann. Bei Verbindung mit niederohmigen Registriergeräten, d.h. mit einer Eingangsimpedanz von weniger als 1 MOhm, ist es erforderlich, die Zeitkonstante des Systems zu berücksichtigen. Eine Erläuterung hierzu finden Sie im folgenden Abschnitt.

### Zeitkonstanten von Messverstärkern und Registriergeräten

Die externe Stromversorgung, die mit einem ICP®-Kraftaufnehmer verwendet wird, kann ebenfalls eine Zeitkonstante aufweisen, die zu berücksichtigen ist. Bei manchen ICP®-Messverstärkern wird die Zeitkonstante durch interne Komponenten bestimmt und kann kürzer oder länger als die DTC des Aufnehmers sein. Bei Messverstärkern mit kapazitiv gekoppelten Ausgängen ist die DTC nicht fest. In diesem Fall bildet eine Kapazität, die zum Auskoppeln einer Vorspannung des ICP®-Kraftaufnehmers dient, mit der Eingangsimpedanz des Registriergerätes eine neue Zeitkonstante.

Entnehmen Sie den Spezifikationen des Messverstärkers, ob er eine feste interne Zeitkonstante besitzt, die das Übertragungsverhalten für niedrige Frequenzen bestimmt, oder ob eine kapazitive Kopplung vorliegt. Ist das Ausgangssignal kapazitiv gekoppelt, lässt sich die Zeitkonstante bei Anschluss an ein Registriergerät wie folgt berechnen:



DTC = Eingangsimpedanz des Registriergerätes x Wert des Koppelkondensators der Stromversorgung

Beachten Sie, dass im Ausgang einiger kapazitiv gekoppelten ICP®-Versorgungseinheiten ein Parallelwiderstand liegt, der die Wirkung des Eingangswiderstandes des Registriergerätes unwirksam macht, wenn er 1 MOhm oder größer ist.

Der AC-gekoppelte Signaleingang eines Registriergerätes stellt eine zusätzliche Entladezeitkonstante dar. Prüfen Sie die Spezifikationen der Versorgungseinheit und des Aufzeichnungsgerätes, damit sicher ist, dass sie für diese spezielle dynamische Messung geeignet sind. Ist mehr als eine Entladezeitkonstante in der Messkette enthalten, so hat die Zeitkonstante, die deutlich kürzer als die anderen ist, das höchste Gewicht. Die System-Entladezeitkonstante für periodische und transiente Eingangssignale kann mit Hilfe der folgenden Formeln berechnet werden:

**Oszillierende Eingangssignale:**  $DTC = \frac{TC_s \times TC_r}{(TC_s^2 + TC_r^2)^{1/2}}$

**Transiente Eingangssignale:**  $DTC = \frac{TC_s \times TC_r}{TC_s + TC_r}$   
(bis zu 10% der DTC)

**Wobei:**  $TC_s = DTC \text{ des Sensors}$   
 $TC_r = DTC \text{ des Anzeigeeinstruments}$

Die TC<sub>r</sub> oder Zeitkonstante des Registriergerätes errechnet sich aus dem Produkt der Kopplungskapazität der ICP®-Stromversorgung und der Eingangsimpedanz des Registriergerätes in Sekunden. Zur Vermeidung möglicher Probleme wird empfohlen, dass die Koppelzeitkonstante mindestens den 10fachen Wert der Aufnehmer-Zeitkonstanten hat. Die Entladungszeitkonstante des ICP®-Aufnehmers bestimmt das Übertragungsverhalten des Systems für niedrige Frequenzen. Sie verhält sich analog zu einem RC-Hochpassfilter 1. Ordnung. Die theoretische untere Grenzfrequenz (f<sub>c</sub>) verdeutlicht Abbildung 7. Sie lässt sich wie folgt bestimmen:

- Dämpfung 3 dB:  $f_c = 0,16/DTC$
- Dämpfung 10 %:  $f_c = 0,34/DTC$
- Dämpfung 5 %:  $f_c = 0,5/DTC$

### Langzeitereignisse und Entladezeitkonstante DTC

Häufig besteht die Aufgabe einen Kraftimpuls von einigen Sekunden Dauer zu messen. Dies ist der Fall, wenn eine statische Kalibrierung

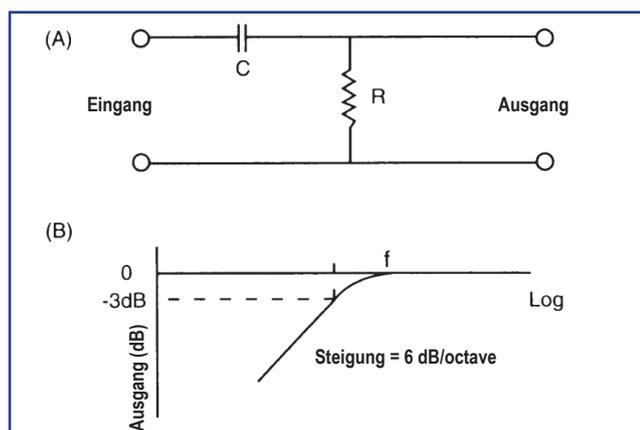


Abbildung 7 Übertragungseigenschaften eines ICP®-Aufnehmers

oder eine quasistatische Messung durchgeführt wird. Vor der Durchführung von Tests dieser Art ist zu beachten, dass die ganze Messkette direkt gekoppelt sein muss, um das schnelle Abklingen des Signals zu vermeiden. Verschiedene Messverstärker von PCB Piezotronics ermöglichen eine AC- und DC-Kopplung und sind für derartige Anwendungen geeignet.

Eine Faustregel für diese Messungen besagt, dass zwischen dem Abklingen des Ausgangssignals und der während der ersten 10 % einer DTC verstrichenen Zeit eine 1:1-Beziehung besteht. Für einen Aufnehmer mit einer DTC von 500 Sekunden bedeutet das ein Abklingen von 10 % des ursprünglichen Eingangssignals innerhalb der ersten 50 Sekunden. Für die Einhaltung einer Genauigkeit von 1 % müssen die Daten also während dem ersten Prozent der DTC erfasst werden. Ist eine Genauigkeit von 8 % zulässig, muss die Messung innerhalb der ersten 8 % der DTC erfolgt sein, usw. Abbildung 8 stellt diese Zusammenhänge grafisch dar.

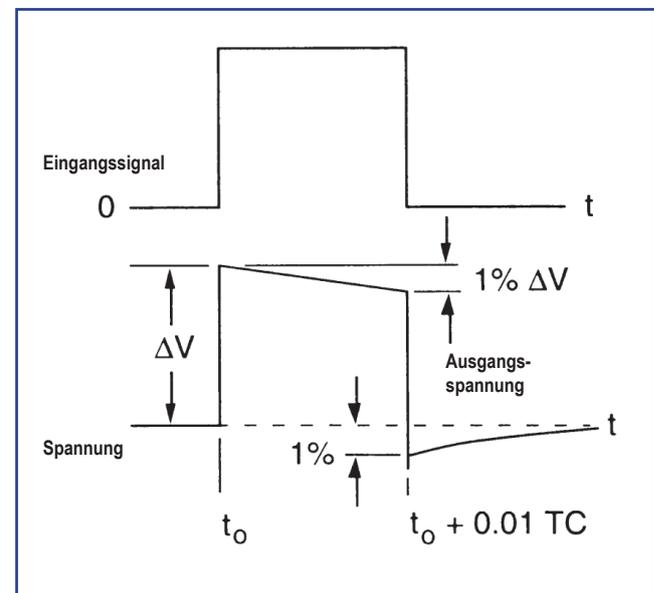


Abbildung 8 Antwort auf eine Sprungfunktion

Ohne Einflüsse von außen klingt das Signal naturgemäß auf Null ab. Das Absinken auf Null nimmt etwa 5 DTCs in Anspruch. Beachten Sie, dass das Ausgangssignal am Ende der ursprünglichen Sprungfunktion unter den Referenzpunkt der Grundlinie ( $t_0 + 0,01 TC$ ) eintaucht. Dieser negative Wert ist der gleiche, um den der ursprüngliche Puls abgeklungen ist. Bei weiterer Beobachtung wird offenbar, dass das Signal, sofern es unbeeinflusst bleibt, nach oben zur Nulllinie schwingt, bis das Gleichgewicht im System hergestellt ist.

### Eigenfrequenz des Kraftaufnehmers

Im Gegensatz zum Übertragungsverhalten des Aufnehmers bei niedrigen Frequenzen, das sich durch die Formel  $DTC = R \times C$  aus elektrischen Größen errechnen lässt, wird das Verhalten bei hohen Frequenzen vom mechanischen Aufbau des Aufnehmers bestimmt. Jeder Kraftaufnehmer hat unbelastet (ohne Gewicht) eine Resonanzfrequenz, die die maximal nutzbare obere Frequenz bestimmt. Die obere Grenze des linearen Übertragungsbereiches von Kraftaufnehmern liegt im Allgemeinen bei 20 % dieser Resonanzfrequenz.

### Ausgangssignal einer piezoelektrischen Messkette

Eine typische Eigenschaft piezoelektrischer Aufnehmer ist ein Verhalten wie das eines AC-gekoppelten Systems, bei dem periodische Signale sich abschwächen, bis eine gleiche Fläche über und unter der



ursprünglichen Grundlinie vorhanden ist. Wenn die Amplitudenpegel des überwachten Ereignisses schwanken, bleibt das Ausgangssignal unter und über der Grundlinie stabil, wobei die positiven und negativen Flächen der Kurve gleich bleiben. Abbildung 9 zeigt ein AC-Signal mit diesem Kurvenverlauf. (Ausgangssignale von Aufnehmern, die im DC-Modus arbeiten, zeigen dasselbe Muster, jedoch über eine längere Zeit entsprechend der Aufnehmerzeitkonstanten.)

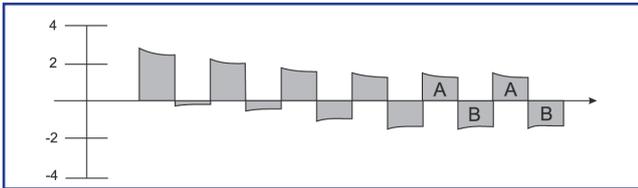


Abbildung 9 Periodischer Puls, AC-Signal

Beispiel: Es sei angenommen, ein Ausgangssignal von 0 bis 4 Volt wird in einer AC-gekoppelten Anwendung mit einer Pulsrate von 1 Sekunde und einem Tastverhältnis von 1:1 erzeugt. Die Frequenz bleibt konstant, aber das Signal klingt schnell in negative Werte ab, bis es sich um die ursprüngliche Grundlinie einschwingt (wobei Fläche A = Fläche B ist). Der Wert Spitze-Spitze des Ausgangssignals bleibt unverändert.

**Anwendungen mit periodischen Pulsen**

Häufig ist es bei Kraftüberwachungen wünschenswert eine Reihe periodischer Lastwechseln zu beobachten, die nacheinander in einem kurzen Zeitintervall auftreten. Das resultierende Ausgangssignal wird häufig als „Pulstrain“ bezeichnet. Wie bereits oben diskutiert, klingt das AC-gekoppelte Signal piezoelektrischer Aufnehmer bis zu einem Gleichgewichtszustand ab, wodurch es scheint, dass die positive Kraft abnimmt. Dadurch wird es schwierig, ein kontinuierliches positives Ausgangssignal bei Lastwechseln über den gesamten Messbereich zu überwachen, wie es beim Einsatz von Stanzen oder Pressen wünschenswert ist. Mit speziellen ICP®-Signalaufbereitungsgeräten wird es möglich, ein Ausgangssignal im positiven Bereich zu positionieren. Bei Betrieb in driftfreiem AC-Modus liefert z.B. das Modell 484B02 die Konstantstromspeisung für ICP®-Kraftaufnehmer und besitzt weiterhin eine Begrenzungsschaltung, die jeden Puls elektronisch auf Null zurücksetzt. Wie in Abbildung 10 dargestellt, verhindert diese spezielle Schaltung, dass das Ausgangssignal in den negativen Bereich driftet, wodurch ein kontinuierlich positives Signal erhalten bleibt.

Neben dieser Begrenzungsfunktion enthält das Modell PCB 410A01 zusätzlich noch einen Spitzenwertspeicher, der den Maximalwert der Kraft bis zum Eintreffen eines Reset-Signals festhält. Hierdurch wird eine Anlagensynchrone Erfassung und Bewertung von Kräften möglich.

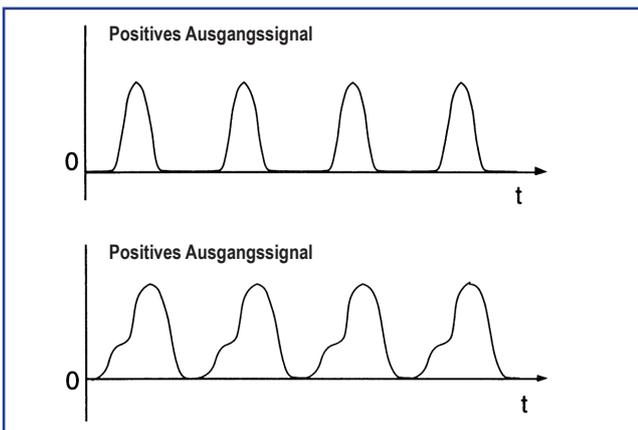


Abbildung 10 Periodisches Ausgangssignal in positiver Richtung

**Installation**

Eine ordnungsgemäße Installation des Aufnehmers ist eine wesentliche Voraussetzung für genaue dynamische Messungen. Obwohl robuste Kraftaufnehmer manchen Fehler bei der Anwendung verzeihen, sind doch gewisse Grundvoraussetzungen einzuhalten.

Da die meisten Kraftaufnehmer von PCB Piezotronics mit Quarzplättchen zur Kraftmessung in axialer Richtung ausgestattet sind, hilft eine genaue Ausrichtung des Aufnehmers und der Kontaktfläche asymmetrische Belastungen oder Biegemomente in den Aufnehmern zu vermeiden, was wiederum zu genaueren Messergebnissen führt.

Die exakte parallele Ausrichtung zwischen den Kontaktflächen von Aufnehmer und Teststruktur minimiert die Biegemomente und Randbelastungen. Ebene Montageflächen beeinflussen ebenfalls die Messqualität. Das Aufbringen einer dünnen Fettschicht auf die Montageflächen sorgt für einen besseren Kontakt zwischen Aufnehmer und Struktur.

Die Montageflächen der Kraftaufnehmer von PCB Piezotronics werden bei der Herstellung geläpft, um zu gewährleisten, dass sie eben, parallel und glatt sind. Ringkraftaufnehmer werden mit Antifrikations-scheiben geliefert, um die Scherbelastung der Aufnehmerfläche beim Verdrehen zwischen zwei Flächen möglichst klein zu halten.

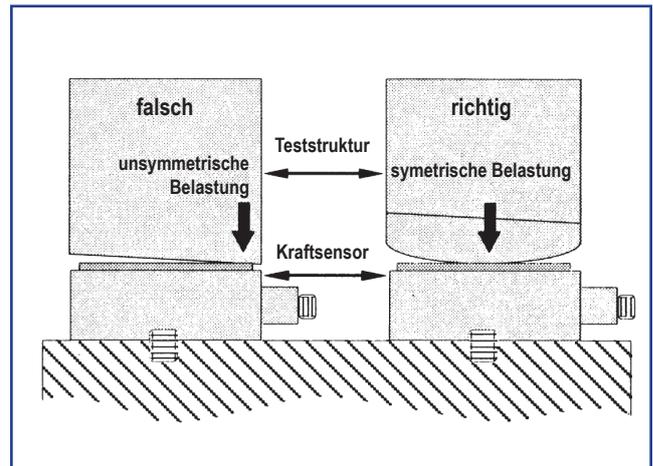


Abbildung 11 Randbelastung und zentrale Belastung

Die vollständige Belastung der gesamten Messfläche des Kraftaufnehmers spielt für gute Messergebnisse ebenfalls eine wichtige Rolle. Hier können allerdings Schwierigkeiten auftreten, wenn die Fläche, die mit dem Aufnehmer Kontakt hat, zwar eben, aber nicht parallel zur Montagefläche des Aufnehmers ist. In diesem Fall kann eine dazwischenliegende gebogene Fläche Messfehler durch eine asymmetrische Belastung verringern. (Siehe Abbildung 11)

Die Kraftaufnehmer zur Messung von Aufschlagkräften werden mit einer Aufprallkappe geliefert, damit die Kräfte besser über der Gesamtfläche des Kraftaufnehmers verteilt werden.

Bei der Montage von Kraftaufnehmern ist weiter zu überlegen, wie mechanische, hochfrequente Schockbelastung von den Aufnehmern ferngehalten werden können. Der hochfrequente Anteil direkter Aufschläge von Metall-auf-Metall kann oft Überlastspitzen mit hohen g-Werten in den Strukturen und Aufnehmern bewirken. Dieses Problem lässt sich mit einer dünnen Schicht eines weicheren Materials zwischen Struktur und Aufnehmer, der dem Aufprall ausgesetzt ist, dämpfen. Allerdings ist zu überlegen, ob die – wenn auch geringe – Dämpfung hochfrequenter Schocks zu Fehlern bei der Kraftmessung



führen kann. Die Prallflächen der Kraftaufnehmer der Serie 200 und die Prallkappen der Kraftaufnehmer der Serie 208 werden mit dünnen Schichten eines Dämpfungsmaterials geliefert.

### Vorspannen von Ringkraftaufnehmern erforderlich

Piezoelektrische Kraftsensoren zeichnen sich durch exzellente Linearität aus (typischer Wert 0,5 % FS). Bedingung hierfür ist allerdings die optimale Sensormontage.

Prinzipiell gibt es zwei Arten des mechanischen Aufbaus von Piezo-Kraftsensoren: vorgespannte Messelemente und Kraftmessringe. Im Gegensatz zu den intern vorgespannten Messelementen benötigen die Messringe zur Erzielung einer hohen Linearität eine Vorspannung in Höhe von ca. 20 % des Messbereiches. Die Vorspannung hat den zusätzlichen Vorteil, ein Verschieben und Verrutschen des Sensors während der Messung zu verhindern.

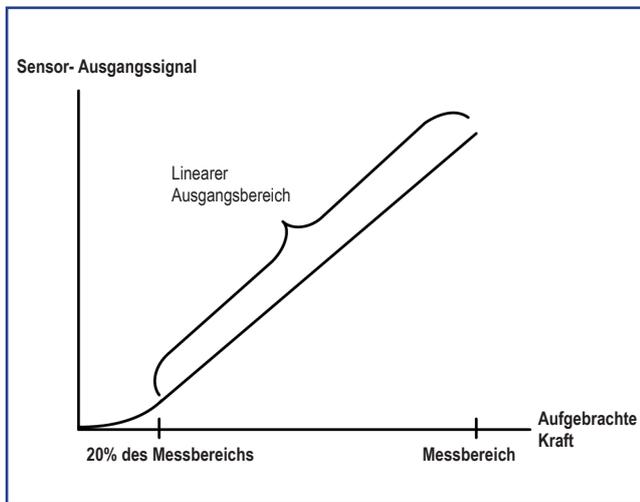


Abbildung 12 Ausgangssignal ohne Vorspannung

Das Aufbringen einer Vorlast ist ebenfalls beim Einsatz von triaxialen Kraftsensoren erforderlich. Hier wird eine Reibung benötigt, um die Scherkräfte von den Auflageflächen auf den Sensor zu übertragen.

Die erforderliche Vorspannkraft lässt sich errechnen aus:

$$F_{\text{Vorlast}} = F_{\text{scher}} \div \mu \text{ mit } \mu \text{ als Reibkoeffizient}$$

Ein typischer Wert für  $\mu$  ist 0,13, d. h. die erforderliche Vorlast ist 7,7 mal größer als die zu messende maximale Scherkraft.

Desweiteren erlaubt die Vorspannung, Zugkräfte mit Sensoren zu messen, die eigentlich für Druckkräfte konzipiert sind. Kraftmesselemente arbeiten ebenfalls auf diese Weise.

Krafringe, die eine Vorspannung benötigen, werden mit einem Montagebolzen kalibriert und geliefert. Dieser Bolzen ist so hergestellt, dass er einerseits steif genug ist, eine ordentliche Verbindung herzustellen, andererseits ist er elastisch genug, um die Funktion des Kraftmessrings sicherzustellen. Je steifer der Montagebolzen, desto mehr Kraft wird hierüber aufgenommen und nicht vom Sensor erfasst.

Der Standard Beryllium-Kupfer-Bolzen nimmt etwa 5 % der aufgebrachten Kraft auf, während Bolzen aus Stahl zwischen 20 und 50 % der Kraft aufnehmen. Andere Materialien können verwendet werden. Hier ist aber eine Neukalibrierung unter Verwendung dieser Bolzen notwendig.

Ein ordnungsgemäß montierter und vorgespannter Krafring ist in Abbildung 13 dargestellt.

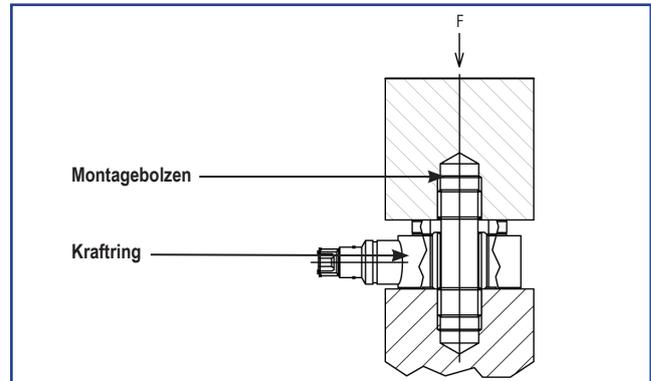


Abbildung 13 Eingebauter Krafring

### Aufbringen einer Vorlast und Messung des DC-Anteils mit einer Standard-ICP®-Versorgung

- 1.) Messaufbau durchführen, wie in Abbildung 13 dargestellt
- 2.) Einschwingzeit abwarten
- 3.) BIAS-Spannung an der Anzeige messen, Typischerweise zwischen 8 VDC und 14 VDC für die meisten ICP®-Sensoren.
- 4.) Vorlast aufbringen. Dabei die BIAS-Spannung als neue Nullreferenz verwenden.

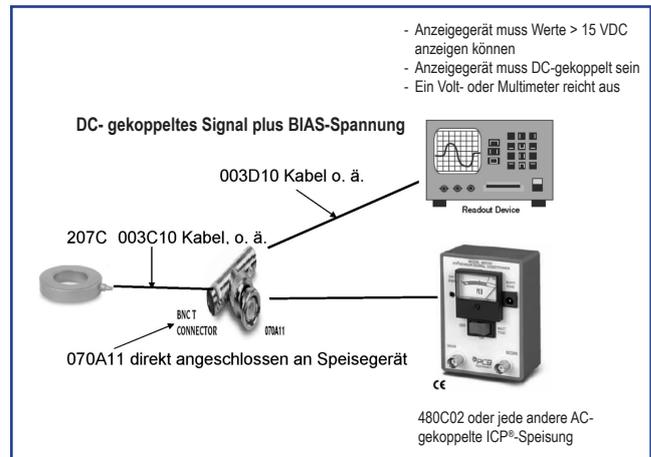


Abbildung 14 Messaufbau zur statischen Kalibrierung

Beispiel: Modell (M)207C hat eine empfohlene Vorlast von 150,13 kN. Mit einer Nominalempfindlichkeit von 11,24 mV/kN ergibt sich 1,6875 Volt Vorlast, die aufgebracht werden muss. Bei einer angenommenen BIAS-Spannung von 9,5 Volt muss also Vorlast aufgebracht werden, bis die Anzeige 11,1875 Volt anzeigt (9,5 + 1,6875)

### Kalibrierung von Kraftaufnehmern

Bei der Kalibrierung im Hause PCB Piezotronics ist die Installation eines Ringkraftaufnehmers in Reihe mit einem auf NIST zurückverfolgbaren Prüfring vorgesehen. Eine Vorspannung von 20 % (Endwert des Arbeitsbereiches des Ringkraftaufnehmers), jedoch nicht weniger als 4,5 kg, wird vor Erfassung der Kalibrierwerte aufgebracht. Erlauben Sie vor der Kalibrierung immer die vollständige Entladung der statischen Signalkomponente.

PCB bietet Kalibrier- und Prüfdienste für alle Kraftaufnehmer an, die zum NIST (National Institute of Standards and Technology) zurückführbar sind. Die Kalibrierverfahren stützen sich auf eingeführte



Richtlinien wie sie von der ANSI (American National Standards Institute) und von der ISA (Instrument Society of America) empfohlen werden. Die Kalibrierung von Kraftaufnehmern bei PCB Piezotronics steht im Einklang mit ISA-37-10 und erfüllt MIL-STD-45662A. Diese Normen beziehen sich auf die Einrichtung und Führung des kompletten Kalibriersystems, d.h., dass die Einhaltung der Aufnehmer-spezifikationen durch die Kontrolle der Genauigkeit der Mess- und Prüfeinrichtungen gewährleistet ist.

Jeder ausgelieferte Kraftaufnehmer erhält ein individuelles, auf NIST zurückverfolgbares Zertifikat, das über die kalibrierte Empfindlichkeit informiert. Die Bestimmung der Empfindlichkeit von Aufnehmern mit Messbereichen von 22,24 bis 444,8 kN erfolgt durch Einspannen des Kraftaufnehmers in einen hydraulischen Prüfstand. In Reihe mit dem Aufnehmer befindet sich als Referenzstandard ein Morehouse-Ringkraftaufnehmer entsprechend dem Messbereich des Prüflings. Die Referenzsensoren werden nach jeweils 6 Monaten kalibriert und zertifiziert, um den kalibrierten Wert zu verifizieren. Für Aufnehmer mit kleineren Messbereichen wird ein verkleinerter Prüfstand eingesetzt. Hochempfindliche Miniaturaufnehmer werden kalibriert, in dem sie mit einer bekannten, leichten Masse beaufschlagt werden. Das Abklingen des Signals auf Null wird abgewartet und anschließend die Masse schnell entfernt. Das registrierte Ausgangssignal ist die Empfindlichkeit des Aufnehmers. Aufnehmer mit Ladungsausgang und mit längeren Zeitkonstanten werden kalibriert, indem statisch eine bekannte Kraft aufgebracht und das Ausgangssignal registriert wird.

Bei jedem Kalibriervorgang werden die Datenpunkte in Intervallen von 20 % des Messbereichs des Aufnehmers geplottet. Jeder Punkt verkörpert den Mittelwert von drei in diesem Bereich vorgenommenen separaten Messungen. Diese gemittelten Punkte werden geplottet, dann wird eine Ausgleichsgerade entsprechend der BSLZ-Methode (BSLZ: best straight line through zero) gezogen. Falls die Kalibrierpunkte nicht die spezifizierte Linearität wie in den Spezifikationen veröffentlicht einhalten, gilt die Kalibrierung als nicht erfüllt und der Aufnehmer wird zurückgewiesen.

In vielen Anwendungen kann die Kalibrierung eines Kraftaufnehmers erst nach dem Einbau in die Struktur sinnvoll sein. Für solche Fälle bietet PCB Piezotronics Kraftsensoren mit Einpunktkalibrierung oder – für Serieneinsatz- auch ohne Kalibrierung an. Soll der Aufnehmer nach dem Einbau kalibriert werden, so bietet sich die einfache statische Kalibrierung an. Diese läuft wie folgt ab:

- der Kraftsensor sollte eine Entladezeitkonstante von mindestens 50 s oder Ladungsausgang aufweisen
- bei Sensoren nach dem ICP®-Konzept muss die Sensorspeisung DC-gekoppelt sein. Hinweise für AC-gekoppelte Speisungen siehe unten!
- zur Kalibrierung von Ringkraftaufnehmern muss der mitgelieferte Beryllium-Kupfer-Montagebolzen verwendet werden.

Bei Beachtung dieser Bedingungen wird nun eine bekannte Masse auf den Sensor aufgebracht und abgewartet, bis das elektrische Ausgangssignal auf "Null" zurückgeht. Anschließend wird die Masse entfernt und die Signalveränderung gemessen. Hierbei handelt es sich um ein negatives Signal, da es sich um einen Entlastungsvorgang handelt. Dieser Wert, dividiert durch die Masse, ergibt die Empfindlichkeit des Sensors in V/N.

#### Alternative Messmethoden

Alle bisherigen Ausführungen gehen davon aus, dass der Kraftsensor direkt im Kraftfluss montiert wird. Diese Montageart hat sicherlich den Vorteil, dass die einwirkende Kraft sehr genau erfasst wird, sie macht allerdings auch einen erheblichen Eingriff in die Struktur erforderlich. So muss der Sensor der Festigkeit der Struktur entsprechen und sein Messbereich muss größer sein als die zu erwartende Kraft innerhalb der Struktur. Nicht immer ist es daher wünschenswert und möglich, einen Kraftaufnehmer in den Kraftfluss einzubringen.

Daher werden in solchen Fällen konstruktive Lösungen angewandt, bei denen der Kraftaufnehmer so eingebaut wird, dass er nur einen Teil der herrschenden Kraft ausgesetzt wird. Auch bei einer solchen Kraftnebenflussmessung wird der Kraftaufnehmer fest mit der Struktur verspannt. Je nach Einbauposition erfasst er nur einen größeren oder kleineren Teil der Gesamtkraft. Der Vorteil dieser Montageart ist einerseits der geringere Eingriff in die Struktur und der benötigte kleinere Messbereich. Allerdings muss hier nach dem Einbau des Aufnehmers eine Kalibrierung des Gesamtsystems erfolgen. Eine typische Anwendung ist die Überwachung von großen Pressen.

Eine weitere Alternative, die hinsichtlich des erforderlichen Einbauaufwandes deutlich günstiger ist, ist die Verwendung von piezoelektrischen Dehnungssensoren. Diese Sensoren werden einfach mittels einer Befestigungsschraube auf die Oberfläche der zu überwachten Struktur montiert und erfassen kleinste Dehnungen der Struktur. Durch eine entsprechende Kalibrierung nach der Montage können solche Sensoren exakte Informationen zu den in der Struktur auftretenden Kräften liefern. Piezoelektrische Dehnungssensoren werden ebenfalls mit ICP®-Verstärkern geliefert und können somit vollkommen unproblematisch an Mess- und Überwachungseinrichtungen angeschlossen werden. Weit verbreitet ist diese Messmethode bei allen Maschinen mit C-förmigen Strukturen, wie sie üblicherweise bei Systemen zum Crimpen, Pressen, oder Schweißen zu finden sind. Weiterführende Informationen zu piezoelektrischen Dehnungssensoren finden Sie unter [www.synotech.de/Dehnung](http://www.synotech.de/Dehnung).

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](mailto:info@synotech.de) ■ [www.synotech.de](http://www.synotech.de)