

## Alterungs- und Belastungsuntersuchungen an Kraftfahrzeugen mit Hilfe von piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmern

Bob Metz  
PCB Piezotronics, Inc.

### 1. Einführung

Obwohl die DMS-Technik einen festen Platz bei der Messung statischer Kräfte mit einer Genauigkeit von besser als 1 % vom Skalenendwert einnimmt, bieten piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer viele Vorteile. Eigenschaften wie Langzeitstabilität und Haltbarkeit spielen bei Alterungs- und Belastungsuntersuchungen an Kfz-Komponenten eine bedeutende Rolle. Dieser Bericht soll dazu dienen, Messtechnikern, die mit den Eigenschaften piezoelektrischer Kraftaufnehmer nicht umfassend vertraut sind, die Vorteile der Technologie und der Ausschöpfung dieser Vorteile bei Untersuchungen von Kfz-Komponenten deutlich zu machen.

Zu den Alterungs- und Belastungsuntersuchungen an Kfz-Komponenten gehören Druck-, Zug-, Aufprall- sowie Daueruntersuchungen an Schließern, Türen, Motorhauben, Kofferraumdeckeln, Sitzen, Federn, Aktuatoren, Aufhängungen, Fahrgestellen, Trägern und anderen Komponenten. Bei den meisten Haltbarkeitsuntersuchungen an Kraftfahrzeugen wie z.B. bei dem Aktuator einer Zentralverriegelung in Abbildung 1 ist eine Kraftmessung erforderlich, für die traditionell die Dehnungsmessstreifen-Technik (DMS-Technik) eingesetzt wurde. Dies mag teilweise durch den Mangel an Kenntnissen über die technischen Vorteile der ICP®- und piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang bei derartigen Anwendungen bedingt sein.

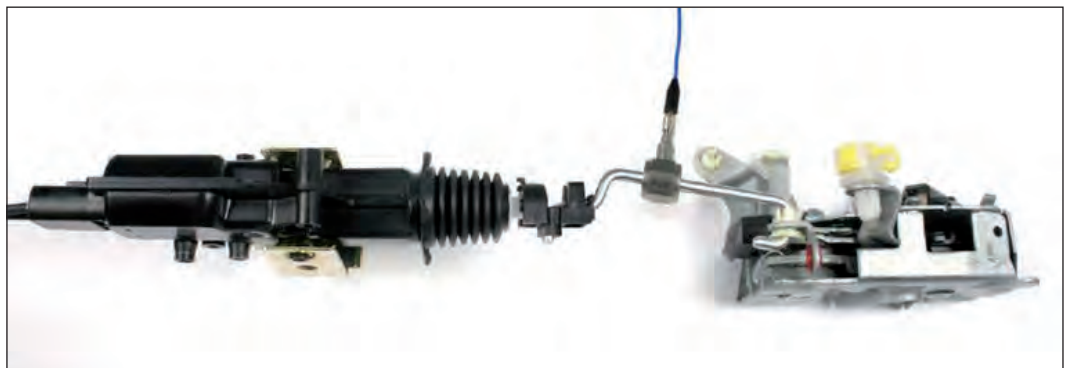


Abbildung 1  
Alterungs- und  
Belastungsuntersuchung am  
Aktuator einer Zentralverriegelung

Dieser Bericht beschreibt die Eigenschaften piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer und deren Vorteile bei dynamischen Untersuchungen im Vergleich zur DMS-Technik, um dem Kfz-Prüftechniker eine

Hilfe bei der Auswahl der günstigsten Lösung für eine bestimmte Anwendung zu geben. Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung der Eigenschaften, die in diesem Bericht beschrieben werden.

Piezoelektrische Quarz-Aufnehmer im Vergleich zur DMS-Technik		
Eigenschaft	günstige Technik	Vorteil
Steifigkeit	piezoelektrisch	Steifigkeit typisch eine Größenordnung höher
Dynamikverhalten	piezoelektrisch	typisch 10-fach höhere Grenzfrequenz im Vergleich zu DMS
Genauigkeit, statisch	DMS	echte DC-Genauigkeit (echt statisch) für Waagen
Abmessungen	piezoelektrisch	piezoelektrische Aufnehmer sind kleiner als DMS-Messdosen mit vergleichbarem Messbereich auftreten
mehrere Bereiche	piezoelektrisch	großer Dynamikbereich. Ein einziger Quarz-Kraftaufnehmer deckt den linearen Bereich mehrerer DMS-Messdosen ab. Auflösung im Arbeitsbereich mehr als 10.000-fach
Elektrisches Ausgangssignal	piezoelektrisch	Das ICP®-Ausgangssignal beträgt 5 V für Vollausschlag. Das Ausgangssignal bei DMS-Messdosen beträgt nur 20 mV für Vollausschlag
Überlastfestigkeit	piezoelektrisch	Aufgrund der hohen Steifigkeit ist bei piezoelektrischen Aufnehmern eine Überlastung von mehreren 100 % erreichbar
Empfindlichkeitsstabilität	piezoelektrisch	Langzeitstabilität, keine Alterungseinflüsse im Laufe der Zeit durch Festkörperkonstruktion ohne bewegliche Teile. Längeres Kalibrierungsintervall
Temperatureinflüsse	piezoelektrisch	Piezoelektrische Aufnehmer bis zu 204 °C. Normale DMS-Messdosen bis zu 93 °C. Empfindlichkeitsstabilität bei piezoelektrischen Quarzaufnehmern 0,02 bis 0,06 %/°C. Für DMS ist eine Elektronik zur Temperaturkompensation erforderlich
Kosten	ähnlich	Preis/Messkanal für piezoelektrische und DMS-Systeme ähnlich
Lebenszykluskosten	piezoelektrisch	Längeres Kalibrierungsintervall und erhöhte Aufnehmerlebensdauer aufgrund der Steifigkeit im Vergleich zu DMS

Tabelle 1

## 2. Diskussion

In der Diskussion kommen einige Fachbegriffe aus der Technologie der piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmer vor, auf die häufig Bezug genommen wird. Diese Fachbegriffe werden in der folgenden Diskussion ausführlich dargelegt, sie sollen aber schon zu Beginn erläutert werden. Die Fachbegriffe lauten:

**Piezoelektrisch** – aus dem Griechischen Wort für "Elektrizität auspressen" - ein Naturphänomen, bei dem ein elektrisches Signal auftritt, wenn bestimmte Kristalle zusammengedrückt werden. Es handelt sich um ein aktives Sensormaterial, das sein eigenes elektrisches Ausgangssignal erzeugt.

**Ladungsausgang** – piezoelektrischer Quarzaufnehmer mit einem Ausgangssignal in pC/N. Erforderlich ist ein zusätzlicher Ladungsverstärker zur Umwandlung der elektrischen Ladung in Spannung (Pico-Coulomb [pC] in Spannung [mV]).

**ICP®-Ausgang** – piezoelektrischer Quarzaufnehmer mit einem Ausgangssignal in mV/N. Der Aufnehmer enthält einen integrierten Hybridverstärker zur Umwandlung von Ladung [pC] in Spannung [mV]. Eine Konstantstromspeisung von etwa 2 bis 20 mA bei 18 bis 30 VDC versorgt den Aufnehmer.

**Entladungszeitkonstante (DTC)** – Zeit in Sekunden, in der ein elektrisches Signal exponentiell auf 37 % des Originalwertes absinkt.

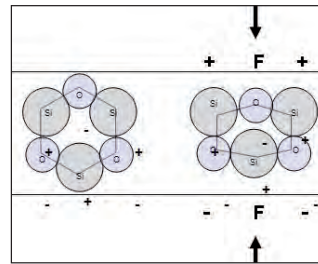
**Driftgeschwindigkeit** – eine fast lineare Funktion, die den Leckstrom in einem Ladungsverstärker definiert. Dieser beträgt etwa 0,03 pC/s und ist vergleichbar mit einer sehr hohen Entladezeitkonstanten (DTC) von über 10.000 s.

### 2. a. Steifigkeit

Die Empfindlichkeit einer DMS-Messdose wird durch die Steifigkeit der Aufnehmerstruktur bestimmt, die auf den gewünschten Messbereich abgestimmt sein muss. Folien- DMS werden auf die Aufnehmerstruktur geklebt, und bei einer Auslenkung oder Dehnung unter Last ändert sich ihr elektrischer Widerstand. Die meisten DMS benötigen z.B. eine Auslenkung von 0,025 mm bis 0,075 mm, um ein Ausgangssignal für Vollausschlag zu erreichen. Dies entspricht einer Steifigkeit von nur 5,2 N/μm bis 1160 N/μm für einen Messbereich von 445N bzw. 445kN.

Piezoelektrische Kraftaufnehmer mit einem Sensorelement aus Quarz (Silizium-Dioxid, SiO<sub>2</sub>) sind typisch um eine Größenordnung steifer als DMS-Messdosen mit vergleichbarem Messbereich. Eine piezoelektrische Ladungsverschiebung am Ausgang erscheint als Ergebnis einer Belastung des Kristallgitters, und zwar im Gegensatz zur Auslenkung (Dehnung) eines aufgeklebten Folien- DMS. Die Einheit eines Ladungsausgangssignals ist Pico-Coulomb [pC]. Sensorelemente aus Quarz besitzen typischerweise die gleiche Ladungsempfindlichkeit von 18 pC/lb (4 pC/N) für Kraftaufnehmer beliebiger Größe, die dann zur Messung von Zug- oder Druckkräften herangezogen werden.

Ein piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer reagiert mit winzigen Dehnungen auf eine Belastung, um ein Ausgangssignal zu erzeugen. Je nach Konstruktion des Aufnehmers besitzt er eine Steifigkeit in der Größenordnung von 1038 bis 17300 N/μm. Die Belastung bewirkt eine Polarisierung des Kristallgitters, wobei es sich um eine durch die Kraft erzeugte Asymmetrie handelt. Wie Abbildung 2 zeigt, befindet sich das Molekül links in Ruhelage, während das Molekül rechts infolge der einwirkenden Kraft asymmetrisch verformt und elektrisch polarisiert ist. Die Darstellung in Abbildung 2 scheint unter Last eine Verformung zu zeigen, aber es handelt sich um eine Vergrößerung in atomaren Dimensionen, nämlich im Mikrometerbereich.



**Abbildung 2**  
Quarz-Molekül  
Links ist ein Molekül in Ruhelage abgebildet. Unter Krafteinwirkung tritt eine Polarisierung des Kristallgitters auf

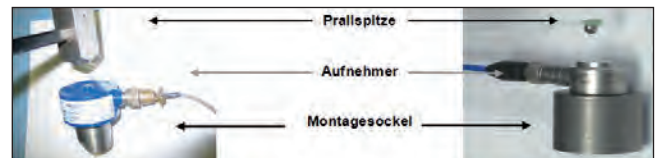
### 2. b. Dynamikverhalten

Der Frequenzgang eines piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmers wird durch ein System 2. Ordnung mit einer eigenen Resonanzfrequenz und einem niedrigen Dämpfungsfaktor[1] angenähert und besitzt die bis zu 10fache Bandbreite einer DMS-Messdose. Die obere Grenzfrequenz piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer wird durch die mechanischen Eigenschaften der Masse und Steifigkeit bestimmt, während es sich bei der unteren Grenzfrequenz um eine Eigenschaft handelt, die wie ein elektrisches Hochpassfilter wirkt. Piezoelektrische Aufnehmer können Messungen im Bereich von fast DC (quasistatisch) bis zu mehreren kHz ausführen, während DMS-Messdosen auf einen Bereich von „echt DC“ (echt statisch) bis zu einigen zehn Hz[2] beschränkt sind. Für viele Anwendungen sind somit prinzipiell beide Verfahren geeignet.

Ein breiter Frequenzbereich ist eine mechanische Eigenschaft piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer. In Abschnitt 2.a. wurde gezeigt, dass ein piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer steifer ist und keine Auslenkung benötigt, um ein Ausgangssignal wie eine DMS-Messdose zu erzeugen. Somit wird ein höherer Frequenzbereich möglich, da die Frequenz der Quadratwurzel der Steifigkeit proportional ist.

Die Masse geht ebenfalls in die Frequenzbestimmung ein, da die Frequenz außerdem zur Quadratwurzel des Kehrwertes der Masse proportional ist. Die meisten Spezifikationen für DMS-Messdosen führen eine Überschwingfrequenz an. Dieser Wert wird mit dem halben Wert der Masse errechnet, weil die meisten Kraftaufnehmer fest installiert eingesetzt werden, wobei etwa die Hälfte der Masse abgestützt wird und das Zentrum der Messdose als Membran wirkt. Die Überschwingfrequenz ist die Eigenfrequenz dieser Membran.

Ein Experiment für die Eigenfrequenz wurde an einem piezoelektrischen Quarz-Aufnehmer und einer DMS-Messdose mit jeweils gleichem Messbereich durchgeführt. Die Konfiguration mit den Prallspitzen ist in den Abbildungen 3a und 3b erkennbar.



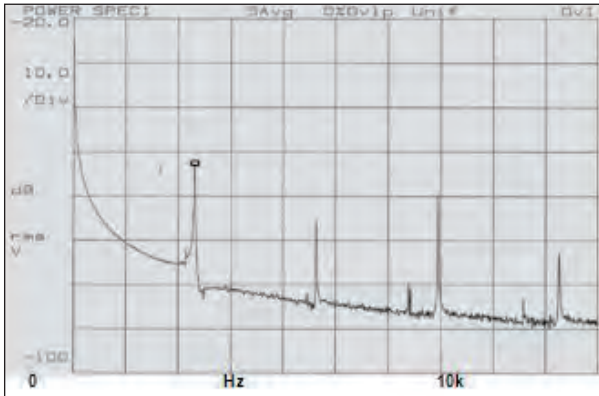
**Abbildung 3a**  
Konfiguration der DMS-Messdose  
Modell 1102-02A von PCB

**Abbildung 3b**  
Konfiguration des piezoelektrischen Kraftaufnehmers  
Modell 200B02 von PCB

Die Diagramme 1a und 1b zeigen ein Leistungsspektrum der Eigenfrequenz in montiertem Zustand für eine DMS-Messdose und einen piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmer. Man beachte die tiefer liegende Resonanzfrequenz der DMS-Messdose (2,3 kHz) im Vergleich zum piezoelektrischen Kraftaufnehmer (87,1 kHz). Daraus lässt sich schließen, dass infolge seiner hohen Steifigkeit der piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer auf eine Struktur montiert werden kann, ohne die Frequenzeigenschaften der Struktur bezüglich der Steifigkeit zu verändern.

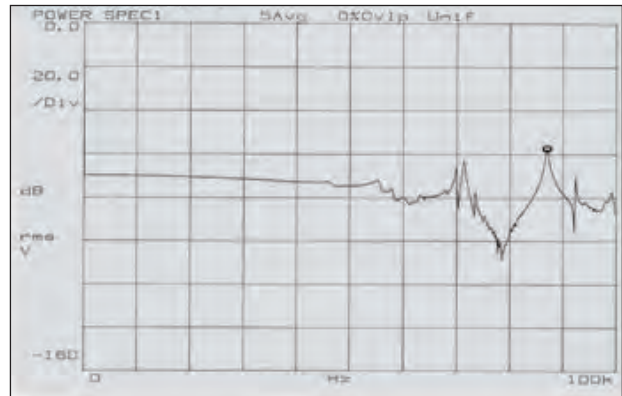
## Eigenfrequenz eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers im Vergleich zu einer DMS-Messdose

**X=2,31 kHz**  
**Ya= - 52,708 dBVrms**



**Diagramm 1a**  
 Modell 1102-02A von PCB

**X= 87,12 kHz**  
**Ya= -57,309 dBVrms**



**Diagramm 1b**  
 Modell 200B02 von PCB

Die Eigenfrequenz eines Aufnehmers lässt sich mit folgender Gleichung ermitteln:

$$f_n \text{ in kHz} = 1/2\sqrt{k/m} \quad \text{mit } k = \text{Steifigkeit in N/m und } m = \text{Masse in kg} \quad [3]$$

Der Prüftechniker muss dem Frequenzgang in montiertem Zustand besondere Beachtung schenken. Wird ein piezoelektrischer Quarz-

Kraftaufnehmer oder eine DMS-Messdose montiert, vergrößert sich die Masse des Systems und eine neue Federkonstante wird wirksam. Aus diesem Grund muss ein Stoßtest am Testaufbau ausgeführt werden, um die Resonanzfrequenz des Systems zu ermitteln. Da ein piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer eine kleinere Masse und größere Steifigkeit besitzt, sind diese Größen eine Hilfe zur Aufrechterhaltung einer höheren Resonanzfrequenz der zu prüfenden Kfz-Komponente.

## Vergleich äquivalenter Messbereiche

	piezoelektrischer Quarzaufnehmer 200B02	DMS-Messdose 1102-02A
Bereich [N]	450	450
Steifigkeit [kN/µm]	2,1	0,0056
Masse [kg]	0,01	0,304
errechnete $f_n$ [kHz]	72,9	3,8*
gemessene $f_n$ [kHz]	87,12	2,3

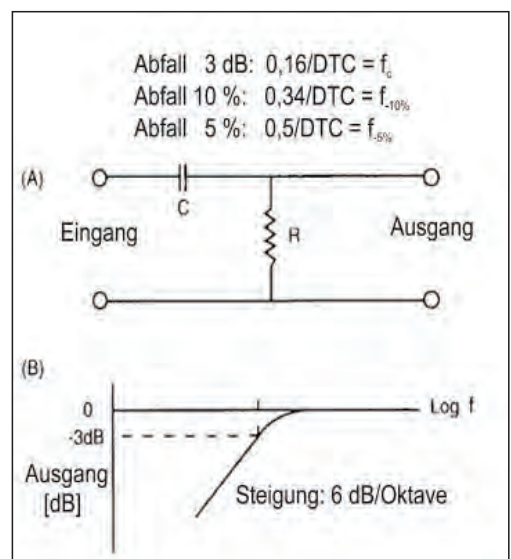
**Tabelle 2**

\*nach Methode der halben Masse

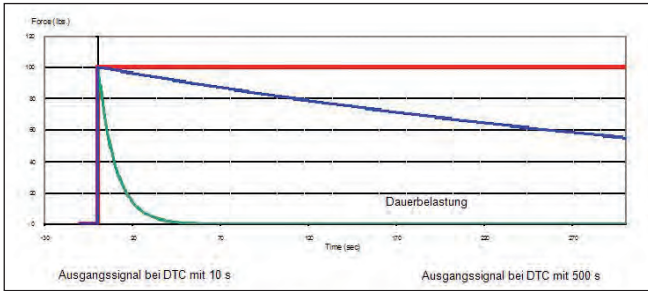
Tabelle 2 enthält eine Zusammenfassung wichtiger Spezifikationen zum Vergleich.

Die untere Grenzfrequenz ist durch die elektrischen Eigenschaften des piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmers bestimmt. Eine statische Grenze ist durch die Entladungszeitkonstante des Systems (Discharge Time Constant (DTC)) für ICP®-Ausgänge oder durch die Driftgeschwindigkeit für Aufnehmer mit Ladungsausgang gegeben. Diese statische Begrenzung genügt für quasistatischen Betrieb. Die DTC, welche die untere Grenzfrequenz für piezoelektrische Aufnehmer definiert, darf nicht mit der Zeitkonstante verwechselt werden, die in der DMS-Terminologie verwendet wird und welche die Anstiegszeit bestimmt. Die DTC ist die Zeit, in der ein elektrisches Signal exponentiell auf 37 % seines Originalwertes absinkt, wogegen die Driftgeschwindigkeit eine Funktion des Leckstromes über einen Transistor des Ladungsverstärkers ist.

Der Frequenzgang im unteren Bereich sieht daher bei piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmern wie ein Hochpassfilter aus. Der Punkt, in dem die Frequenzkurve abfällt, also die Eckfrequenz, wird durch die DTC des Systems bestimmt. Punkte bei -3 dB, -10 % und -5 % des



**Abbildung 4**  
 Unterer Bereich des Frequenzgangs eines Hochpassfilters 1. Ordnung



**Diagramm 2**  
Entladungszeitkonstanten (DTC)

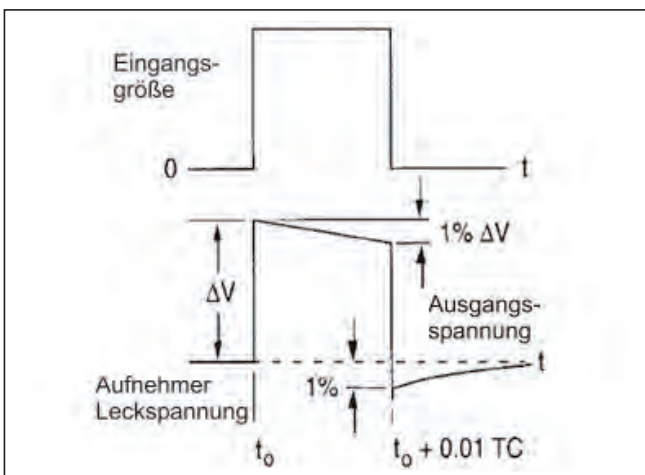
Frequenzverläufe lassen sich gemäß Abbildung 4 berechnen. Dabei ist das untere Ende des Frequenzbereichs eines Aufnehmers der Punkt, wo quasistatische Messungen mit einer ausreichend großen DTC ausgeführt werden können.

Diagramm 2 zeigt das Verhalten zweier piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer, wenn eine Dauerbelastung einwirkt und aufrechterhalten wird. Dabei wird deutlich, dass das Signal bei einer kleineren DTC von 10 Sekunden schneller abklingt als bei einer größeren DTC von 500 Sekunden.

**2. c. Statische Genauigkeit**

Hier zeigt sich der größte Vorteil der DMS-Technik, da eine echte DC-Genauigkeit (echt statisch) wie z.B. bei Waagen erforderlich, erreicht wird. Wie in Abschnitt 2.b. erwähnt, ist der Frequenzgang piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer im unteren Frequenzbereich begrenzt, da Quarz-Aufnehmer echt statische Signale nicht übertragen können.

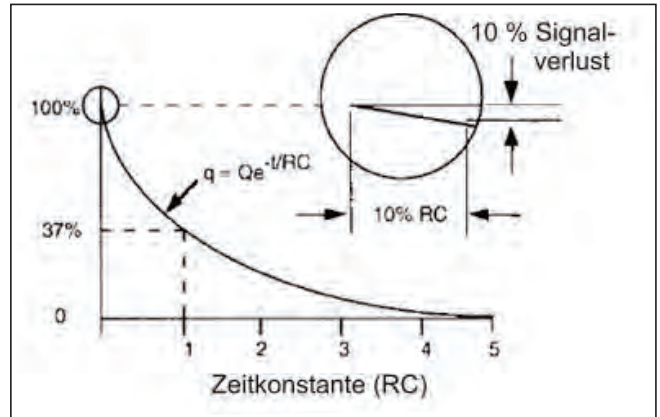
Bei Verwendung von Aufnehmern mit ICP®- Ausgang für quasistatische Messungen oder eine statische Kalibrierung müssen DC-gekoppelte Verstärker, z.B. ein Modell der Baureihe 484 von PCB, und eine DC-gekoppelte Anzeige benutzt werden. Damit ist es möglich, die Leckspannung des Aufnehmers auf Null zu setzen, ohne zusätzliche Hochpässe in das System einzufügen. Eine allgemeine Faustregel für derartige quasistatische Messungen besagt, dass die Dämpfung des Ausgangssignals und die während der ersten 10 % einer DTC verstrichene Zeit eine lineare 1:1-Beziehung aufweist, wie in den Abbildungen 5a und 5b gezeigt wird. Damit tritt im ersten Hundertstel der DTC eine Signaldämpfung von nur 1 % auf. Bei einem Aufnehmer mit einer DTC von 2.000 s wird nach 20 Sekunden das ursprüngliche Eingangssignals um 1% abgeklungen sein.



**Abbildung 5a**  
Sprungantwort eines DC-gekoppelten Piezo-Aufnehmers

Wirkt z.B. eine statische Last von 1.000 N auf einen DC-gekoppelten Aufnehmer mit einer ihm eigenen Entladezeitkonstanten von 2000s ein, klingt das Kraft-Ausgangssignal innerhalb der ersten 20 s um 1 % bzw. weniger als 10 N ab. Somit ist für eine gewünschte Genauigkeit von 1 % eine Ablesung innerhalb von 1 % der DTC oder 20 Sekunden notwendig.

Letzter Hinweis zur statischen Genauigkeit: Das gesamte System muss DC-gekoppelt sein; das bedeutet, dass der Aufnehmer eine hohe DTC hat und dass Messverstärker und Anzeige ebenfalls DC-gekoppelt sind. Das Haupteinsatzgebiet für DC-gekoppelte Systeme ist die Kalibrierung.

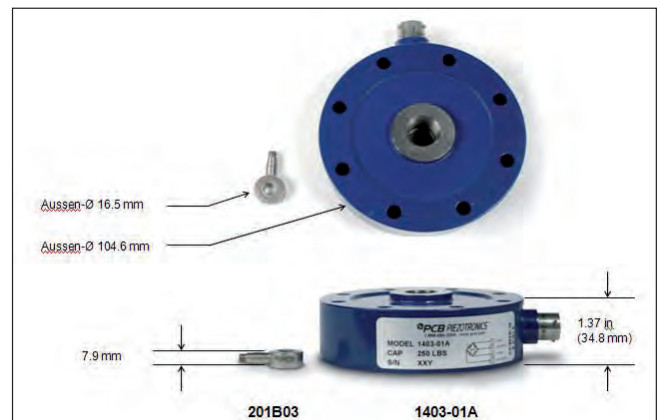


**Abbildung 5b**  
Linearer Bereich einer DC-gekoppelten Entladungszeitkonstanten (DTC)

**2. d. Abmessungen**

Die Abmessungen sind häufig ein entscheidender Gesichtspunkt bei der Auswahl eines Kraftaufnehmers. Piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer sind kleiner als DMS-Messdosen mit vergleichbarem Messbereich. Das ist ein deutlicher Vorteil, da piezoelektrische Quarz-Typen nur minimalen Platz benötigen und nur eine unbedeutende Masseladung für dynamische Untersuchungen hinzufügen.

Einen optischen Vergleich zeigt Abbildung 6. Bei der Einheit links handelt es sich um einen Ringkraftaufnehmer Modell 201B03 von PCB für einen Messbereichsendwert von 2,2 kN. Der Aufnehmer besitzt einen Durchmesser von 16,5 mm und eine Höhe von 7,9 mm. Die Einheit rechts ist eine DMS-Messdose für Dauerbelastungsuntersuchungen, Modell PCB 1403-01A, mit einem Messbereichsendwert von 1,1 kN. Sie hat einen Durchmesser von 104,6 mm und eine Höhe von 34,8 mm.



**Abbildung 6**  
Größenvergleich von Ring-Kraftaufnehmern



## 2. e. Mehrere Bereiche

Piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang besitzen aktive Sensorelemente und erzeugen ein lineares Ladungssignal am Ausgang, das zur einwirkenden Kraft[4] proportional ist. Sie können für mehrere Messbereiche verwendet werden, ohne den Kraftaufnehmer vom Prüfobjekt entfernen zu müssen. Mit der einfachen Gleichung  $V = Q/C$  mit  $V$  = Ausgangsspannung,  $Q$  = erzeugte Ladung und  $C$  = Systemkapazität lassen sich mehrere Ausgangsbereiche verwirklichen, indem einfach der Wert von  $C$ [5] verändert wird. Der Wert von  $C$  kann bei Aufnehmern mit ICP®- Ausgang intern und bei Verwendung von Ladungsverstärkern für A ufnehmer mit Ladungsausgang extern eingestellt werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es, niedrigere Bereiche zu messen, während der Aufnehmer eine viel größere statische Belastung erfährt. Der Prüftechniker kann den Arbeitsbereich für Vollausschlag um mehr als das 10.000fache dehnen. Derselbe piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang, der für 0 bis 10k N verwendet wurde, kann auch für die Messung von 0 bis 10 N eingesetzt werden.

Zum Vergleich: Eine DMS-Messdose mit einem bestimmten Messbereich muss für jeden in einer Untersuchung gewünschten Messbereich beschafft werden. Angenommen, ein Prüftechniker möchte eine DMS-Messdose mit einem Messbereich von 10k N mit einer Linearität von 0,05 % zur Messung dynamischer Lasten von 10k N und 100 N an demselben Prüfling einsetzen, und die Testspezifikation fordert eine Linearität von besser als 1 %. Der Techniker würde zwei getrennte Messdosen benötigen und den Testaufbau zweifach durchführen müssen, um den Auftrag zu erledigen, da die 10k N-DMS-Messdose für den 100 N-Bereich einen Linearitätsfehler von 5 N aufweist. Gemäß den Testbedingungen beträgt der maximal zulässige Fehler für den 100 N-Bereich jedoch nur 1 N.

Bei Verwendung eines piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmers mit Ladungsausgang bleibt die Linearität besser als 1 % vom Arbeitsbereich (gegenüber 1 % vom Skalenendwert bei DMS-Messdosen). Würde der Techniker aus dem Beispiel des vorhergehenden Absatzes einen piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang einsetzen, könnte derselbe Aufnehmer für beide Untersuchungen Verwendung finden. Die Linearitätsspezifikation für einen piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmer mit Ladungsausgang beträgt 1 % vom Skalenendwert des Arbeitsbereichs. Somit beträgt der zulässige Linearitätsfehler für den 10k N-Test 100N (1 %); wird der Bereich des zugehörigen Ladungsverstärkers geändert, ist der 100 N-Testfehler nur 1 N (1 %).

## 2. f. Elektrisches Ausgangssignal

Ein weiterer Vorteil eines piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmers mit ICP®- Ausgang ist seine hohe Ausgangsspannung von 5 oder 10 Volt, wogegen die Ausgangsspannung bei Vollausschlag an einer DMS-Messdose nur bis zu 20 mV beträgt, wenn ein 2 mV/V-DMS mit einer Speisespannung von 10 V verwendet wird. Die hohe Ausgangsspannung des piezoelektrischen Aufnehmers ist ein deutlicher Vorteil bezüglich des Störabstandes, besonders wenn der Messpunkt weiter vom Messgerät entfernt ist und ein langes Kabel erforderlich wird.

## 2. g. Überlastschutz

Der häufigste Fehler beim Umgang mit DMS ist eine Krafteinwirkung über die Streckgrenze der DMS-Aufnehmerstruktur (Überlastungsbereich) hinaus. Eine typische DMS-Messdose für Dauerbelastungsuntersuchungen im Bereich von 4,5 kN) hat eine Überlastgrenze von 9 kN, entsprechend 200 %. Eine Überlastung der Messdose kann zu einer permanenten Beschädigung der Aufnehmerstruktur führen, wodurch Nullpunktverschiebungen, Nichtlinearitäten und allgemeine Ermüdungen der Metallstruktur auftreten können; das alles sind Einflüsse, welche die Lebenserwartung der Messdose verringern.

Piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer reagieren auf Belastung, nicht auf Dehnung. Das bedeutet, dass während der Messung praktisch keine Auslenkung auftritt. Die meisten Aufnehmer haben eine Druckfestigkeit von  $3,0 \times 10^8$  Pa, wodurch eine massive Überlastung möglich ist, ohne zu riskieren, den Aufnehmer zu zerdrücken. Sogar, wenn der Aufnehmer über seinen zulässigen Messbereich hinaus überlastet wird, treten keine Schäden, Nullpunktverschiebungen, Ermüdungen oder Linearitätsänderungen auf. Für das Modell 201B03 von PCB mit einem Messbereich von 2,2 kN und einem Durchmesser von 16,5 mm bedeutet dies eine maximale Druckkraft von 13,3 kN entsprechend einem Überlastschutz von 600 %.

Bei sorgfältiger Betrachtung wird der Leser bemerken, dass einige piezoelektrische Quarz-Kraftaufnehmer mit ICP®- Ausgang für kleinere Messbereiche mit einer geringeren Überlastfestigkeit spezifiziert werden. Hier handelt es sich um eine elektrische Begrenzung und nicht um eine mechanische Schranke. Die meisten Kraftaufnehmer mit ICP®-Ausgang sind für 5 Volt Ausgangsspannung bei Vollausschlag im spezifizierten Messbereich ausgelegt. Allerdings liefert der Ausgang typisch eine Spannung von bis zu 30 V und mehr ohne Beschädigung. Verschiedene ICP®- Aufnehmer besitzen eine interne Schaltung, welche die Elektronik bis zu 100 V bei einer Schocküberlastung durch Aufprall schützt. Diese elektrische Überlast beträgt typisch das 6fache oder mehr der Nennkapazität. Z.B. hat das Modell 208C01 von PCB, das für 45 N bei 5 V zugelassen ist, eine Überlastgrenze von 450 N bei 50 V. Die mechanische Überlastung für diesen Kraftaufnehmer beträgt konstruktionsbedingt über 26 kN, also viel mehr als seine elektrische Grenze. Angenommen, der Prüftechniker überlastet den Aufnehmer elektrisch über die Grenze von 50 V (450 N) durch eine hohe Aufprallkraft mit einer Impulsbreite von 1  $\mu$ s. Die resultierende Belastung könnte die Elektronik zerstören. Die elektronische Schaltung des Kraftaufnehmers lässt sich jedoch als Modul ersetzen, so dass die Einheit nach einer Reparatur wieder in Betrieb genommen werden kann.

## 2. h. Empfindlichkeitsstabilität

Bei Alterungs- und Belastungsuntersuchungen von Kfz-Komponenten oder -Strukturen spielt die Langzeitstabilität eine bedeutende Rolle. Eine Dauerbeanspruchung der Aufnehmerstruktur in DMS-Messdosen kann Empfindlichkeitsänderungen verursachen, die häufig als geringere Empfindlichkeit in Druckrichtung[7] auftreten. Je nach Langlebigkeit einer Untersuchung muss sich der Techniker dieser Ermüdungserscheinung bewusst sein und die DMS-Messdose regelmäßig kalibrieren.

Quarz-Kraftaufnehmer sind in dieser Hinsicht überlegen, da sie aus einer Festkörperkonstruktion bestehen und Quarz, ein natürliches piezoelektrisches Sensorelement, keine Alterserscheinungen zeigt. Da Quarz-Elemente unter Belastung nicht wie DMS-Messdosen ausgelenkt werden, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Empfindlichkeitsänderung gering und eine häufige Kalibrierung damit überflüssig. Diese Umstände schlagen sich zeit- und kostensparend nieder.

Angenommen, ein Prüftechniker möchte einen 50-Hz-Dauertest für Zug und Druck über eine Dauer von einem Monat ausführen. Das entspricht insgesamt 129,6 Millionen Zyklen. Mit einer Messdose für 100 Millionen Zyklen müsste der Test mindestens einmal unterbrochen werden, um die Messdose zu ersetzen, da ihre zulässige Lebensdauer überschritten ist. Mit einem piezoelektrischen Quarz-Kraftaufnehmer braucht der Test nicht unterbrochen zu werden. Tatsächlich wurde bei einer dynamischen Anwendung in der Raumfahrt demonstriert, dass ein piezoelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer bei Testende nach 4 Milliarden Zyklen noch zufrieden stellend einsatzbereit war.



**2. i. Temperatureffekte**

Piezelektrische Quarz-Kraftaufnehmer können von -73 °C bis 204 °C betrieben werden. Allgemein erhältliche DMS-Messdosen besitzen einen nutzbaren Temperaturbereich von -54 °C bis 93 °C; auf besonderen Wunsch können auch DMS-Messdosen mit einer Betriebstemperatur bis zu 177 °C hergestellt werden. Ursache für diesen begrenzten Betriebstemperaturbereich bei DMS-Messdosen ist eine Kombination aus Schmelzpunkt des Lötmittels, Grundmaterial der DMS-Messdose und Kleber zur Befestigung der DMS auf der Metallstruktur des Aufnehmers[2]. Außerdem kann bei erhöhten Temperaturen der Isolationswiderstand der DMS-Messdose deutlich abnehmen, wodurch eine Nichtlinearität des Aufnehmers auftritt.

Wegen des Einflusses der Temperatur auf den DMS-Widerstand, der Fehlanpassung zwischen dem Dehnungskoeffizienten der DMS und der Aufnehmerstruktur und des Fehlableichs der Brücke erfordern diese Messdosen eine Temperaturkompensationsschaltung, um ein stabiles Ausgangssignal zu gewährleisten. Zu den verschiedenen temperaturbedingten Messfehlern zählen auch die Wärmeausdehnung, die Nullpunktstabilität, temperaturabhängige Empfindlichkeitsänderungen und die elektrische Last.

Piezelektrische Quarz-Kraftaufnehmer haben einen klar definierten Temperaturfehler, sein Temperaturkoeffizient beträgt typ. 0,05 %/°C. Um diesen Wert sinkt die Empfindlichkeit des Sensors bei ansteigender Temperatur. Bei einem Anstieg um 100°C sinkt die Empfindlichkeit um bis zu 5 % gegenüber dem im Kalibrierzertifikat angegebenen Wert.

**2. j. Kosten**

Für piezelektrische Quarz-Kraftaufnehmer- und DMS-Messdosensysteme entstehen vergleichbare Beschaffungskosten bezüglich Aufnehmer, Kabel und Signalverarbeitung. Ein repräsentativer Vergleich zwischen einem piezelektrischen Quarz-Aufnehmer, einer universell einsetzbaren DMS-Messdose und einer DMS-Messdose für Dauerbelastungsuntersuchungen findet sich in Tabelle 3. Im Vergleich sind ein Kabel mit einer Länge von ca. 3 m und ein Messverstärker, der eine analoge Ausgangsspannung liefert, berücksichtigt.

Der Vergleich basiert auf die Verwendung eines piezelektrischen

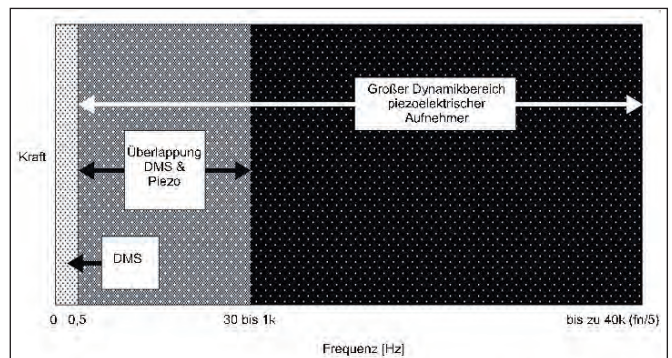
piezelektrische Quarz-Kraftaufnehmer Leistungs- und Kostenvorteile im Vergleich zu teureren Messdosen für Dauerbelastungsuntersuchungen.

**3. Fazit**

Obwohl die DMS-Technik allgemein bekannt und weit verbreitet ist, zeigen Vergleiche, dass Quarz-Kraftaufnehmer bei gewissen Anwendungen sowohl technische Vorteile als auch Kosteneinsparungen bieten können. Bei vielen Anwendungen gibt es Überschneidungen, wie Abbildung 7 zeigt.

Piezelektrische Quarz-Aufnehmer haben einen Frequenzgang von nahe DC (quasistatisch) bis zu mehreren kHz, während DMS-Messdosen auf „echt DC“ (echt statisch) bis zu mehreren zehn Hz beschränkt sind. Piezelektrische Quarz-Kraftaufnehmer zeichnen sich in dynamischen Anwendungen aus, wo ein weiter Frequenzgang, hohe Langzeitstabilität und besondere Haltbarkeit gefordert werden, während DMS-Messdosen für statische und sehr niederfrequente Messungen gut geeignet sind.

Weitere Vorteile der piezelektrischen Quarz-Technik sind: kleine Abmessungen, geringe Masse, erweiterter Messbereich, Überlastschutz, hohe Ausgangsspannung, weiter Betriebstemperaturbereich, niedrige Beschaffungs- und Lebenszykluskosten.



**Abbildung 7**  
Technologie-Überschneidung  
Piezelektrische Quarz-Aufnehmer im Vergleich zu DMS-Messdosen

**Vergleich Preis/Messkanal**

	Universeller piezelektrischer Quarz-Aufnehmer	DMS-Messdose	DMS-Messdose für Dauerbelastungsuntersuchungen
Bereich	20 kN	20 kN	20 kN
Systemkosten	€ 980,-	€ 1.210,-	€ 1.625,-

Quarz-Kraftaufnehmers im Ladungsbetrieb mit einem etwas teureren, aber umschaltbaren Ladungsverstärker. Gerade hier nehmen wir die Vorteile des großen dynamischen Messbereiches und der hohen Ausgangsspannung wahr. Derselbe Aufnehmer kann bis zum spezifizierten Bereichsendwert oder mit auch nur bis z.B. 10 % vom Skalenendwert verwendet werden. Hierdurch entstehen erhebliche Kosteneinsparungen im Vergleich zu mehreren benötigten DMS-Messdosen.

Die hohe Steifigkeit und Haltbarkeit piezelektrischer Quarz-Kraftaufnehmer bieten weitere wirtschaftliche Vorteile in Form von verlängerter Lebensdauer und längeren Kalibrierintervallen. Wie in Abschnitt 2.g. erwähnt zeigen sie keine Ermüdungserscheinungen nach Milliarden von Zyklen oder Veränderungen in ihrer Empfindlichkeit, da sie keine beweglichen Teile enthalten. Messdosen für Dauerbelastungsuntersuchungen sind z.B. für 100 Millionen Zyklen spezifiziert, bis das für die Konstruktion verwendete Material derart ermüdet, dass die Messdose ihre Spezifikationen nicht mehr einhalten kann. Bei bestimmten Alterungs- und Belastungsuntersuchungen im Automobilbau zeigen

**Bibliographie**

1. "Introduction to Piezoelectric Sensors," Lally, J.F., Institute of Environmental Sciences, Oct 1985
2. An Introduction to Measurements using Strain Gages, Hoffman, K., Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989
3. Random Vibration & Shock Testing, Tustin, W., Equipment Reliability Institute, 2005
4. "The Basics of Piezoelectric Sensors," Maines, R., Sensors, May 1989
5. Sensor Technology Handbook, Wilson, J., Newnes, 2005
6. "Getting the Most out of Strain gage Load Cells," Johnson, J. and Coffey, K., Sensors, May 2005
7. "Fatigue of Strain Gages," TN-508-1, Measurements Group, Inc., 1991

Hochwertige Messtechnik und Beratung aus einer Hand



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