

Konstruktionsprinzipien von Vibrationssensoren

Vibrationssensoren wandeln mechanische Beschleunigungen in elektrische Signale um und ermöglichen somit die Messung, Überwachung oder auch Regelung solcher Vibrationen mit elektronischen Geräten. Piezoelektrische Vibrationssensoren nutzen den piezoelektrischen Effekt von Quarz- oder Keramikkristallen zur Generierung eines elektrischen Signals, das proportional zum Vibrations- bzw. Schockverlauf ist.

Diese Sensoren wiederum werden dahingehend differenziert, wie genau und fehlerfrei sie die dynamischen Effekte und Einflüsse erfassen können. Dies erlaubt ihren Einsatz bei der Messung sinusförmiger oder stochastischer Vibrationen oder auch sehr schneller, transientenartiger Schockereignisse. Piezoelektrische Sensoren sind nicht dazu geeignet, statische Effekte wie z.B. die Erdbeschleunigung oder Anfahrbeschleunigungen bzw. Bremsverzögerungen zu erfassen. Ihr Einsatz ist möglich bei Frequenzen ab ca. 0,1 Hz, so dass sie durchaus in der Lage sind, seismische Signale zu erfassen.

Piezoelektrische Sensoren beinhalten keine beweglichen Teile, sie unterliegen also auch keinerlei Abnutzungserscheinungen. Hierdurch wird der Dauereinsatz solcher Sensoren auch in schwierigen Umgebungsbedingungen möglich.

Es gibt sehr unterschiedliche Arten des Aufbaus solcher Sensoren, jede von ihnen hat ihre Daseinsberechtigung für bestimmte Aufgabenstellungen. Allein schon aus diesem Grunde muss bei der Auswahl des geeigneten Sensors die Applikation und nicht das Sensor-Design im Mittelpunkt stehen. Jeder Anwender sollte sich darum nicht nur ausschließlich auf die üblicherweise spezifizierten Eigenschaften eines Sensors verlassen, sondern durchaus den Rat erfahrener Applikationsingenieure nutzen.

Die Funktionsweise piezoelektrischer Vibrationssensoren

Wie eingangs bereits erwähnt, nutzen die hier besprochenen Sensoren den piezoelektrischen Effekt von Quarz- oder Keramik-Kristallen zur Generierung eines elektrischen Signals mit hoher Proportionalität zur gemessenen Beschleunigung. Der piezoelektrische Effekt erzeugt eine Ansammlung von Ladungsträgern, deren Menge proportional ist zur Kraft, die auf den Kristall einwirkt. In Bild 1 wird die Verschiebung der elektrischen Ladungen, hervorgerufen durch die Auslenkung des Kristallgitters, gezeigt. Die großen Kreise stellen dabei Silizium-Atome dar, die kleinen Kreise die Sauerstoff-Atome des Quarzkristalls. Eine Kraft, die nun auf die Kristallgitterstruktur einwirkt, beeinflusst die Ausrichtung der positiven und negativen Ionen, was wiederum zur Ansammlung von geladenen Ionen an den gegenüberliegenden Oberflächen des Quarzkristalls führt.

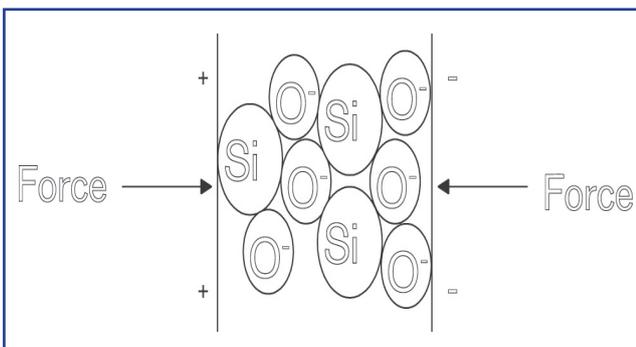


Bild 1: Ladungsverschiebung bei piezoelektrischen Materialien

In einem Vibrationssensor wird der piezoelektrische Effekt dadurch ausgenutzt, dass eine seismische Masse, die der jeweils herrschenden Beschleunigung unterliegt, eine Kraft auf das Kristallelement ausübt. Dieser Prozeß läuft entsprechend dem Newton'schen Gesetz über die Trägheit der Masse ($F = m \times a$) ab. Die Menge der akkumulierten Ladung ist proportional zu der aufgebracht Kraft, die aufgebracht Kraft wiederum ist aber proportional zur Beschleunigung. Elektroden sammeln diese Ladung, sie wird anschließend zu einem Verstärker übertragen, der entweder direkt im Sensorgehäuse untergebracht ist oder auch außerhalb des Sensors angeordnet sein kann. Sensoren mit internem Verstärker werden üblicherweise als ICP®-Sensoren bezeichnet (ICP® = integrated circuit piezoelectric, eingetragenes Warenzeichen der Firma PCB Piezotronics), wobei Sensoren ohne diese interne Signalaufbereitung als Sensoren mit Ladungsausgang bezeichnet werden. Erst nach der internen oder externen Aufbereitung

kann das generierte Signal an Aufzeichnungs- oder Überwachungsgeräte weitergeleitet werden.

Konstruktiver Aufbau von Vibrationssensoren

Die verschiedenen Ausführungen von Vibrationssensoren unterscheiden sich hauptsächlich dadurch, wie die Kraft der beschleunigten Masse auf das piezoelektrische Material einwirkt.

Nachfolgend werden die verschiedenen Prinzipien beschrieben und erläutert. Zu beachten ist, dass heutzutage fast ausschließlich das Shearprinzip aufgrund seiner positiven Eigenschaften Anwendung findet. Die übrigen, meist veralteten, Konstruktionsprinzipien seien aber der Vollständigkeit halber ebenfalls vorgestellt.

Shearmode - Aufnehmer

Beim Shearmode-Aufnehmer ist der Sensorkristall zwischen einem zentralen Pfosten und der seismischen Masse angebracht (Bild 2). Ein Schrumpfring erzeugt die Vorspannung, die für eine sehr steife Struktur erforderlich ist. Durch die Isolation des Sensorelementes vom Aufnehmerkörper und vom Aufnehmergehäuse, zeichnen sich Shearmode-Aufnehmer durch eine große Unempfindlichkeit gegenüber thermischen Effekten und Biegebeanspruchungen der Basis aus. Darüber hinaus ermöglicht das Shearmode-Design sehr kleine Abmessungen und ein geringes Gewicht des Aufnehmers, dies wiederum reduziert die Beeinflussung des dynamischen Verhaltens des Prüflings. Aufgrund dieser Eigenschaften hat sich das Prinzip der Shearmode-Aufnehmer heutzutage weitgehend durchgesetzt.

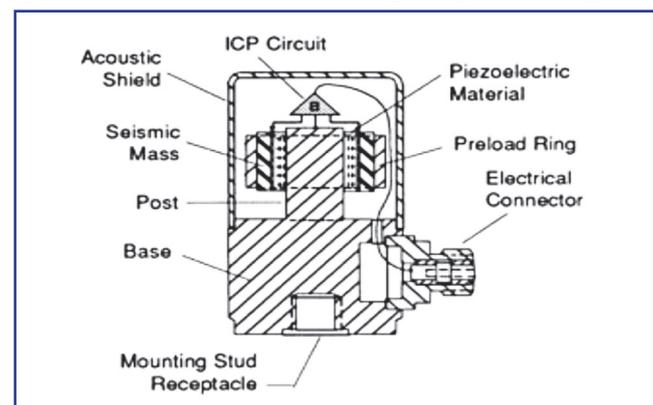


Bild 2: Aufbau eines Shearmode - Sensors

Compressionmode - Aufnehmer

Compressionmode-Aufnehmer waren früher die wohl am weitesten verbreiteten Vibrationsaufnehmer. Dies war vor allem auf ihren einfachen mechanischen Aufbau und auf den hierdurch günstigen Preis zurückzuführen. Bei Compressionmode-Sensoren unterschied man zwischen 3 verschiedenen Versionen.

Beim sog. **Upright-Compression-Sensor** (Bild 3a) wurde der Kristall praktisch in Form eines Sandwiches zwischen der seismischen Masse und der Basis des Aufnehmers angebracht. Ein Bolzen sorgte dabei für die notwendige Vorspannung. Durch eine Beschleunigung erhöhte oder verringerte sich die, durch die seismische Masse ausgeübte Kraft auf den Kristall so, dass eine zur Kraft proportionale Ladung erzeugt wurde.

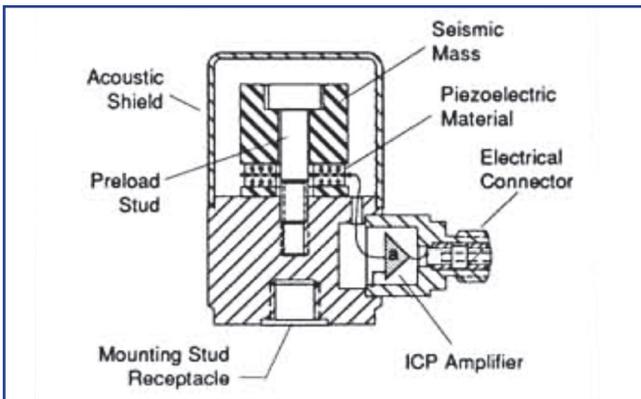


Bild 3a: Aufbau eines Upright-Compression-Sensors

Je größer die seismische Masse nun war, umso größer das elektrische Ausgangssignal. Aufgrund der extremen Steifigkeit der Struktur zeigten Upright-Compression-Sensoren besonders hohe Resonanzfrequenzen, hierdurch erklärte sich der sehr große nutzbare Frequenzbereich. Durch den sehr engen Kontakt des Sensorkristalls mit der Basis des Aufnehmers, war es verständlich, dass Compression-Aufnehmer von Natur aus empfindlich waren gegenüber Biegebeanspruchungen der Basis. Diese Effekte führten zu Fehlersignalen, wenn solche Aufnehmer auf sehr dünnen Metallteilen montiert wurden. Auch thermisch instabile Umgebungsbedingungen konnten sich vor allem bei der Messung sehr niederfrequenter Beschleunigungen negativ auf das Messergebnis auswirken.

Beim **Inverted-Compression-Design** (Bild 3b) war dagegen das Sensor-Element weitgehend von der Basis isoliert, hierdurch ergab sich eine reduzierte Empfindlichkeit gegenüber Biegebeanspruchungen der Basis und auch gegenüber thermischen Effekten. Aus diesen Gründen wurden Sensoren, die als Kalibriersensoren verwendet wurden, häufig nach diesem Verfahren hergestellt.

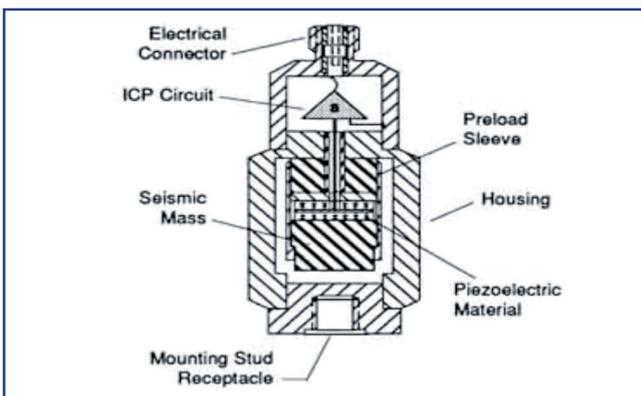


Bild 3b: Aufbau eines Inverted-Compression-Sensors

Eine weitere Verbesserung ergab sich jedoch durch das sog. **Isolated-Compression-Design** (Bild 3c). Hier wurde durch die mechanische Isolation des Sensorkristalls von der Aufnehmerbasis und einem speziellen Aufbau der seismischen Masse, die hier als thermische Isolation wirkte, eine weitere Verbesserung des Temperaturverhaltens erreicht. Diese Aufnehmer eigneten sich aus diesem Grunde vor allem für

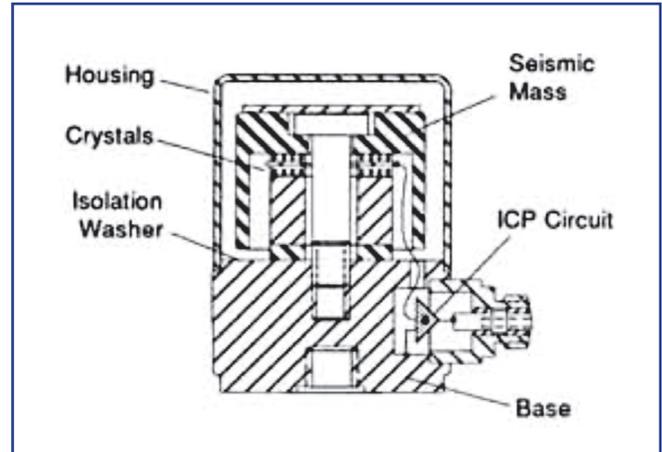


Bild 3c: typisches Isolated-Compression-Design

die Untersuchung niederfrequenter Vorgänge, da Fehler durch Temperaturschwankungen das Meßergebnis nicht beeinflussen konnten.

Der Flexural- oder Beam-Aufnehmer

Diese Aufnehmer beinhalteten ein balkenförmiges Sensorelement, das mittig gelagert ist (Bild 4). Dabei konnte das Sensorelement auch mit einem Trägerbalken verbunden sein, wodurch der Grad der Biegebeanspruchung bei einer gegebenen Beschleunigung stieg. Dieser Sensoraufbau ermöglichte die Konstruktion sehr flacher Sensoren, die dazu noch äußerst leicht sein konnten. Darüber hinaus boten solche Sensoren eine gute thermische Stabilität zu einem recht günstigen Preis. Auch die Empfindlichkeit gegenüber Querschleunigungen war extrem gering. Allgemein kann gesagt werden, dass Vibrationsensoren nach diesem Prinzip gut geeignet waren für Einsatzfälle,

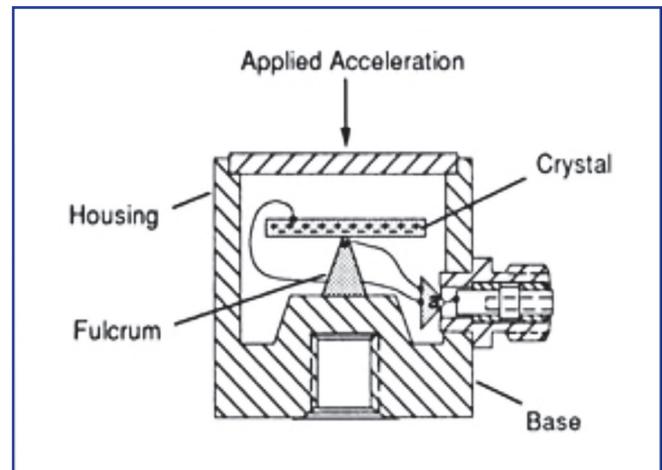


Bild 4: Flexural- oder Beam-Aufnehmer

wo relativ niedrige Beschleunigungen bei niedrigen Frequenzen erfaßt werden sollten, wie es z.B. im Bereich der Strukturuntersuchungen der Fall ist. Für den robusten Einsatz im Versuch sind solche Sensoren jedoch aufgrund der geringen Überlastsicherheit nicht geeignet.

**Wichtig: Das piezoelektrische Material**

Generell gibt es zwei verschiedene piezoelektrische Materialien, die zur Herstellung von Vibrationsaufnehmern verwendet werden. Dies sind Quarz oder polykristalline Keramik. Bei Quarz handelt es sich um einen natürlichen Kristall, während die Keramik-Kristalle künstlich gezüchtet werden. Jedes dieser piezoelektrischen Materialien hat bestimmte Eigenschaften, die sich je nach Anwendung des Vibrationsensors zu Vorteilen entwickeln lassen.

Quarz ist allgemein bekannt aufgrund seiner weiten Anwendung in modernen Geräten, als Bestandteil genauer Timer für Computer, Uhren aller Art oder auch Radios. Vibrationssensoren können von verschiedenen Eigenschaften des Quarzes profitieren. Quarz ist als das stabilste piezoelektrische Material anerkannt. Dies begründet die hohe Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit von Vibrationssensoren auf Quarzbasis. Darüber hinaus weist Quarz praktisch keinerlei pyroelektrische Effekte auf, d.h. Quarz generiert keine Ladungen aufgrund von Temperaturveränderungen. Hierdurch arbeiten solche Sensoren auch in thermisch aktiven Umgebungen sehr stabil. Darüber hinaus hat Quarz eine relativ niedrige interne Kapazität, die resultierende Spannungsausbeute ist im Vergleich zu keramischen Sensoren hoch, was wiederum ideal ist für die Anwendung in Sensoren mit interner Elektronik (ICP®-Sensoren).

Umgekehrt ist die Ladungsausbeute bei Quarz geringer als die von keramischen Sensoren, hieraus erklärt sich die relativ seltene Verwendung von Quarzsensoren in Meßketten mit externen Ladungsverstärkern, die sich wiederum besonders durch ihr geringes Rauschen auszeichnen. Quarz kann aufgrund seines Curie-Punktes bei Arbeitstemperaturen bis ca. 315 °C eingesetzt werden.

Je nach Anwendungsfall werden eine Vielzahl von keramischen Materialien für die Herstellung von Vibrationssensoren verwendet. Alle keramischen Materialien werden künstlich erzeugt und erst durch einen Polarisationsprozess - hierbei wird das Material unter Einwirkung hoher Temperaturen einem starken elektrischen Feld ausgesetzt - in ein piezoelektrisches Material verwandelt. Unglücklicherweise versucht sich dieser Prozess über die Zeit umzukehren, bis er entsprechend einer Exponentialfunktion stabil bleibt. Wird jedoch ein keramisches Material sehr hohen Temperaturen oder elektrischen Feldern ausgesetzt, die größer sind als die beim Polarisationsvorgang, werden die piezoelektrischen Eigenschaften zerstört oder zumindest erheblich reduziert. Ein Vorteil der Keramik ist, dass die verschiedensten Kristallgeometrien relativ einfach hergestellt werden können und nicht, wie bei Quarz, unter Beachtung der Polarität, „aus dem Vollen“ geschnitten werden müssen.

Eigenschaften optimiert für die jeweilige Applikation

Folgt man der Einleitung dieses Artikels, so bestimmt also konsequenterweise die Meßaufgabe, welches Sensor-Design und welches Sensormaterial das jeweils optimale ist. Entsprechend stellt sich das Lieferprogramm von PCB-Piezotronics dar. Neben Shearmode-Aufnehmern auf Quarzbasis für den universellen Einsatz findet man eine Vielzahl von Sensoren für die unterschiedlichsten Einsatzfälle wie z.B. Tiefsttemperaturanwendungen, für Modalanalysen oder seismische und triaxiale Messungen. Der mechanische Aufbau dieser Sensoren ist unterschiedlich, es wurde jeweils das Design ausgewählt, das den jeweiligen Anforderungen am besten entspricht. Ähnliches gilt auch für das Sensormaterial. So werden bei PCB Piezotronics verschiedene Arten keramischen Materials verwendet. Für Sensoren mit Arbeitstemperaturen bis 482 °C z.B. wird ein spezielles keramisches Material verwendet, was eigens im Hause PCB hierfür hergestellt wird. Aus den sich hieraus ergebenden Kombinationen von unterschiedlichem Sensor-Design und -Material bieten sich für den Anwender nicht nur meßtechnisch optimale Lösungen, sondern auch durchaus wirtschaftlich äußerst interessante Alternativen zu bisher verfügbaren Produkten.



Hochwertige Messtechnik und Beratung aus einer Hand

 **PCB SYNOTECH** GmbH

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