

von D. Theiß 13.12.2000

Thema:

Piezoelektrische Kraftaufnehmer kontra DMS-Kraftaufnehmer

Zwecks besseren Verständnisses der Anforderungen und Problematik soll eine Kurzeinführung zum piezoelektrischen Effekt vorangestellt werden.

Bei mechanischer Beanspruchung (Krafteinwirkung) werden bei gewissen anisotropen Kristallen an bestimmten Kristallflächen elektrische Ladungen erzeugt, bzw. die Deformationen bewirken elektrische Ladungsverschiebungen.

Neben dem hexagonal kristallisierenden Quarz (SiO_2) als Monokristall, kommen auch für Spezialanwendungen polykristalline Keramiken (Piezokeramik), z.B. Bariumtitanat, zur Anwendung.

Hauptunterschied zum Quarz ist, dass eine künstliche Polarisierung – die gewissermaßen eingefroren wird – notwendig ist. Dafür ist bei Piezokeramiken aber der piezoelektrische Effekt um den Faktor 100 und mehr größer. Die messtechnischen Eigenschaften sind jedoch sehr schlecht, so dass für die gängige Kraftmesstechnik quasi nur Quarzaufnehmer eingesetzt werden.

Der piezoelektrische Effekt ist im Gegensatz zum DMS ein direktes Wandlungsprinzip, wobei rein physikalisch eine sehr gute Linearität im Übertragungsverhalten und keine Hysterese besteht. Die aufgebrachte Kraft ist streng proportional zur Ladungsänderung.

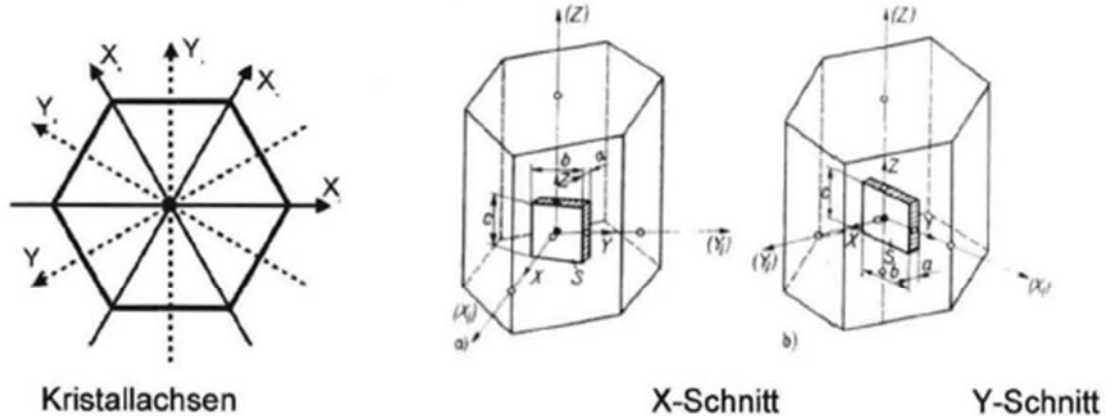
Quarz kristallisiert in 6-eckigen Prismen.

Unterschieden werden 3 elektrische Achsen ($x_{1,2,3}$ -Achsen), 3 neutrale Achsen ($y_{1,2,3}$ -Achsen) und die auf beiden senkrecht stehende, polare (optische) Achse (z-Achse).

x-Achse ist die Verbindung der Eckpunkte (Kanten)

y-Achse ist die Verbindung der Flächenmitten

(s. Skizze)



Die Wandlerelemente werden in der Regel als Scheiben oder Quader in 2 Orientierungen aus dem Kristall herausgeschnitten (x-Schnitt bzw. y-Schnitt. x- und y-Achse stehen senkrecht aufeinander.

x-Schnitt (üblich für Einkomponenten-KA):

x-Achse des Wandlers fällt mit der x-Achse des Quarzes zusammen. Eine Kraft auf die x-Achse oder y-Achse erzeugt eine elektrische Ladungsänderung. Unterschieden wird:

Longitudinaler Effekt:

Messkraft wirkt in x-Richtung, Abnahme der Ladung auf den x-Flächen. Die Ladungsgröße bzw. -menge ist unabhängig von der Fläche, d.h. der Größe der Quarzscheibe. – Übliche Nutzung –

Transversaler Effekt:

Messkraft wirkt in y-Richtung, Abnahme der Ladung auf den x-Flächen. Die Ladungsmenge ist von den geometrischen Maßen des Quarzes abhängig - seltene Nutzung –

Y-Schnitt (Einsatz vor allem für Mehrkomponenten-KA)

x-Achse des Wandlers fällt mit der y-Achse des Quarzes zusammen. Es ist keine Empfindlichkeit gegenüber Normalspannungen (Kraft in x-Richtung) gegeben. Dagegen erzeugen Kräfte in der x-y-Ebene, also Schubkräfte, verstärkt Ladungsverschiebungen.

Zu den Piezokeramiken zusammengefasst nur soviel:

Einsatz für Massenanwendungen, insbesondere für Drucksensoren:

Vorteil liegt in der nahezu beliebigen Formgebung durch Pressen und abschließendem Sintern. Trotz sehr hohem Piezoeffekt verbietet sich der Einsatz für die gängige Kraftmesstechnik, aus folgenden Gründen: (gilt im wesentlichen nur für die Piezokeramik)

- der piezoelektrische Effekt ist abhängig von der mechanischen Beanspruchung (große Nichtlinearität).
- der piezoelektrische Effekt ist abhängig sowohl von der elektrischen als auch von der mechanischen Vorgeschichte.
- der piezoelektrische Effekt zeigt Sättigungsverhalten (große Hysterese).
- der piezoelektrische Effekt ist abhängig von der Einsatzfrequenz, dynamisches Verhalten.
- der piezoelektrische Effekt unterliegt starken Alterungserscheinungen (Langzeitdrift).
- der piezoelektrische Effekt ist stark von der Temperatur abhängig (ausgeprägter pyroelektrischer Effekt).
- der endliche Isolationswiderstand bedingt nur den Einsatz für dynamische Messungen.

Im Hinblick auf die Massensensorik (für Druck, Beschleunigung, Temperatur), z.B. im Automobilbereich, sind und werden spezielle Entwicklungen zur Minderung der Störeinflüsse durchgeführt.

Der Einsatz in der „normalen“ Kraftmesstechnik ist nach wie vor nicht gegeben.

Die Hersteller von Quarz-Kraftaufnehmern, im wesentlichen Fa. Kistler und Fa. PCB (USA), in Deutschland vertreten durch die Fa. Synotech führen gerne folgende Argumente als wesentliche Vorteile der Piezotechnik gegenüber der DMS Technik an:

- a) hoher Ausnutzungsgrad – Meßbereich über 3 Zehnerpotenzen
- b) hohe Auflösung bis zu 10^{-6} ; Standard 10^{-6}
- c) direkte Wandlung; Kraft → elektrisches Signal
- d) keine komplexen Konstruktionen zur mechanischen Störunterdrückung oder Komponententrennung?
- e) kompakte, robuste Bauweise

- f) geringes Übersprechen gegen mechanische Störkräfte sowie bei MK-Systemen der Komponenten zueinander
- g) hohe Eigenfrequenz, da große Steifigkeit
- h) als einziger Nachteil: statische Messungen über längere Zeit sind nicht möglich

Die Argumente sind weitestgehend rein theoretischer Natur und beziehen sich immer nur auf die Betrachtung der reinen Quarzscheibe, die auch noch ideal sein müßte.

Gegenargumente:

Prinzipiell ist mit folgenden Problemen, bedingt durch die praktische Realisierung und dem begleitenden Kosteneinfluß auf Vereinfachungen zu rechnen:

- I. Schnittfehler – Treffsicherheit der Achsen
- II. Problem der Kristallreinheit (Homogenität)
- III. Planheit und Planparallelität der Scheiben bzw. Quader
- IV. Ankopplung der Quarzscheiben zueinander, insbesondere bei Quarzsäulen-Aufnehmern
- V. Ankopplung der Krafterleitungsteile
- VI. Kraftnebenschlussbetrieb
- VII. Vorspannungseinflüsse
- VIII. Ladungsabfluß durch endliche Isolationswiderstände

Nähere Problemerkäuterungen und daraus resultierende Gegenargumente:

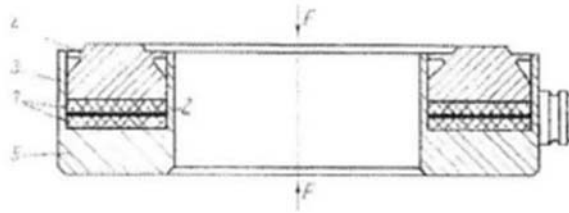
Zu I.) Schnittfehler führen insbesondere zu größerem Störkomponenteneinfluß. Minimierung ist mit hohem Mess- und Fertigungsaufwand verbunden, was sich auf die Kosten niederschlägt.

Zu II.) Das Problem ist heute weitestgehend durch die moderne Kristallziehtechnik gelöst.

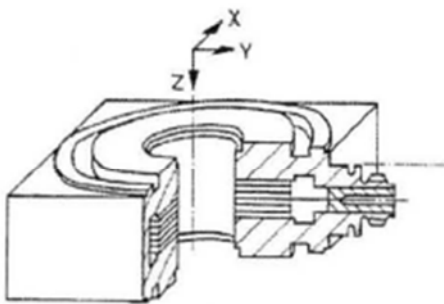
Zu III.) + IV.)

Bei den hauptsächlich eingesetzten Longitudinalwandlern fällt die Belastungsfläche mit der Kontaktierungsfläche zur Abnahme der Ladung zusammen. Die Kontaktierung erfolgt in der Regel über metallische Bedampfung. Das Einkörper-(Scheiben-) prinzip ist praktisch nicht einsetzbar. Das Material der Krafterleitungsteile muss aus Festigkeitsgründen metallisch, meist aus Stahl,

einleitungsteile muss aus Festigkeitsgründen metallisch, meist aus Stahl, sein. Außerdem muss die Quarzscheibe gefasst werden. Beides führt zu erheblichen Isolationsproblemen. Daher werden stets Scheibenpaare, auch mehrfach als sogenannte Säulenausführung derart benutzt, daß 2 gleichpolige Kontaktflächen aufeinander liegen. Damit bilden die Krafteinleitungsteile einen gemeinsamen Pol, isoliert zum innen (mittig) liegenden Gegenpol.

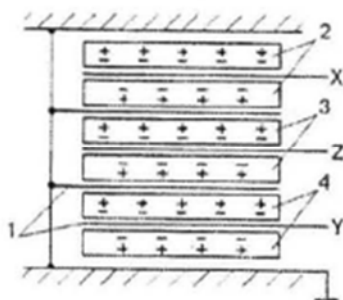


Einkomponenten Quarzakraftaufnehmer (ringförmig)



Beispiel für Säulenausführung und Verschaltung
(prinzipiell gleich ob Einkomp.- oder Mehrkomponentensystem;

beim Einkomp. Sind x-,y-,z- Anschlüsse verbunden.



Die Scheiben werden gestapelt, so daß sie kraftmäßig in Reihe, elektrisch jedoch parallel geschaltet sind.

Damit ist zwar das Isolationsproblem recht gut zu lösen, aber Abweichungen an Planheit und Planparallelität bringen nicht unerhebliche Probleme und Fehler.

Es entstehen Spalte und keine idealen flächenhafte, sondern punktförmige Berührungsstellen.

Der Stapel wird weicher.

Dies heißt Verlust an Steifigkeit und führt zum anderen aber auch zu beachtlichen Unlinearitäten infolge Veränderung der Vorspannungsverhältnisse.

Die Quarzscheibe hat zwar integrierenden Charakter, d.h. die erzeugte Ladungsmenge (-verschiebung) über die Gesamtfläche wird summiert und es ist gleichgültig ob eine große Ladungsmenge an Punkten hoher Beanspruchungsdichte oder aber viele geringe Mengen an vielen, weniger beanspruchten Flächenelementen erzeugt werden ⇒ die Summe bleibt gleich -

Wäre da nicht die notwendige mechanische Vorspannung, die als Kraftnebenschluß wirkt und beachtlich ist.

Auch für reine Druckkraftaufnehmer muss aus Gründen der Spaltproblematik und anderer Ursachen (siehe Pkt. VI und VII) vorgespannt werden.

Nichtlinearitäten von 1% - endwertbezogen! – sind üblich !

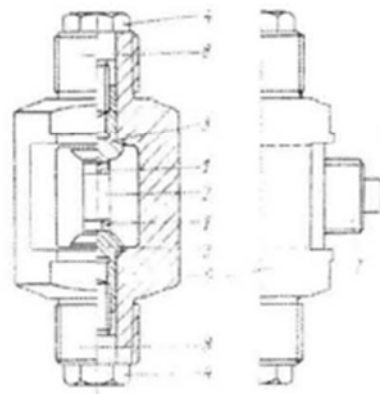
Die Steifigkeit „guter“ Quarzaufnehmer ist trotz der Spaltprobleme allerdings mindestens um den Faktor 10 größer als die „steifer“ DMS-Kraftaufnehmer. (Scherkraftaufnehmer).

Zu V.-VII.

Die Belastbarkeit der Quarzscheiben (meist 1mm dick) wird mit ca. 150 N/mm² angegeben. Die Krafteinleitungen haben Flächenverteilerfunktion.

D.h., daß die aktive Quarzscheibe eines 10 kN-KA theoretisch einen Durchmesser von ca. 9,5 mm hat.

Die verfügbaren Quarzscheibengrößen sind aber begrenzt, und zwar nach oben wie nach unten. Werte sind mir unbekannt und aus den angebotenen Aufnehmermaßen nur grob zu ermitteln. Die obere Grenze liegt im Bereich von 10-15 mm, d.h. F= 10...30kN. Größere Nennkräfte können nur als im Kraftnebenschluß messende Systeme ausgelegt werden. Dies wird auch durch verschiedene Ablichtungen von



Kraftaufnehmern deutlich.

Zug-/Druckaufnehmer

Der „Kraftnebenschuß“ ist so groß, daß er den Hauptanteil des Kraftflusses aufnimmt und der Meßwandler selbst quasi nur noch wenige % des eigentlichen Kraftflusses sieht. 1-2 % sind durchaus nicht selten.

Für kleinere Nennkräfte wird die Grenze durch die Miniaturisierungsmöglichkeit begrenzt, wobei dies auch dazu führt, daß auch hier nur im „Kraftnebenschuß“ gemessen werden kann.

Für den Einsatz als Zug- oder Zug/Druckkraftaufnehmer ist die notwendige Vorspannung des Systems noch einmal entsprechend zu erhöhen.

Damit verbunden sind erhebliche Fehler und messtechnische Qualitätsverluste in Bezug auf

- Nullpunktstabilität
- Temperaturverhalten
- Anforderungen an die Präzisionskraftmesstechnik (besser als 0,5 % Gesamtfehler im Vergleich zur DMS-Technik)

Zu VIII.)

Der piezoelektrische Effekt bewirkt Ladungsverschiebungen ΔQ , die an den Elektroden (X-Flächen) der Quarzscheibe anstehen. Es wird also keine elektrische Spannung erzeugt!

Elektrische Ladungen können nur mittels hochverstärkender Ladungsverstärker ($V > 20.000$) mit extrem hohem Eingangswiderstand gemessen werden.

(Näher soll hier nicht auf die Ladungsverstärker eingegangen werden).

Wichtig ist, daß alle Isolationswiderstände extrem groß sein müssen, auch die der Gegenkopplungskondensatoren. Da diese aber nicht unendlich sind, fließt sozusagen Messladung ab, was zu Messfehlern führt.

Für quasi statische Messungen ist die untere Grenzfrequenz f_u des Systems maßgebend. Diese ergibt sich zu

$$\omega_u = 1 / (R_{ges} * C_{ges}) = 1/T_{ges}$$

Sehr gute, typische Werte für sogenannte Präzisionsquarzaufnehmer und Ladungsverstärker sind:

$$R_{ges} = 10 \text{ G}\Omega \quad C_{ges} = 100 \text{ pF}$$

Daraus folgt $T_{ges} = 10^3$ Sekunden

$$f_u = \omega_u / 2 \pi = \text{ca. } 1,6 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

Dies erscheint ausreichend niedrig zu sein, bedeutet aber, daß bei einem Kraftsprung bereits nach 1 Sekunde schon 0,1 % der Ladung abgeflossen sind, nach 10 Sekunden 1 %.

Solange $t \ll T_{\text{ges}}$ ist, kann von einem proportionalen Abfluß ausgegangen werden. Für quasi statische Aufnehmerkalibrierungen reicht dies aus,