

Studieverzameling

Hoe werkt een Piëzo weegschaal ?

P.J. Trimp

Een piëzo weegschaal werkt op basis van het piëzo effect. Piëzo komt van het griekse woord voor drukken (= πιεζω). Het piëzo effect is in 1880 ontdekt door de broers Pierre en Jacques Curie. Bepaalde materialen bezitten op basis van hun kristal structuur het zgn. piëzo effect. Dit effect treedt op bij materialen met een kristalrooster dat symmetriecentra bezit die niet meer samenvallen bij het belasten met een mechanische kracht. Het niet meer samenvallen van de symmetrie centra uit zich in een lading opbouw aan de kristaloppervlakken van het kristal.

Het Piëzo-effect is overigens een reversible effect. Een kracht uitgeoefend op een kristal geeft een lading en/of een spanning als resultaat, maar omgekeerd geeft een spanning aangesloten op de kristalvlakken aanleiding tot een inwendige mechanische kracht. De uitwijking (uitzetting of inkrimping) van het kristal is overigens heel klein en bedraagt enkele nanometers en is afhankelijk van het gebruikte materiaal, kristal grootte en de hoogte van de aangelegde spanning.

Piëzo kristallen worden overigens in vele gebieden van techniek gebruikt. Men kan denken aan:

- Versnellingsensoren
- Oscillatoren (opwekken van heel stabiele frequenties) denk aan Quartz horloges
- Sonar Transducers
- Gasontsteking apparatuur
- Atoom Force Microscope
- Ultrasonische reiniging apparatuur
- Inchworm (verplaatsingsactuator)
- Zoemers (Buzzers) (t.b.v. alarmering, denk aan de brandmelders in huis)



De reden van de vele toepassingen houdt direct verband met het feit dat de kristallen heel goedkoop en in grote hoeveelheden geproduceerd kunnen worden. De prijs van bijvoorbeeld PXE-kristallen (PXE staat voor ceramic Crystals) voor algemene toepassingen ligt in de buurt van 0,20 eurocent per kristal. Het materiaal is hard, sterk, chemisch inert en ongevoelig voor vochtigheid. Verder heeft het een lekweerstand in de buurt van 10¹² ohm.

Naast de boven genoemde piëzo-kristal toepassingen is er ook een piëzo weegschaal gemaakt voor onderwijs doeleinden. Bij het college voor Elektronische Instrumentatie wordt het piëzo elektrisch effect behandeld en m.b.v. verschillende college demonstraties nader toegelicht.

Een van deze demo's is de piëzo weegschaal. Het principe schema van de piëzo weegschaal is weergegeven in figuur 1.

Verder is op de foto's te zien hoe de weegschaal er in werkelijkheid uitziet. De bovenste foto toont de weegschaal in de toestand waarop hij klaar is voor gebruik. Deze foto toont dus zowel het basis (onderste) deel waarin de batterijen, de uitlees elektronica en de schakelaars zijn ondergebracht. Terwijl het afneembare bovendeel de elektrode aansluitingen bevat voor de

aansluitingen voor de kontaktingen met de bovenste contact vlakken van de kristallen.

Hierbij moet een opmerking gemaakt worden over de tekening waarop de weegschaal op de foto is geplaatst. Deze tekening lijkt heel veel op de werktuigbouwkundige tekening van de weegschaal; echter dit is niet juist. De tekening heeft niets met de bouwtekening van de weegschaal te maken, maar is er per ongeluk mee verwisseld.

Op de tweede foto is prachtig het inwendige van het onderste deel van de weegschaal te zien.

We zien op deze foto de batterijen compartimenten. Verder zijn de drie losse piëzo kristallen goed te zien. Het metalen blikken doosje bevat een kleine PCB (= Printed Circuit Board) waarop een elektrometer opamp is aangebracht. De grote aluminium schroef is een afsluitschroef voor het blinde gat daaronder. In dit gat kunnen de losse piëzo kristallen worden bewaard.

In figuur 1 zijn drie kristallen weergegeven waarop een kracht F werkzaam is.

Deze kracht wordt verdeeld over de drie kristallen. Ieder kristal krijgt $1/3F$. Er wordt in totaal een lading $Q = F \cdot S_q$ opgewekt. In deze formule is: Q de lading op het bovenste oppervlak van het

kristal; F is de kracht in Newton en Sq is de ladingsgevoeligheid van het kristal met als eenheid de hoeveelheid lading in Coulomb per Newton (C/N). Echter in bovenstaand schema kan er geen lading over het kristallen worden opgebouwd omdat de spanning over het kristal nul is. Immers het potentiaal verschil tussen de plus- en de min-ingang van de opamp is nagenoeg nul. Als er in fig.1 een kracht F op het bovenvlak van de weegschaal wordt uitgeoefend, dan zal de daarbij behorende lading direct worden overgebracht naar de feedback condensator C_f . In feite worden de drie kristalladingen opgeslagen in de condensator C_f . De lading wordt op deze manier omgezet naar een spanning welke aan de uitgang van de versterker beschikbaar is. Deze spanning U_o kan met een spanningsmeter worden gemeten.

Men zou kunnen denken waarom die versterker nu eigenlijk nodig is. Immers de kristallen zelf, zonder de versterker, wekken óók een spanning op. Deze gedachte is volkomen juist. Echter hoe

kan men de spanning over het kristal (lees capaciteit) meten?

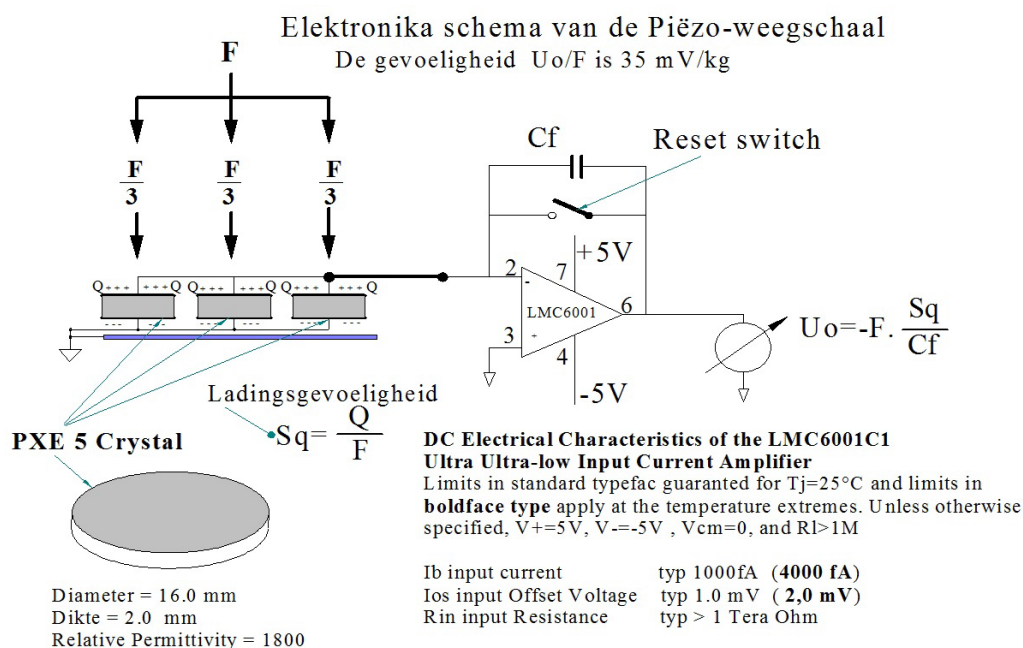
Men zou kunnen denken dat dit tegenwoordig met héél goede spanningsmeters gemeten kan worden; immers de ingangsimpedantie van een digitale spanningsmeter is doorgaans 1Gohm. De capaciteit van één kristal is 1,7 nF. Van drie parallel geschakelde kristallen is de capaciteit 5,1 nF. Als men het kristal aansluit op de spanningsmeter dan gaat er meteen een ontladstroom vloeien en daarmee wordt de spanning over het kristal alsmaar kleiner.

De tijdconstante bij deze spanningsmeting is: $\tau = 3 \times C_{\text{crist}} \times R_{\text{in}} = 3 \times 1,7 \cdot 10^{-9} \times 1 \cdot 10^9 = 5,1 \text{ sec}$. Het is duidelijk dat het niet makkelijk is om handmatig even snel met een digitale spanningsmeter de spanning te meten. Na zo'n 30 sec is overigens bijna alle lading volledig weggevloeid.

Men zou nog kunnen inbrengen dat men in de praktijk de spanning niet handmatig meet maar met een data acquisitie systeem zal meten. Een snel data acquisitie systeem kan binnen 10

μs een 12bits meting uitvoeren; echter een data acquisitie systeem heeft in het algemeen een veel lagere ingangsimpedantie dan een moderne digitale multimeter. De impedantie blijkt 100 kohm te zijn. Deze tijdconstante is daarmee tienduizend keer kleiner geworden dan bij de multimeter en daarmee is de tijdconstante verlaagd tot 510 μs .

De onnauwkeurigheid in de meting van de kristalspanning is daarmee dan toch nog 2%. Dan kan het nog zijn dat men daar tegen in kan brengen dat de moderne multimeter niet alleen een hoge impedantie heeft, indien hij in de spanningsmode is geschakeld, maar dat zij ook via een zgn. HP-IB connectie met een computersysteem kan worden verbonden. Dit is een correcte gedachte. Echter óók de moderne multimeters werken volgens het principe van de "integrerende AD-converters". Dit zgn. dual-slope principe is gekoppeld aan de netfrequentie van 50 Hz van de netspanning. Per 20 msec wordt er middels een integratie een spanningsmeting uitgevoerd. Maar desal-



Figuur 1 In deze figuur is het elektronisch schema van de Piëzo-weegschaal weergegeven. De weegschaal is om praktische redenen met drie identieke kristallen uitgevoerd. De kristallen zijn parallel geschakeld. Er wordt gebruikgemaakt van ladingsuitlezing. Er is gekozen voor een elektrometer opamp.

De terugkoppel condensator $C_f=1,7 \text{ nF}$ en kan met de reset schakelaar ontladen worden.

niettemin is het mogelijk om op deze manier een spanning over het kristal te meten; immers de tijdconstante is dan weliswaar weer herstelt naar 5,1 sec en de meetnelheid is 20 ms per meting. De meet onnauwkeurigheid is nu verminderd tot 0,4%.

De onnauwkeurigheid wordt berekend met de formule: $U_o = U_{crist.e}^{-t/\tau}$
Met $\tau = 5,1$ sec en $t = 20$ msec.

Voor deze redelijke nauwkeurigheid van 99,6% is echter wel een dure multimeter nodig tezamen met een computer.

Hiermee is het enigzins aannemelijk gemaakt, dat bovenstaande meetopstelling zoals weergegeven in figuur 1 toch grotere voordelen heeft t.o.v. het hierboven beschreven meetprocedure met een multimeter en een computer. Immers men kan de kracht F werkend op het stelsel van drie kristallen heel eenvoudig uitlezen met behulp van een zgn. elektrometer operationele amplifier. Zo'n elektrometer opamp kost wel iets meer dan een gewone opamp maar zijn werking, behuizing en aansluitingen zijn hetzelfde als van een standaard opamp. Op het eerste gezicht is er geen verschil te zien tussen beide opamps.

Maar een elektrometer opamp kost bijvoorbeeld rond de € 50,- terwijl een gewone (general purpose op amp) voor minder dan € 2,- aangeschaft kan

worden.

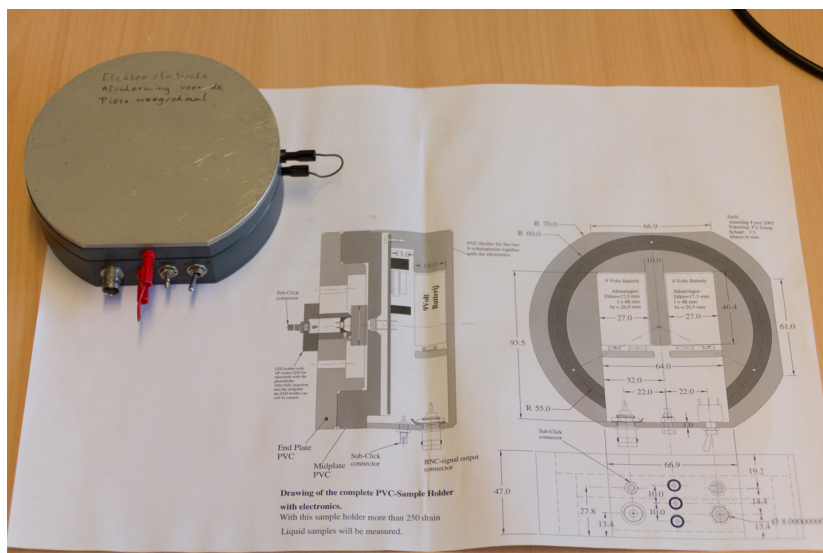
Zo'n elektrometer op amp heeft echter héél goede ingangparameters, zo is de ingangsbias stroom 1000 fA (femto Ampère). 1000 fA komt overeen met 1000.10⁻¹⁵ Ampère. Als we bedenken dat de lading van een elektron gelijk is aan 1,6.10⁻¹⁹ Coulomb dan wil dat zeggen dat de biasstroom bestaat uit ruim 6,25 miljoen elektronen per seconde! De biasstroom is zo klein dat je de elektronen bijwize van spreken zou kennen tellen! Er zijn overigens elektrometer opamps met een nóg veel kleinere biasstroom; te denken valt aan 50fA.

Het is nu direct duidelijk dat een dergelijke opamp de gegenereerde lading veroorzaakt door de kracht F en opgeslagen in de capaciteit Cf nauwelijks zal beïnvloeden. De college demo met de piëzo weegschaal laat dit ook aan de studenten zien. De proef wordt aan het begin van het college uitgevoerd en 45 minuten later wordt aan het einde van het college wederom naar de uitgangsspanning gekeken. De spanning is nagenoeg onveranderd op de uitgang van de versterker aanwezig. Uit de kleine spanningsverandering die met een digitale spanningsmeter vóór en de ná de 45 minuten bepaald kan worden geeft dan ondubbelzinnig de grootte van de biasstroom.

Een dergelijke schakeling m.b.v. een elektrometer versterker vergt wel wat praktisch inzicht bij het bouwen van de schakeling. Immers er is uitgelegd dat de biasstroom van de opamp heel klein is. Dat kan alleen maar als de fabrikant van een dergelijke versterker een mould gebruikt met een extreem hoge isolatie weerstand bij het inkapselen van de chip. Als de versterker in een isolatie materiaal wordt ingekapseld waarvan de isolatie onvoldoende is dan worden de eigenschappen van de versterker t.a.v. de biasstroom volledig teniet gedaan.

Een elektrometer opamp mag je dus ook nóóit met je vingers vastpakken, doe je dat wel dan komt er wat huidvet op de opamp waarmee de hoge isolatie waarde van de behuizing wordt weggevaagd. De opamp is dan niet stuk maar hij voldoet dan niet meer aan zijn specificaties. De biasstroom blijkt dan ineens vele malen groter te zijn geworden en vaak ook nog met een veel grotere drift.

Een ander aspect bij het gebruik van een elektrometer versterker is het feit dat je zo'n versterker niet zomaar op een print kan solderen zonder dat de eigenschappen van de schakeling negatief worden aangetast. Immers het print materiaal kan bij temperatuur veranderingen enigszins deformeren waardoor er spontaan heel kleine ladingen over delen van het oppervlak van het printmateriaal kunnen ontstaan. Dit effect wordt triboelektriciteit genoemd. Wat men in een dergelijk geval kan doen is de ingangspinnen (dus de plus ingang en de min ingang) uitbuiwen (met een schone punttang en een schoon pinset) voordat men de versterker op de print soldeert. Daarna kan de elektrometer versterker met zijn overblijvende pinnen wel op de print worden gesoldeerd. Alleen de ingangspinnen steken nu nog in de lucht en worden daarna direct met het kristal verbonden. Op deze manier wordt het





vervelende tribo effect buiten de meting gehouden.

Als laatste wil de schrijver met nadruk duidelijk maken dat deze piëzo weegschaal is gebouwd voor onderwijsdoeleinden. In principe is het namelijk niet mogelijk om met een piëzo kristal een statische kracht te meten. Een statische kracht zou een konstante gelijkspanning op de uitgang van de versterker moeten geven. We kunnen met een elektrometer oppomp hieraan in redelijke mate voldoen, maar hoe klein de biasstroom ook is, de lading over C_f zal in de loop van de tijd toch gaan veranderen. Ook als de biasstroom nul is, dan nóg zal de lading over C_f gaan veranderen vanwege het feit dat iedere condensator een parallel heeft. Deze parallelweerstand is te beschouwen als een lekweerstand waarover de lading kan weglekken.

Met deze piëzo weegschaal kunnen we al deze effecten laten zien. In het college Elektronische Instrumentatie kunnen we naast het demonstreren van de zeer kleine biasstroom van de elek-

trometer versterker nog vele andere aspecten demonstreren.

Op de foto is te zien dat de weegschaal is uitgevoerd met drie losse uitneembare kristallen, terwijl slechts één kristal voldoende zou zijn. Dit heeft een praktische reden, een persoon die zijn gewicht wil meten met deze weegschaal zal bij gebruik van een enkel kristal zich als een acrobaat moeten gedragen om zijn zwaartepunt boven het kleine kristal te houden. Vandaar dat er drie zijn gebruikt.

Voor de volgende proef nemen wij aan dat de drie kristallen exact dezelfde ladingsgevoeligheid hebben. We plaatsen vervolgens een standaard gewicht van 5 kg op de weegschaal. De gevoeligheid van de weegschaal is 35mV/kg. De uitgangsspanning blijkt 175 mV te bedragen. Nu halen we één van de drie kristallen uit de weegschaal en plaatsen het standaard gewicht weer terug op de weegschaal. Het blijkt dat de uitgangsspanning wederom 175 mV is. De reden is dat er gebruik wordt gemaakt van de ladingsgevoeligheid van de kristallen. Het maakt dus

niet uit hoeveel kristallen er zich in de weegschaal bevinden. Ook met slechts één enkel kristal blijft de weegschaal goed werken; echter het is niet makkelijk om het standaard gewicht van 5 kg op de weegschaal te plaatsen waarin zich maar één kristal bevindt zonder dat het gewicht wankelt.

Verder is het nog belangrijk om te spreken over een nadelig effect van piëzo-kristallen. Het blijkt dat er naast het Piëzo-effect ook nog een Pyro-effect bestaat. Het Pyro-effect is zelfs vele malen groter dan het Piëzo-effect. Als de temperatuur van kristal wordt verhoogd of verlaagd dan zal het kristal uitzetten of inkrimpen. Dit is direct terug te voeren tot interne krachten binnenin het kristal en daarmee tot het ontstaan van ladingen op de kristalvlakken. Als men de kristallen uit de weegschaal neemt en men houdt ze een tijdje in de hand, dan zullen de kristallen opgewarmd worden. Plaats men de kristallen vervolgens terug in de weegschaal dan zal men kunnen constateren, nadat de condensator C_f even is kortgesloten om de U_o op nul volt te zetten, dat de uitgangsspanning daarna toch nog een flinke verandering in de tijd laat zien, zonder dat er een gewicht op de weegschaal is geplaatst. De uitgangsspanning kan zelfs nog vastlopen tegen de voedingsspanning. Pas nadat de kristallen weer de omgevingstemperatuur hebben aangenomen en voor de zoveelste keer de reset schakelaar is ingedrukt om de uitgangsspanning weer netjes op nul te stellen, is dit hinderlijke effect niet meer merkbaar; aangenomen dat de temperatuur daarna constant blijft.

Let op!

Het schema van deze piëzo weegschaal kan niet direct worden toegepast voor industriële of handelsdoeleinden. ■