

11 Piëzo-elektrische sensoren

11.1 Inleiding

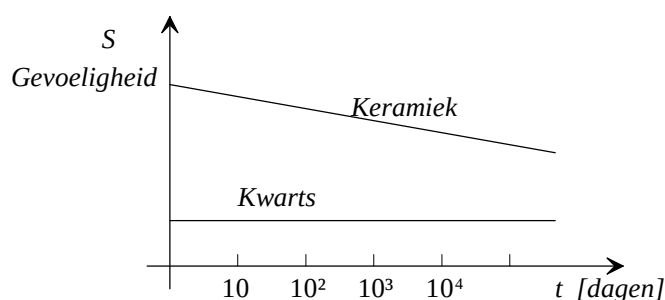
Sensoren in deze categorie berusten op het *piëzo-elektrisch effect*. Materialen die dit effect vertonen, produceren een oppervlaktelading als ze worden gedeformeerd ten gevolge van een mechanische kracht. De lading is over een groot bereik evenredig met die kracht. Doorgaans is de sensor uitgevoerd als condensator, zodat volgens $q = CV$ het uitgangssignaal ook als spanning beschikbaar is. De gevoeligheid van piëzo-elektrische sensoren wordt gekarakteriseerd met de ladingsgevoeligheid S_q [C/N of C/m/s² of C/g] of de spanningsgevoeligheid $S_v = S_q/C$ [V/N of V/m/s² of V/g].

Er bestaan globaal drie groepen piëzo-elektrische materialen:

- natuurlijke piëzo-elektrische materialen; het bekendste voorbeeld is kwarts (kristallijn SiO₂);
- keramische materialen (polykristallijn), bijvoorbeeld bariumtitanaat;
- polymeren (bekendste voorbeeld PVDF).

De materialen van de beide laatste groepen worden kunstmatig piëzo-elektrisch gemaakt door ze bij hogere temperatuur (boven de zgn. Curie-temperatuur) gedurende een zekere tijd bloot te stellen aan een sterk elektrisch veld ('polen'). Na afkoeling blijft het materiaal gepolariseerd en vertoont het piëzo-elektrische eigenschappen.

De piëzo-elektrische gevoeligheid van kwarts is laag maar stabiel: in de orde van 2 pC/N. Keramische materialen hebben een veel grotere gevoeligheid, variërend van 100 tot meer dan 1000 pC/N; polymeer heeft een gevoeligheid rond 25 pC/N. De piëzo-elektrische gevoeligheid van gepoolde materialen neemt echter af met de tijd, aanvankelijk snel, later steeds langzamer. Het verval verloopt negatief exponentieel, zoals weergegeven in figuur 2.89.



Figuur 2.89: Verval van piëzo-elektriciteit.

Piëzo-elektrische sensoren zijn toe te passen als *druk-* of *krachtopnemer*, en met een geijkte massa (seismische massa) als *versnellingsopnemer*. Door de afwezigheid van bewegende delen is dit soort sensoren uiterst robuust te construeren en in een hermetisch gesloten behuizing onder te brengen. Natuurlijk zijn er ook enkele nadelen aan piëzo-elektrische sensoren. De opgewekte lading kan via de inwendige weerstand van het kristal langzaam wegvloeien, waardoor statische metingen zijn uitgesloten. Omdat kristaldeformatie ook kan optreden tengevolge van thermische effecten, zijn piëzo-elektrische sensoren ook temperatuurgevoelig.

11.2 Het piëzo-elektrisch effect

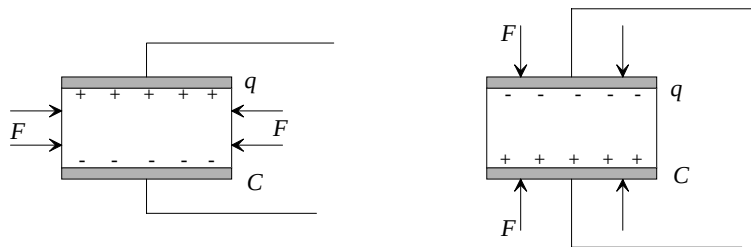
De piëzo-elektrische kristallen (elementen) werken als volgt: Bij het aanleggen van een kracht op het kristal, gaan de kristalatomen een beetje van plaats veranderen t.o.v. de normale positie van de atomen in het kristalrooster.

$$x = \frac{1}{k}F \quad \text{met } k \text{ de stijfheid (typisch } 2 \cdot 10^9 \text{ N/m)}$$

Door die vervorming van het kristalrooster ontstaat er een lading q op het kristal evenredig met de verplaatsing x :

$$q = Kx = \frac{K}{k}F = SF \quad \text{Dit is het direct piëzo-elektrisch effect.}$$

Het woord 'piëzo' komt van het Grieks 'piezein', wat drukken betekent. Figuur 2.90 geeft een principiële voorstelling van het kristal.



Figuur 2.90: Piëzo-elektrische opnemer.

De dynamische relatie tussen verplaatsing x en kracht F is voor te stellen door een tweede orde systeem:

$$\frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1/k}{\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1}$$

waarbij $\omega_n = 2\pi f_n$ (zeer) groot is ($f_n = 10$ tot 100 kHz) en ζ zeer klein is, ordegrootte 0,01.

Omgekeerd, wanneer men een elektrische spanning V aanlegt over het kristal, dan ontstaat er een mechanische verplaatsing x evenredig met V :

$$x = S \cdot V \quad \text{Dit is het invers piëzo-elektrisch effect.}$$

Om de lading q van het direct piëzo-elektrisch effect te meten, worden twee metalen elektrodes geplaatst aan de twee zijden van het kristal. Dit geeft een condensator met capacitieve waarde C_N ($= \epsilon_0 \epsilon A/d$). De Norton *equivalente voorstelling* van het kristal is dan een stroombron in parallel met de capaciteit C_N waarbij de stroom:

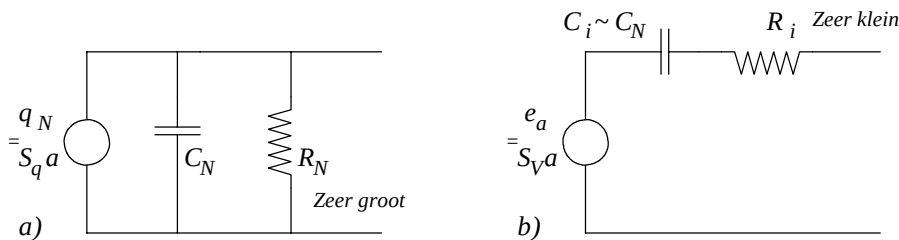
$$i_N = \frac{dq}{dt} = K \frac{dx}{dt}$$

Wanneer we x vervangen door F/k , wordt deze betrekking:

$$i_N = \frac{K}{k} \frac{dF}{dt} = S \frac{dF}{dt}$$

Indien de verplaatsing x , constant blijft, m.a.w. wanneer de kracht F constant is, dan is $dF/dt = 0$

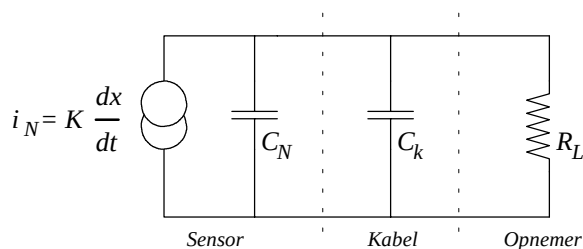
en dus is i_N nul. Het zijn dus alleen de verandering van de kracht of de verandering van de verplaatsing x die een stroom i_N veroorzaken. Naast de voorstelling als stroombron kan de opnemer ook gezien worden als spanningsbron met een capaciteit in serie. Dit geeft de twee equivalente schema's weergegeven in figuur 2.91 (in de figuur onderworpen aan een trilling).



Figuur 2.91: Equivalente schema's van een piëzo-elektrische opnemer :a) ladingsbron en b) spanningsbron.

De weerstand R_N in parallel met de capaciteit C_N is bij de piëzo-opnemer zeer groot en wordt meestal verwaarloosd. Wanneer de piëzo-opnemer onderworpen is aan een sinusvormige trilling geeft hij een sinusvormige spanning af. De voorstelling van de opnemer als spanningsbron met een capaciteit C_N in serie is weergegeven in figuur 2.91.b.

Indien de piëzo-elektrische sensor rechtstreeks verbonden wordt met een meettoestel (beschouwd als een zuivere weerstandsbelasting R_L), via een kabel welke gemodelleerd wordt als een zuivere capaciteit, dan geeft dit het schema uit figuur 2.92.



Figuur 2.92: Equivalent schema voor een piëzo-elektrisch krachtmeetsysteem.

De TF van stroom i_N naar opgenomen spanning V_L voor het schema uit figuur 2.92 is:

$$\frac{V_L(p)}{i_N(p)} = \frac{R_L}{1 + R_L(C_N + C_k)p}$$

Het totale meetsysteem geeft dan als verband tussen te meten kracht F en gemeten spanning V_L :

$$\frac{V_L(p)}{F(p)} = \frac{V_L}{i_N} \frac{i_N}{X} \frac{X}{F} = \frac{S}{(C_N + C_k)(1 + \tau p)} \frac{\tau p}{\left(\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1 \right)} \quad \text{met } \tau = R_L(C_N + C_k)$$

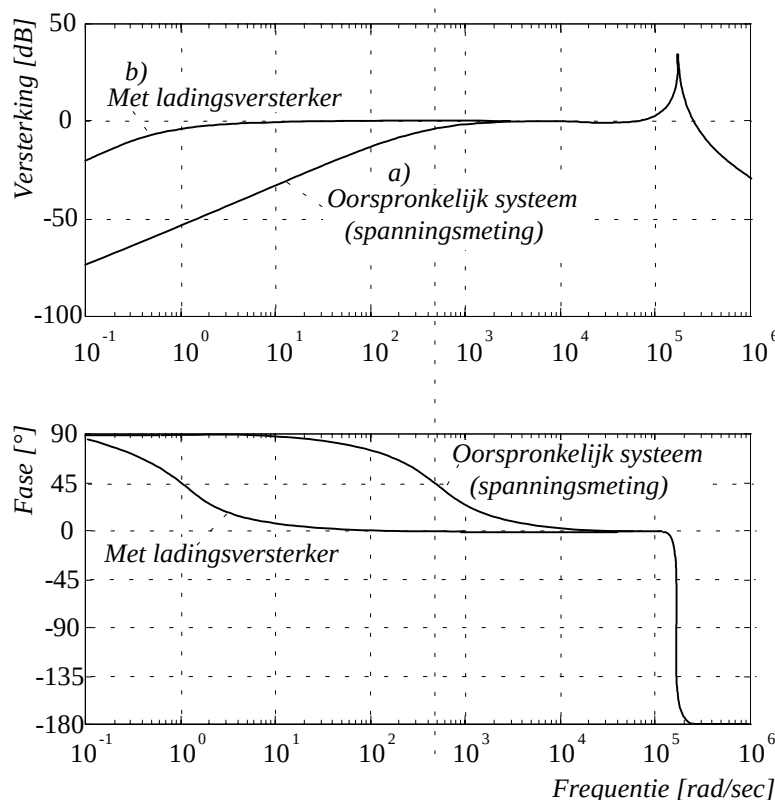
Dit verband benadrukt de twee nadelen van dit elementair meetsysteem:

- De spanningsgevoeligheid $S_V = S/(C_N + C_k)$. De gevoeligheid hangt bijgevolg af van de kabelcapaciteit C_k en dus ook van de lengte van de kabel.
- Het dynamisch gedeelte van de TF (met verwaarlozing van de opnemer-dynamica) is:

$$G(p) = \frac{\tau p}{(1 + \tau p)} \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1 \right)}$$

Het tweede orde systeem is eigen aan alle elastische elementen en kan niet vermeden worden. Dit stelt echter geen probleem indien de hoogste signaalfrequentie ω_{max} (veel) kleiner blijft dan ω_n . De eerste factor $\tau p/(1 + \tau p)$ geeft aan dat het systeem niet gebruikt kan worden voor het meten van DC en langzaam variërende krachten.

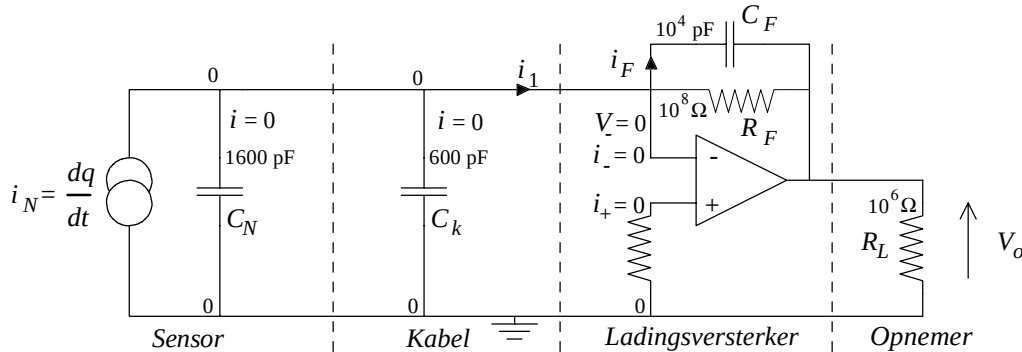
Als illustratie geeft figuur 2.93.a de frequentieresponsie van $G(j\omega)$ weer.



Figuur 2.93: Frequentierespons van piëzo-elektrisch meetsysteem: a) als spanningsmeting, b) met ladingsversterker. De gebruikte variabelen zijn: $f_n = 27$ kHz, $\omega_n = 1,7 \cdot 10^5$ rad/s, $\zeta = 0,01$, $C_N = 1600$ pF, $C_k = 600$ pF, $R_L = 10^6 \Omega$, $\tau = 2,2$ ms en voor de ladingsversterker $\tau_F = R_F C_F = 1$ sec.

Het nuttig meetbereik voor de spanningsmeting ligt tussen $3/\tau$ en $0,2 \omega_n$, met de gegeven parameters is dit tussen 216 Hz en 5,4 kHz, waar $0,95 \leq |G(j\omega)| \leq 1,05$ en de faseverschuiving bijna nul is. Voor veel toepassingen is dit echter onvoldoende.

De vermelde nadelen van de spanningsmeting worden vermeden door gebruik te maken van een ladingsversterker (of lading-spanningsomzetter) zoals aangegeven in figuur 2.94. Dit is een integrator die in het ideale geval een uitgangssignaal geeft dat evenredig is met de lading q . Het ideale systeem geeft dan een van nul verschillend uitgangssignaal bij een statische kracht.



Figuur 2.94: Equivalente schakeling voor piëzo-elektrisch meetsysteem met ladingsversterker.

Voor figuur 2.94 geldt:

$$i_1 = i_F + i_-$$

en de lading over de terugkoppelcapaciteit C_F is:

$$q_F = C_F(V_- - V_o)$$

Voor de ideale operationele versterker is $i_+ = i_- = 0$ en is $V_- = V_+$. In dit geval wordt dat $V_- = V_+ = 0$ en $i_F = dq/dt$, zo dat

$$i_1 = i_F = \frac{dq_F}{dt} = -C_F \frac{dV_o}{dt}$$

Omdat de spanningsval over de capaciteiten C_N en C_k nul is, vloeit er ook geen stroom door zodat:

$$i_1 = i_N = \frac{dq}{dt}$$

Samen geeft dit:

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{1}{C_F} \frac{dq}{dt} \rightarrow V_o = -\frac{q}{C_F}$$

(In de veronderstelling dat $V_o = 0$ als $q = 0$).

De totale TF voor het meetsysteem met ladingsversterker wordt dan:

$$\frac{V_o(p)}{F(p)} = \frac{S}{C_F} \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1 \right)}$$

De statische spanningsgevoeligheid S_v is nu S/C_F , deze is enkel afhankelijk van de terugkoppelcapaciteit van de ladingsversterker en onafhankelijk van de sensor- of kabelcapaciteit. In het ideale geval is de factor $\tau_F/(1+\tau_F)$ niet aanwezig en is $|G(j\omega)| = 1$ bij $\omega = 0$. In de praktijk is een terugkoppelweerstand R_F noodzakelijk om drift t.g.v. DC-stromen te vermijden. Dit levert opnieuw de factor $\tau_F/(1+\tau_F)$ op in de totale TF met $\tau_F = R_F C_F$. Bij voldoende grote keuze van R_F en C_F zal de frequentieresponsie naar beneden toe toch nog gelijk lopen met versterking 1 tot onder 1 Hz. Bijvoorbeeld, met $R_F = 10^8 \Omega$ en $C_F = 10^4$ pF is $\tau_F = 1$ sec; $|G(j\omega)| = 0,95$ bij $\omega = 3$ rad/sec $\approx 0,5$ Hz.

11.3 Piëzo-elektrische versnellingsopnemers

Piëzo-elektrische sensoren worden vaak gebruikt voor het meten van versnellingen en trillingen door toevoegen van een seismische massa m . Indien de versnellingsopnemers (of de behuizing) een versnelling a ondergaat, ontstaat ten gevolge van de traagheid een kracht $F = ma$ die inwerkt op de seismische massa en het kristal. Hierdoor ontstaat de lading $q = SF$, met S [C/N] de ladingsgevoeligheid van het kristal t.g.v. een kracht. De ladingsgevoeligheid S_{qa} voor een gegeven versnelling is dan:

$$S_{qa} = \frac{\Delta q}{\Delta a} = Sm \text{ [C/m/s}^2\text{]}$$

of uitgedrukt in de eenheden C/g, met $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$ geeft dit:

$$S_{qa} = \frac{\Delta q}{\Delta a} = 9,81 Sm \text{ [C/g]}$$

Bij gebruik van de versnellingsopnemer of **accelerometer** met een **ladingsversterker** met terugkoppelcapaciteit C_F wordt de overeenstemmende statische **spanningsgevoeligheid**:

$$S_{VaLV} = (-)\frac{\Delta V}{\Delta a} = (-)\frac{9,81Sm}{C_F} \text{ [V/g]}$$

De dynamische karakteristiek (tweede orde massa-veersysteem, waardoor de gevoeligheid een piek vertoont bij de resonantiefrequentie) zoals eerder beschreven blijft natuurlijk behouden.

Opgelet: Redeneren met de spanningsgevoeligheid kan zeer gevaarlijk zijn. De eigenlijke waarde van de spanningsgevoeligheid hangt immers af van de gebruikte schakeling: het maakt dus verschil als gemeten wordt met open dan wel met 'kortgesloten' klemmen bij de spanningsmeting, en natuurlijk als een spanningsversterker dan wel een ladingsversterker gebruikt wordt. Neem bijvoorbeeld het open systeem in onbelaste toestand uit figuur 2.91.b. Bij definitie van de ladingsgevoeligheid als voorheen $S_{qa} = q_a/a$ en de spanningsgevoeligheid als $S_{Va} = e_a/a$ dan is voor het gegeven schema uit figuur 2.91, $S_{VaOL} = S_{qa}/C_N$ (Ga dit na!). Dit is de **open-lus-spanningsgevoeligheid** of de spanningsgevoeligheid in onbelaste toestand, hetgeen duidelijk verschilt van het hoger vermeld resultaat bij gebruik van de ladingsversterker.

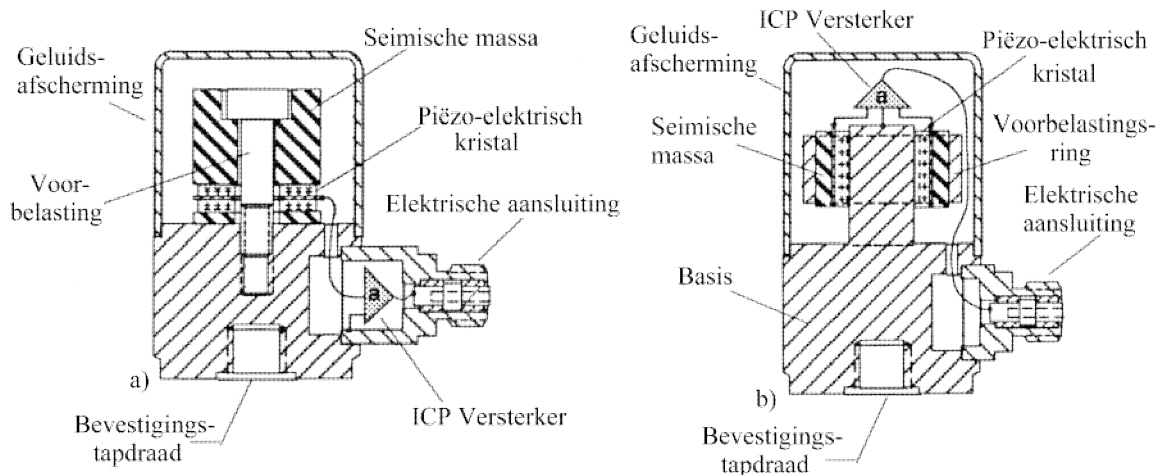
De gebruikte spanningsgevoeligheid in paragraaf 11.5 is deze open-lus-spanningsgevoeligheid. De index 'OL' is echter weggelaten. Zoals in paragraaf 11.5 aangetoond wordt zal, de eigenlijke

spanningsgevoeligheid (dit is met belasting) weerom wijzigen ten gevolge van de ingangsbelasting van de spanningsmeting.

Samengevat zijn bij het toepassen van piëzo-elektrische sensoren als versnellingsopnemers de volgende punten van belang:

- Nuttig frequentiegebied:
 - ♦ minimum: bepaald door de diëlektrische verliezen en de uitleeselektronica, $f_{min} \approx 0,3 \text{ Hz}$;
 - ♦ maximum: bepaald door de resonantiefrequentie.
- De sensoren bezitten ook een transversale gevoeligheid (loodrecht op de hoofdas), welke globaal 1 tot 3% van de gevoeligheid in de hoofdrichting bedraagt.
- De sensor vormt een mechanische belasting voor het meetobject. Daarmee veranderen de versnelling a en de resonantiefrequentie ω van het object ten opzichte van de onbelaste toestand (met m de massa van de versnellingsopnemer en M die van het object):
 - ♦ versnelling: $a_L = a_0 M / (M+m)$;
 - ♦ resonantiefrequentie: $\omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{M}{M+m}}$.
- de seismische massa m kan gaan van 1 gram tot 500 gram.

Figuur 2.95 geeft een voorbeeld van een versnellingsopnemer waarbij een piëzo-elektrisch kristallen plaatje geklemd zit tussen de seismische massa en het omhulsel. Het geheel is samengeschoefd (geperst) om een grote statische voorbelasting op het kristal aan te brengen. Afhankelijk van de richting zal de aangelegde versnelling een belasting (drukkracht) veroorzaken welke groter of kleiner kan zijn dan de statische voorbelasting.

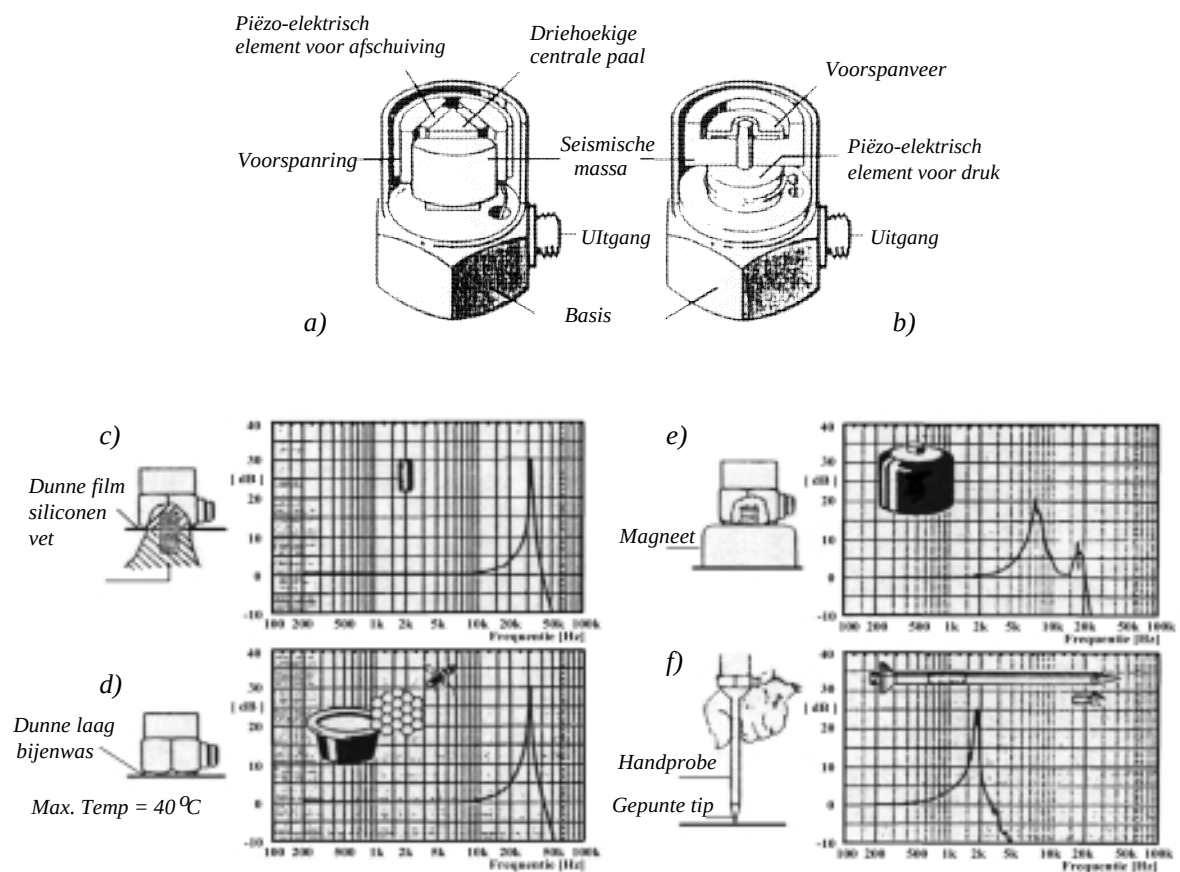


Figuur 2.95: Piëzo-elektrische versnellingsopnemers (accelerometer):
a) op samendrukking en b) op afschuiving.

11.4 Bevestiging van accelerometers

Door de bevestiging van de accelerometer op het testobject ontstaat een nieuw massa-veer-systeem. De verbinding is de veer, de opnemer is de massa. De resonantie van dit systeem moet uiteraard boven het opgemeten frequentiegebied liggen. Figuur 2.96 geeft enkele bevestigingsmogelijkheden.

- ♦ De bevestiging met *schroef(draad)* vereist getabte gaten en vlakke oppervlakken. Het bereik is 32 kHz.
- ♦ Bevestiging met *bijenwas* is een snelle en eenvoudige methode. Het bereik is 30 kHz. Gebruik van bijenwas heeft wel enkele beperkingen. Zo is de maximaal toegelaten temperatuur 40 °C, de maximale versnelling is 100 m/s².
- ♦ Bij ferromagnetische structuren is de bevestiging met *magneet* eenvoudig. De opnemer is makkelijk verplaatsbaar maar relatief zwaar. Het bereik is (slechts) 8 kHz.
- ♦ Een laatste mogelijkheid is de *handprobe*. Deze is zeer snel maar niet echt repeteerbaar met een bereik tot 700 Hz.



Figuur 2.96: Bouw en bevestiging van accelerometers. a) Accelerometer op afschuiving, b) accelerometer op samendrukking. c) Frequentiearakteristiek bij bevestiging met schroef, d) met bijenwas, e) met magneet en f) bij een handprobe.

11.5 Interfacing bij het spanningsequivalent

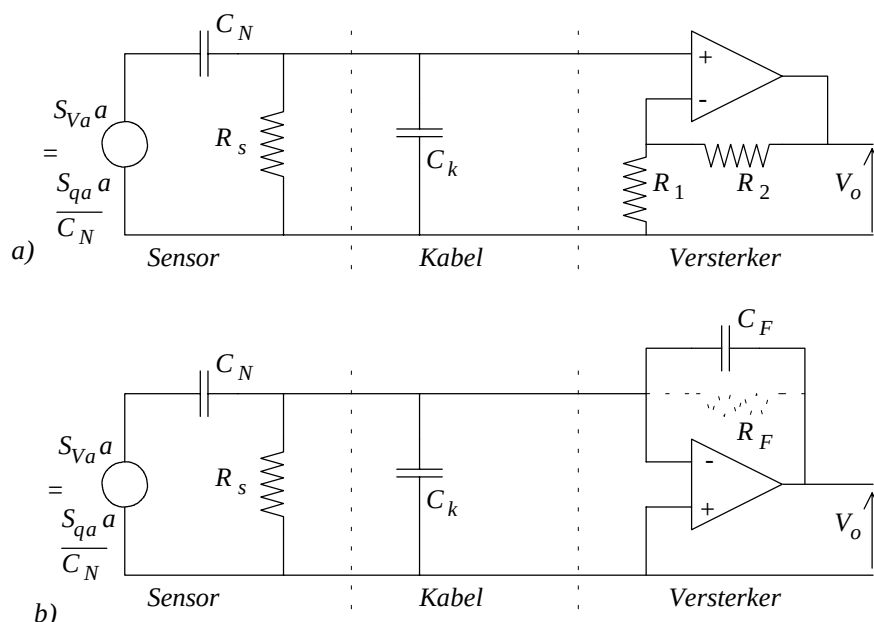
Zoals eerder vermeld kan een piëzo-elektrische sensor gemodelleerd worden als ladingsbron of als spanningsbron. De voorgaande paragrafen gebruikten het ladingsbronmodel om de voordelen van de ladingsversterker aan te geven. Bij wijze van voorbeeld worden hier, voor hen die dit beter past, dezelfde besluiten afgeleid met behulp van het spanningsbronmodel.

De bronimpedantie is een capaciteit C_N , gelijk aan die van het kristal zelf. Een eventueel ladingslek is te vertolken met een weerstand R_s . De twee manieren om het ladingssignaal om te zetten in een (gemakkelijker te verwerken) spanning zijn de directe spanningsmeting en de lading-spanningsomzetter (meestal aangeduid met ladingsversterker). Van beide methoden zijn in figuur 2.97 eenvoudige interface circuits weergegeven met inbegrip van de kabel die de sensor met de verwerkingsschakeling verbindt, welke zeker niet altijd verwaarloosd kan worden.

Bij de spanningsuitlezing, (ditmaal met een niet-inverterende operationele versterker) geldt:

$$V_o = A \frac{j\omega R_s C_N}{1 + j\omega R_s (C_N + C_k)} S_{Va} a \quad \text{met} \quad A = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

De overdracht heeft dus het karakter van een hoogdoorlaatfilter. Alleen voor hoge frequenties, dat wil zeggen: $\omega R_s (C_N + C_k) \gg 1$, is de overdracht frequentie-onafhankelijk, en bedraagt dan $V_o = A \cdot S_{Va} a \cdot C_N / (C_N + C_k)$. Er treedt signaalverzwakking op tengevolge van de ingangsimpedantie van de versterker (welke misschien niet rechtstreeks gemodelleerd is, maar gezien kan worden als een stukje van R_s en C_N) en de kabelcapaciteit. De overdracht hangt dus af van de kabelcapaciteit, en daarmee van de lengte van de kabel. Bij wijziging van de kabel moet dus de gevoeligheid ($= A \cdot S_{qa} / (C_N + C_k) = A \cdot S \cdot m / (C_N + C_k)$) van het systeem opnieuw worden vastgesteld.



Figuur 2.97: Interfacing voor piëzo-elektrische kristallen; a) spannings- en b) ladingsuitlezing.

Dit nadeel heeft de ladingsuitlezing van figuur 2.97.b niet: de teruggekoppelde operationele versterker legt de ingangsspanning op nul (virtuele aarde), zodat de kabel en het sensorkristal spanningsloos zijn: hun capaciteit en ook hun weerstanden spelen geen rol meer.

De lading van het kristal wordt overgedragen op de terugkoppelcapaciteit, waarvan de spanning op de uitgang verschijnt. Uitgaande van een ideale operationele versterker is de uitgangsspanning $V_o = -(C_N / C_F) S_{va} a$, en is dus inderdaad onafhankelijk van de kabeleigenschappen en ook onafhankelijk van de frequentie. (Vergelijk deze uitkomst met die van paragraaf 11.3!)

Om te voorkomen dat de offsetspanning en de biasstroom van de operationele versterker door de terugkoppelcapaciteit C_F worden geïntegreerd tot een alsmaar toenemende uitgangsspanning, is een terugkoppelweerstand R_F noodzakelijk. De uitgangsspanning van het circuit wordt hiermee:

$$V_o = -\frac{j\omega R_F C_N}{1 + j\omega R_F C_F} S_{va} a$$

Ook deze overdracht heeft een hoogdoorlaat-karakter met een kantelpunt dat nu uitsluitend wordt bepaald door de elektronische componenten van de ladingsversterker. Afhankelijk van het gekozen type operationele versterker (ladingsversterker) kan het kantelpunt worden gelegd bij frequenties tot minder dan 0,01 Hz. Echt statisch meten blijft evenwel niet mogelijk.

11.6 Voorbeelden

Voorbeeld 1

Een piëzo-opnemer met een ladingsgevoeligheid S_{qa} van 11,18 pC/g heeft een capaciteit C_N van 1014 pF. De 4 meter lange kabel die hieraan verbonden is, heeft een capaciteit van 90 pF/m. Hoe groot is de spanningsgevoeligheid S_{va} van dit geheel ?

De totale capaciteit $C = 1014 + 4 * 90 = 1374$ pF. De spanningsgevoeligheid $S_{va} = S_{qa}/C = 11,18 / 1374 = 8,6$ mV/g.

Voorbeeld 2

We wensen trillingen met een frequentie $f = 1$ Hz, opgenomen door een accelerometer met (totale) capaciteit van 1000 pF, te versterken. Hoe groot moet de ingangsweerstand R_L van de versterker zijn, opdat dit signaal maximum 3 dB lager zou zijn dan dit van de hogere frequenties ? (Equivalent model: Spanningsmeting over belastingweerstand.)

De grensfrequentie $f_s = 1/2\pi R_L C$. Hieruit volgt dat $R_L = 1/2\pi f_s C = 10^{12}/(2\pi * 1 * 1000) = 160$ M Ω .

Voorbeeld 3

De ladingsgevoeligheid S_{qa} van een accelerometer is 5 pC/g. Wanneer men deze accelerometer verticaal zet en men draait hem vervolgens 180°, dan veroorzaken we hierdoor een versnelling van 2g. Door het verschil in uitgangsspanning tussen deze twee metingen te bepalen kan men de accelerometer aldus ijken. Deze accelerometer heeft een totale massa m van 32,4 gram, zijn resonantiefrequentie is 20 kHz. Hoe groot is de ladingsgevoeligheid S ? Indien het verschil in uitgangsspanning 20 mV bedraagt, hoe groot is dan de spanningsgevoeligheid S_{va} ? Hoe groot is de totale capaciteit C (kabel + piëzo-element) ?

Antwoord: $S = 15,73$ pC/N, $S_{va} = 10$ mV/g, $C = 500$ pF.

Voorbeeld 4

Een motor draait 600 toeren per minuut, de trilling die hij veroorzaakt heeft dezelfde frequentie. De capaciteit van de accelerometer is 1000 pF, hoe groot moet de ingangsweerstand R_i van de versterker zijn opdat dit signaal niet meer dan 3 dB lager zou zijn dan dit van de hogere frequenties.

Antwoord: $R_i = 15,9$ M Ω .

Tabel 2.8 geeft nog enkele typische waarden.

Type	Meetbereik benedengrens	Meetbereik (volle schaal)	Gevoeligheid	T (°C)
Versnelling	$2 \cdot 10^{-5}$ m/s ²	$10^3 \dots 10^6$ m/s ²	0,1 ... 50 pC/ms ⁻²	-200 ... 500
Kracht		$10^2 \dots 10^6$ N	2 ... 4 pC/N	... 300
Druk		$10^7 \dots 10^8$ Pa	20 ... 800 pC/MPa	... 200

Tabel 2.8: Piëzo-elektrische sensoren.

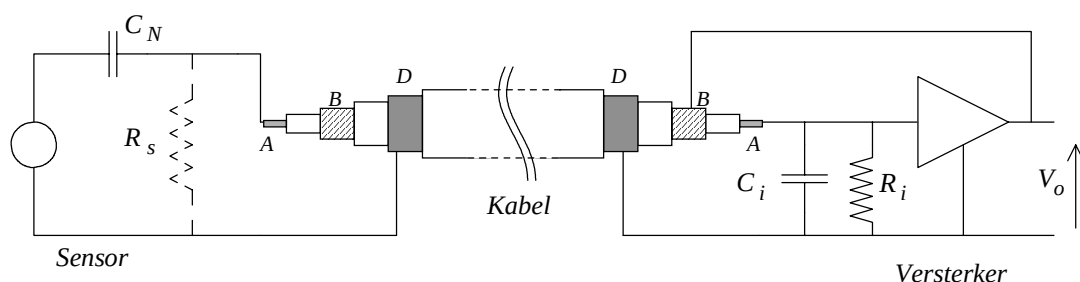
11.7 Kabel met dubbele afscherming bij spanningsmeting

Zoals hoger gezien, zal de ingangsweerstand R_i van de versterker zeer hoog moeten zijn indien we ook trillingen met lage frequenties willen versterken. Schakelingen die hiervoor in aanmerking komen zijn niet-inverterende versterkers en spanningsvolgers.

Niettegenstaande dit, mag de kabel tussen de piëzo-opnemer en de versterker niet te lang zijn. Immers zoals hoger aangegeven, daalt de spanningsgevoeligheid als de kabelcapaciteit toeneemt. Voor zeer grote kabellengten is de verzwakking van het signaal zo groot dat de signaal/ruis verhouding te klein wordt. Daarbij komt nog dat de ingangskabel gevoelig is voor ongewenste signalen afkomstig van stoorvelden evenals voor ruis te wijten aan torsie (t.g.v. het bewegen) van de kabel.

Soms maakt men bij de spanningsmeting gebruik van een kabel met dubbele afscherming. De piëzo-opnemer wordt aangesloten tussen de centrale geleider A en de buitenste afscherming D . Aan de andere kant van de kabel is de geleider A aan de ingang van een eenheidsversterker aangesloten. De output van de eenheidsversterker wordt verbonden met de binnenste afscherming B zoals figuur 2.98.

De output van deze versterker volgt de input op enkele procenten na. Dit betekent dat de afscherming B de potentiaalveranderingen van de centrale geleider A op enkele procenten na volgt, zodat de stroom hiertussen zeer klein is. Met andere woorden de capaciteit van de kabel vormt dan slechts een zeer kleine belasting voor de piëzo-opnemer. De capaciteit tussen de buitenste afscherming D en de afscherming B vormt nu wel een belasting voor de output van de versterker, doch deze kan dit vermogen zonder problemen leveren. Dankzij deze techniek kunnen kabels met grotere lengte gebruikt worden (tot 15 a 20 m) zonder sterke vermindering van de gevoelheden met de bijkomende eigenschap dat de versterking van het systeem geijkt kan blijven in gevoeligheidseenheden van de opnemer.



Figuur 2.98: Gebruik van kabel met dubbele afscherming bij spanningsmeting met piëzo-opnemer.