

8 Capacitieve opnemers

8.1 Inleidende principes

Capacitieve opnemers bieden als voordeel een mechanisch eenvoudige constructie en een hoge gevoeligheid. Ze vragen echter ook een complexere elektronica om het bekomen uitgangssignaal achteraf lineair te maken.

Een eenvoudige condensator bestaat uit twee parallelle metalen platen gescheiden door een diëlektricum. Zie figuur 2.21. De capaciteit van de condensator wordt gegeven door:

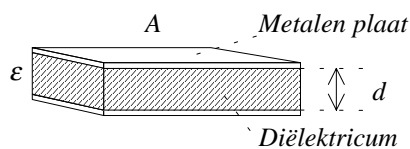
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \text{ waarbij}$$

ϵ_0 de *permittiviteit* van vacuüm (8,85 pF/m),

ϵ_r de *relatieve permittiviteit* (ook *diëlektrische constante*),

A de oppervlakte van de platen en

d de afstand tussen de platen voorstelt.

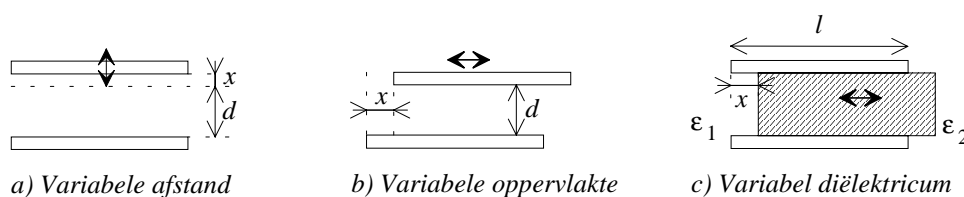


Figuur 2.21: Opbouw van een capaciteit.

Een capacitieve verplaatsingssensor is zo opgebouwd, dat bij variatie in de onderlinge afstand tussen twee sensordelen een voorgeschreven verandering in de geometrische factor G optreedt. Voor de vlakke plaatcondensator uit figuur 2.21 is de factor $G = A/d$. (Deze formule is slechts benaderend geldig omdat het elektrisch veld aan de randen niet homogeen is en buiten de ruimte tussen de platen treedt (strooiveld). Er geldt $C = \epsilon G$.)

Alhoewel in principe ook variatie van ϵ mogelijk is (bijvoorbeeld door een verplaatsbaar diëlektricum zoals figuur 2.22 aangeeft), wordt deze parameter doorgaans niet gebruikt voor verplaatsingsmetingen. De afhankelijkheid van ϵ wordt wel benut in sensoren voor het meten van de eigenschappen van korrelige stoffen, zoals de concentratie van een bepaalde stof in een korrelig mengsel of het vochtgehalte (in bijvoorbeeld suiker of tabak).

Elektrische velden zijn gemakkelijker te manipuleren dan magnetische velden. Door meesturing van naastliggende geleiders (Eng: guarding) verkrijgt men homogene velden in nauwkeurig begrensde gebieden. Dit is een van de redenen waarom met capacitieve principes een hogere nauwkeurigheid behaald kan worden dan (bijvoorbeeld) met inductieve methoden.



Figuur 2.22: Verandering van C door verandering a) van d , b) van A of c) van ϵ .

8.2 Capacitieve verplaatsingssensoren

Door de *verplaatsing* x (figuur 2.22.a) wordt de afstand tussen de platen vergroot. De nieuwe waarde van de capaciteit is:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d+x}$$

Het verband tussen C en x is echter niet lineair. x is omgekeerd evenredig met C , hetgeen meestal niet wenselijk is.

De *oppervlakte wijziging* $\Delta A = w \cdot x$ (figuur 2.22.b) met w de breedte van de plaat geeft:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} (A - wx)$$

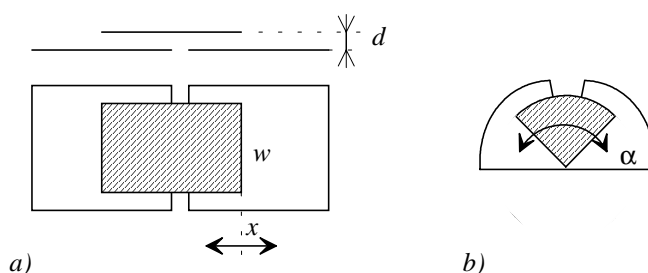
Hier is de te meten grootte x wel evenredig met de gemeten grootte C .

Volgens figuur 2.22.c kan men tenslotte ook de *hoeveelheid diëlektrisch materiaal* tussen de twee platen met een bepaalde relatieve permittiviteit, wijzigen door de verplaatsing x . Om het verband tussen C en x af te leiden beschouwen we 2 parallele capaciteiten met oppervlakte A_1 respectievelijk A_2 en relatieve permittiviteit ϵ_1 respectievelijk ϵ_2 :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{d} A_1 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{d} A_2$$

Met $A_1 = wx$ en $A_2 = w(l-x)$, geeft dit voor de totale capaciteit:

$$C = \frac{\epsilon_0 w}{d} [\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1)x]$$



Figuur 2.23: Differentiële capacitieve verplaatsingsopnemers voor a) translatie en b) rotatie.

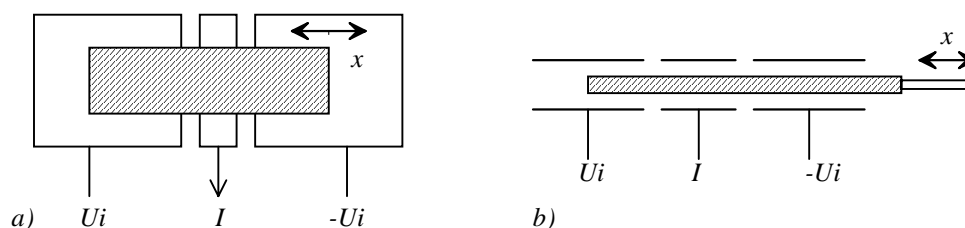
Figuur 2.23 toont nog enkele basisconfiguraties voor capacitieve opnemers, zowel translationeel als rotationeel. Beide zijn van het differentieële type: bij een verplaatsing veranderen de twee capaciteiten gelijktijdig, maar wel tegengesteld:

$$\Delta C_1 = -\Delta C_2 = \epsilon \cdot \Delta x \cdot \frac{w}{d}$$

In de nulpositie ($\Delta x = 0$) heeft een verandering van d of w , bijvoorbeeld t.g.v. speling in de constructie of t.g.v. een temperatuurverandering, geen invloed op de verschilcapaciteit $C_1 - C_2$.

Een ander belangrijk voordeel van een dergelijke verschil-configuratie is het grotere dynamisch bereik. In de referentiestand (nulstand) is de verschilcapaciteit juist 0. Zeer kleine variaties kunnen (elektronisch) versterkt worden zonder gevaar van oversturing. Bij de enkelvoudige opnemer heeft de capaciteit in de nulpositie reeds een aanzienlijke waarde. Het daaruit voortkomend uitgangssignaal kan niet veel meer worden versterkt.

Een nadeel van de (tot nog toe) genoemde constructies is de noodzakelijke elektrische verbinding met het bewegend onderdeel van de opnemer. Een configuratie die dit nadeel niet heeft is weergegeven in figuur 2.24.



Figuur 2.24: Differentiaalcapaciteiten met stroomuitlesing.

De beweegbare elektrode dient hier slechts als koppel-elektrode tussen de (symmetrisch) vaste platen en de middenelektrode of uitlees-elektrode. Met de koppel-elektrode in de middenpositie worden beide tegengestelde ingangssignalen gelijktijdig capacitief gekoppeld naar de uitlees-elektrode en is de spanning (of stroom) juist nul. Bij een verplaatsing van de beweegbare elektrode is die koppeling asymmetrisch. Er ontstaat een uitgangssignaal waarvan de grootte een maat is voor de verplaatsing en waarvan de polariteit de richting van de verplaatsing aangeeft.

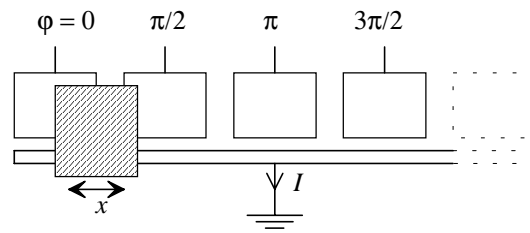
In plaats van een vlakke-plaat constructie kan men ook een cilindrische vorm kiezen, zoals aangegeven in figuur 2.24.b, met als voordeel een compactere bouwvorm en minder randvelden, dus een grotere lineariteit. Dit type opnemer staat bekend als de *Lineair Variabele Differentiële Condensator* (LVDC) en is kwalitatief de beste van de op de markt verkrijgbare lineaire capacitieve verplaatsingssensoren. Men kan de opnemer zodanig opbouwen dat een buitengewoon goede lineariteit wordt bereikt, over een groot meetbereik, met een zeer lage temperatuurcoëfficiënt. Er bestaat ook een rotationeel type, de RVDC. De hoekgevoeligheid wordt verkregen door de cilinders te voorzien van driehoekvormige elektroden.

8.3 Cyclisch absolute fasegevoelige capacitieve verplaatsingsopnemer

Een van de problemen bij het ontwerpen van sensoren is het verenigen van een groot meetbereik met een hoge resolutie en/of grote lineariteit. Het capacitieve principe maakt het mogelijk deze combinatie te realiseren.

De methode komt erop neer dat een rij van (elementaire) sensoren wordt toegepast. Deze opbouw kan met capaciteiten op een vrij eenvoudige wijze worden gemaakt. Figuur 2.25 toont deze opzet voor een lineaire sensor.

De opbouw vertoont gelijkenissen met deze van figuur 2.24. Het voornaamste verschil schuilt in het feit dat hier niet de amplitude, maar de fase van het signaal op de uitleeselektrode een maat is voor de verplaatsing. De verschillende vaste elektrodes worden aangestuurd met sinusvormige spanningen met een onderling faseverschil van $\pi/2$ radialen.



Figuur 2.25: Samengestelde capacitieve sensor voor hoge resolutie over een groot meetbereik.

Bevindt de verplaatsbare elektrode zich geheel boven een van de vaste elektrodes, dan heeft de spanning op die elektrode dezelfde fase. In een tussenpositie ligt de fase tussen beide waarden (in de figuur resp. 0 en $\pi/2$). De fase kan met een resolutie van beter dan 0,1 graad bepaald worden. Derhalve is ook de plaatsresolutie zeer groot.

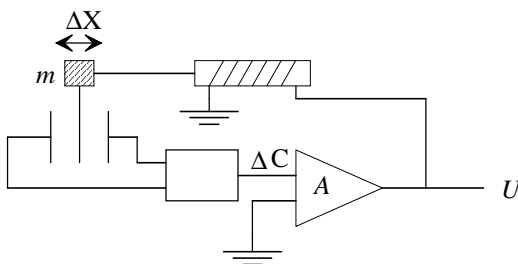
Door de structuur periodiek te herhalen is bovendien een groot bereik te realiseren. Zo krijgen we een cyclus absoluut meetsysteem. Een eenduidige maat voor de positie is te verkrijgen door met een incrementele teller het aantal gepasseerde secties of cycli bij te houden, waarbij één sectie bestaat uit vier elektroden.

Met de geschetste methoden zijn verbluffende resoluties te behalen, gepaard gaande met een groot meetbereik. De methode wordt onder meer toegepast in elektronische schuifmaten met een bereik van (bijvoorbeeld) 20 cm en een resolutie van 0,01 mm.

In deel III en IV komen deze samengestelde meetsystemen en de verwerking van de signalen die hier uit voortvloeien nog uitvoerig aanbod.

8.4 Capacitieve versnellingsopnemer

Het capacitieve detectie-principe leent zich ook uitstekend voor toepassingen in versnellingsensoren. Een dergelijke sensor bestaat uit een 'seismische' massa, die in beweging komt onder invloed van een versnelling. De verplaatsing van die massa kan met capacitieve methoden worden bepaald. Vaak worden deze sensoren opgenomen in een terugkoppeling. In plaats van de verplaatsing te nemen als maat voor de versnelling wordt het verplaatsingssignaal gebruikt om de seismische massa terug te dwingen naar de nulpositie, met een of andere actuator. Figuur 2.26 geeft het algemene principe weer.



Figuur 2.26: Capacitieve versnellingsensor met terugkoppeling.

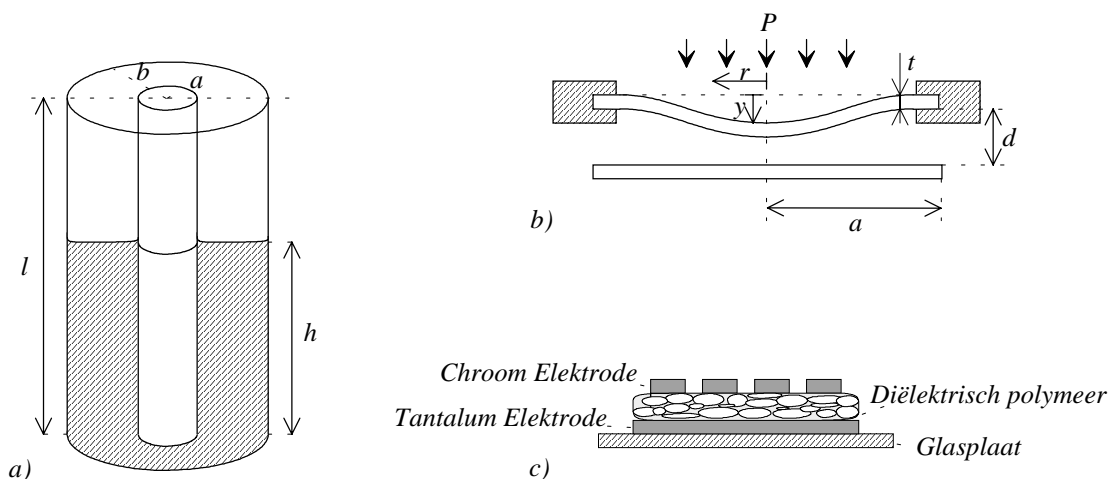
De verplaatsing van de seismische massa geeft aanleiding tot een capaciteitsverandering ΔC . Deze wordt omgezet in een elektronisch signaal dat vergeleken wordt met een referentiewaarde (deze kan ook nul zijn) en het verschil wordt versterkt toegevoerd aan een actuator. Bij juiste dimensionering zal het systeem uiteindelijk een evenwichtstoestand bereiken waarbij de massa weer in de nulpositie staat, ondanks de uitgeoefende kracht of versnelling. De daarvoor benodigde stroom (voor de actuator) is nu een maat voor die versnelling.

Omdat de massa steeds in de nulpositie wordt gehouden, worden geen bijzondere eisen gesteld aan de overdracht van capaciteit naar elektrisch signaal. Slechts een goede nulpuntnauwkeurigheid is voldoende. Vanzelfsprekend moet het actuatorsignaal wel een goede maat zijn voor de uitgeoefende kracht.

Overigens is dit principe van 'kracht terugkoppeling' niet voorbehouden aan capacitieve sensoren. Het detectiesysteem kan van een willekeurig ander principe uitgaan.

8.5 Voorbeelden

Als eerste voorbeeld geven we hier een capacitieve niveaumeting. Figuur 2.27.a toont twee metalen cilinders met daartussen een vloeistof tot op de hoogte h .



Figuur 2.27: a) Capacitieve niveaumeting, b) Capacitieve druksensor, c) Capacitieve vochtsensor.

De totale capaciteit is de som van de capaciteiten gevormd door de lucht en door de vloeistof. De capaciteit per lengteëenheid van 2 cilinders is:

$$\frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} \quad \text{met } b \text{ en } a \text{ de stralen van de cilinder } (b > a).$$

Bij een relatieve permittiviteit van lucht gelijk aan 1, is de totale capaciteit:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} h + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} (l - h) = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} (l + (\epsilon_r - 1)h)$$

We zien dat de waarde van de capaciteit recht evenredig is met de hoogte h van het water!

Een tweede voorbeeld is de *capacitieve druksensor*, waarvan figuur 2.27.b een principe schema geeft. De voordelen van capacitieve druksensoren zijn de grote gevoeligheid over een groot meetgebied, de vlakke frequentierespons en de grote bandbreedte. Ze zijn bovendien robuust en goedkoop. Het grote nadeel is de (reeds eerder vernoemde) niet-lineariteit tussen verplaatsing t.g.v. de druk en capacitieve waarde van de opnemer.

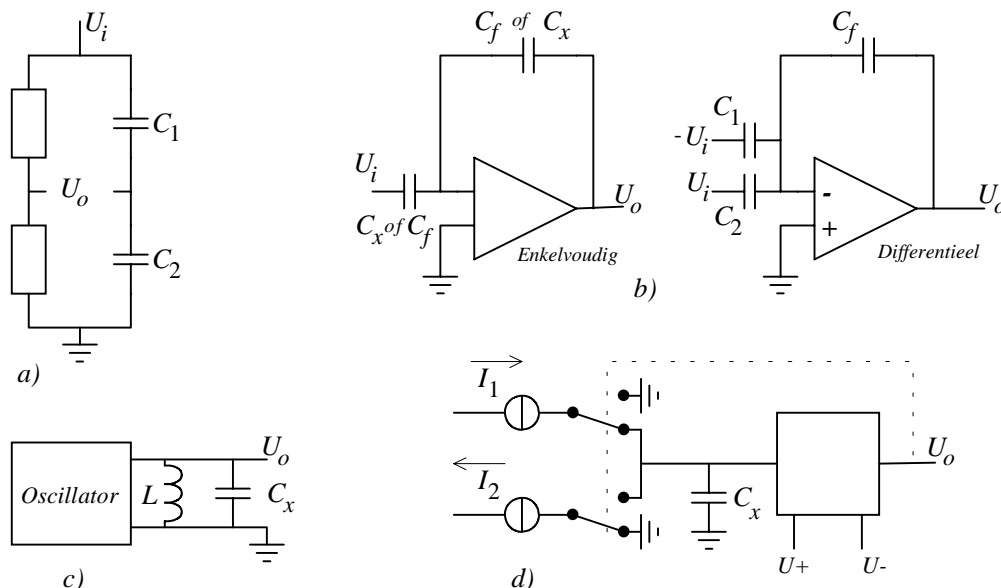
Zij worden bijvoorbeeld toegepast in de akoestiek bij de condensator-microfoon.

Een derde voorbeeld is de *capacitieve vochtigheidssensor*, weergegeven in figuur 2.27.c. Bij fabricage wordt de chroomlaag sterk belast zodat deze in een fijne mozaïek breekt. Hierdoor kan het polymeer de watermoleculen uit de omgevingslucht absorberen en verandert de capacitieve waarde. Deze opnemers zijn chemisch bestendig en bezitten een relatief goede gevoeligheid. De capaciteitswaarde varieert van enkele picoFarad bij droge lucht tot ongeveer 150 pF bij 100 % relatieve vochtigheid. Nadelig zijn het niet-lineair verband tussen capacitieve waarde en vochtigheid, de lichte temperatuurgevoeligheid, de traagheid van de sensor en de gevoeligheid aan veroudering en vervuiling. Het meetbereik ligt tussen 5 % en 85 % relatieve vochtigheid.

8.6 Interfacing

Capaciteitsveranderingen zijn eenvoudig te meten. Er zijn globaal vier methoden te onderscheiden (figuur 2.28):

- ♦ impedantiemeting in een brug, bij voorkeur met differentiële capaciteiten
- ♦ stroomspanningsmeting met de capaciteit in de terugkoppelketen van een opamp
- ♦ frequentiemeting met C als frequentiebepalend element in een LC -oscillator
- ♦ tijdmeting door laden en ontladen van C met een constante stroom



Figuur 2.28: Vier methoden voor het meten van een capaciteit: a) brugmethode met differentiële opnemer, b) stroom-spanningsmeting met opamp al dan niet differentiële, c) oscillatormethode en d) tijdmethode.

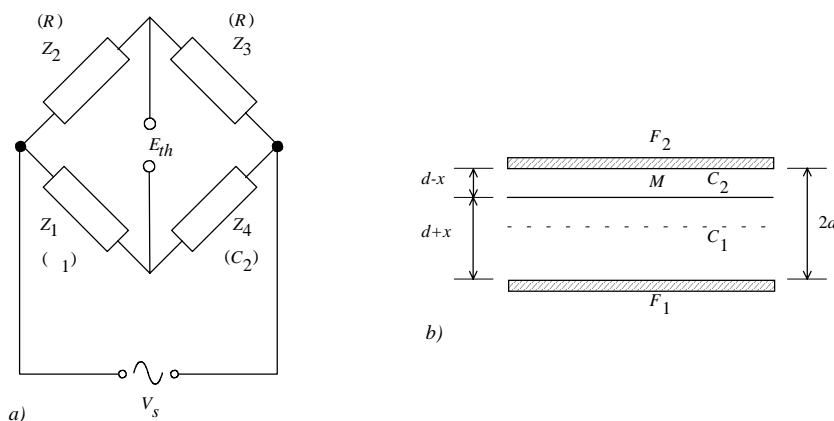
De meest eenvoudige capacitieve opnemers, namelijk deze waarbij de afstand d tussen de platen varieert, geven een capacitieve waarde die omgekeerd evenredig is met de verandering of

verplaatsing x . Om een uitgangsspanning te bekomen die lineair afhankelijk is van de verplaatsing x , kunnen de eerste twee methodes, nl. de impedantiemeting in een brug met differentiële capaciteiten en de stroom-spanningsmeting met de capaciteit in de terugkoppelketen van een opamp, gebruikt worden.

Voor de *brug* gelden volgende vergelijkingen (figuur 2.28.a):

$$\begin{aligned} \text{- enkelvoudige sensor: } & \left. \begin{aligned} C_1 &= C + \Delta C \\ C_2 &= C \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{U_o}{U_i} = \frac{-\Delta C}{4C + 2\Delta C} \approx -\frac{\Delta C}{4C} \left(1 - \frac{\Delta C}{2C}\right) \\ \text{- differentiële sensor: } & \left. \begin{aligned} C_1 &= C + \Delta C \\ C_2 &= C - \Delta C \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\Delta C}{2C} \end{aligned}$$

Figuur 2.29 geeft nog een tweede voorbeeld van een differentiële capacitieve plaatsopnemer en de bijbehorende brugschakeling.



Figuur 2.29: Differentiële capacitieve opnemer: a) brug en b) (mogelijke) opbouw.

Figuur 2.29.b toont de bouw van een differentiële capacitieve opnemer. De plaat M beweegt tussen twee vaste platen F_1 en F_2 . x stelt de verplaatsing voor t.o.v. het centrum (aslijn). De capaciteit C_1 wordt gevormd door de platen M en F_1 , C_2 door M en F_2 .

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d+x} \quad \text{en} \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d-x}$$

De relatie tussen C_1 of C_2 en x is niet lineair. Om dit verband lineair te maken, worden de capaciteiten opgemeten in een brug. Zie figuur 2.29.a. Algemeen geldt:

$$E_{th} = V_s \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_4} - \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right)$$

hierbij stellen we $Z_2 = Z_3 = R$, $Z_1 = 1/j\omega C_1$ en $Z_4 = 1/j\omega C_2$. Dit geeft dan:

$$E_{th} = V_s \left(\frac{1/C_1}{1/C_1 + 1/C_2} - \frac{R}{R+R} \right) = V_s \left(\frac{d+x}{2d} - \frac{1}{2} \right)$$

of

$$E_{th} = \frac{V_s}{2d} x$$

Dit geeft een lineair verband tussen de gemeten waarde E_{th} en de te meten waarde x !

Voor de *stroomspanningsmeting* uit figuur 2.28.b zijn de overdrachten respectievelijk:

- enkelvoudig: $\frac{U_o}{U_i} = -\frac{C + \Delta C}{C_f}$ (met de vaste impedantie C_f over de opamp)

- differentieel: $\frac{U_o}{U_i} = \frac{2\Delta C}{C_f}$

De differentiële meting maakt een grotere lineariteit en een groter dynamisch bereik mogelijk. Immers, bij de differentiële sensor is het uitgangssignaal nul bij $\Delta C = 0$, terwijl in het geval van een enkelvoudige sensor bij $\Delta C = 0$ reeds een aanzienlijk uitgangssignaal aanwezig is.

Indien de capaciteit omgekeerd evenredig verandert met de te meten grootte, moet de veranderlijke capaciteit over de operationele versterker geplaatst worden en de vaste capaciteit ervoor. Zo bekomen we terug een lineair verband tussen te meten en gemeten grootte. Verifieer dit!

De *oscillatorkring* uit figuur 2.28.c levert een frequentie die een maat is voor de capaciteitsverandering:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}} \approx f_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{2C} \right)$$

Een voordeel van de oscillatormethode is dat het uitgangssignaal gemakkelijk te verwerken is met een microprocessor: de frequentie kan immers worden gemeten door te tellen. Vanzelfsprekend mogen de overige frequentiebepalende circuitparameters niet veranderen. Ook moet de oscillatie gehandhaafd blijven, zelfs bij de maximaal optredende capaciteitsvariatie. Dat kan een nadeel zijn aangezien de elektronische circuits daardoor snel ingewikkeld en kritisch worden.

Een ander nadeel is wellicht de niet-lineariteit. Maar hiermee weet een processor wel raad. Tenslotte is het dynamisch bereik niet erg groot: in de referentiepositie is $f = f_0$. Veranderingen dienen dus te worden gemeten ten opzichte van deze soms vrij hoge waarde.

Een uitleesmethode die de voordelen van een geschikt uitgangssignaal combineert met een grote lineariteit is de tijdmeting, geïllustreerd in figuur 2.28.d. De onbekende capaciteit wordt afwisselend opgeladen en ontladen met een stroom I_1 respectievelijk I_2 . Bij het opladen stijgt de spanning over de condensator C_x lineair, totdat het bovenste hystereseniveau van de Schmitt-trigger is bereikt. De uitgangsspanning U_0 klapt om, waarmee ook de schakelaars worden omgezet, en de condensator wordt ontladen. Dit proces gaat door tot het onderste hystereseniveau bereikt is waarna de condensator weer wordt opgeladen. Er ontstaat dan aan de

uitgang een driehoekvormige spanning, met een vaste amplitude (bepaald door de uiterste grenzen van de Schmitt-trigger) en met een frequentie die direct gerelateerd is aan de grootte van de capaciteit C_x :

$$f = \frac{I}{2C_x U_s}$$

Hierin is U_s de uitgangszwaai van de Schmitt-trigger. Meestal is deze laatste gelijk aan het totale voedingsspanningsbereik. De frequentie kan eenvoudig bepaald worden met een telcircuit (al dan niet als onderdeel van een microprocessor).

Tabel 2.3 geeft tenslotte een samenvattend overzicht van enkele typen van capacitieve sensoren en hun respectievelijke eigenschappen.

| Type | Meetbereik | Hysterese Reproduceerb. | Resolutie | T.C. bij nulpunt | T bereik °C |
|-------------|---------------------------|----------------------------|-------------|---------------------|----------------|
| LVDC | 2,5 ... 250 mm | | 10^{-6} | | ... 80 |
| RVDC | 70 deg | 1 boog sec | 0,1 boogsec | | ... 150 |
| Nadering | 0 ... 20 mm | 5% ... 20% | | 0,1% /K | ... 70 |
| Versnelling | $\pm 0,5$... ± 150 g | 10^{-5} (FSD) | 10^{-6} g | 10 μ g/K | ... 115 |
| Tilt | ± 80 graden | | 0,01 graad | | ... 80 |
| Vochtigheid | 5% ... 85% | 1% ...2% | | | -10 ... 160 |

Tabel 2.3: Capacitieve opnemers.