

Blok 4

Sensoren in regelkringen

Doelstellingen:

- Een overzicht van actieve en passieve sensoren geven.
- Principe van enkele belangrijke sensoren verklaren voor het meten van :
 - temperatuur;
 - verplaatsing;
 - druk;
 - debiet;
 - niveau.
- Rol toelichten van de meetzender in combinatie met de sensor.

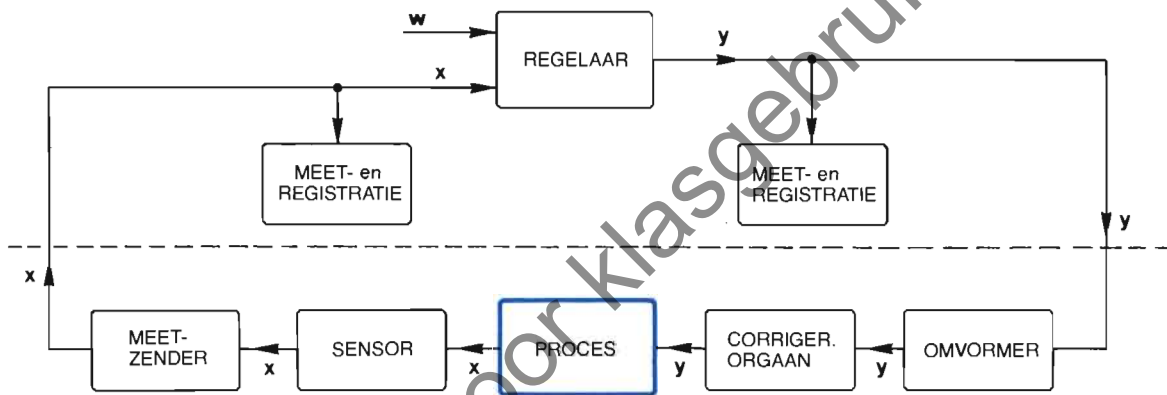


Fig. 4.1 Instrumenten in de gesloten kring

Kijk naar de plaats van de sensor in de gesloten regelketen. In blok 3 zijn alle delen behandeld behalve de sensoren en de meetzender. Omdat sensoren alle belangrijke procesparameters kunnen registreren en via de regelaar en het corrigerend orgaan het proces kunnen beïnvloeden, vervullen ze een hoofdrol.

Hoewel de halfgeleidertechniek meer en meer procesgerichte stappen aan de sensor toevoegt, zodat men spreekt van intelligente sensoren (smart transmitters) beperken we ons hier tot de belangrijkste fysische principes.

Voor meer informatie over sensorkarakteristieken verwijzen we naar de uitgave "REGELTECHNIEK-PROCESTECHNIEKEN"

Inhoud:

1. Indeling van sensoren.
2. Temperatuursensoren.
3. Verplaatsingssensoren.
4. Druksensoren.
5. Debietsensoren.
6. Niveausensoren.
7. Overzicht van sensoren.
8. Meetzenders of transmitters.
9. Opdrachten.

1. Indeling van sensoren

Een sensor of opnemer is het element dat rechtstreeks de invloed ondergaat van de fysische grootheid die in het proces gemeten moet worden. Hierbij steunen we op een aantal fysische effecten. Deze effecten zullen in de meetomvormer omgezet worden naar een standaardsignaal, dat dient als ingang voor de regelaar.

Sensor en meetomvormer worden uitvoerig behandeld in een cursus industriële metingen. Hier is het enkel de bedoeling een idee op te doen over enkele typische technologische opvattingen.

De effecten van fysische grootheden, zoals temperatuur, verplaatsing, druk, debiet, niveau en vele andere, zijn hoofdzakelijk in twee groepen te verdelen:

- rechtstreekse omzetting naar elektrische grootheden, en
- een omzetting naar een verplaatsing.

1.1 Rechtstreekse omzetting naar elektrische grootheden

a Rechtstreekse omzetting naar een weerstandswaarde.

- Van een platina weerstand en van een halfgeleider PTC weerstand stijgt de weerstandswaarde bij een stijgende temperatuur.
- De NTC weerstandswaarde daalt bij stijgende temperatuur.
- De LDR weerstandswaarde daalt bij stijgende lichtsterkte.
- Bij stijgend magnetisch veld stijgt de weerstandswaarde van een MDR weerstand.
- Vochtigheid verandert de weerstand van een lithium-chloride cel.

b Rechtstreekse omzetting naar spanning

- De spanning aan de klemmen van een thermokoppel stijgt bij stijgende temperatuur.
- Toenemende lichtsterkte op een zonnecel doet de geproduceerde spanning stijgen.
- Een stijgende druk op een kristalopnemer doet de spanning aan het oppervlak van het kristal toenemen.
- Een stijgend toerental wordt door een tachodynamo direct omgezet naar een stijgende spanning.
- Stijgend magnetisch veld doet de spanning aan een Hall-plaatje stijgen.

1.2 Omzetting naar een verplaatsing

De fysische grootheid veroorzaakt eerst een mechanische verplaatsing. Bijvoorbeeld: temperatuur doet vloeistof uitzetten, luchtdruk doet een membraan verplaatsen enz... Deze beweging kan dan gebruikt worden om een omzetting te doen naar een elektrisch signaal of naar een pneumatisch signaal.

- De beweging kan aangewend worden om een weerstand, een capaciteit of een inductantie te veranderen. Een rekstrookje neemt de beweging over van het lichaam waarop het geplakt is, zodat de weerstandswaarde groter of kleiner kan worden. Een kern in een spoel kan verplaatst worden, zodat de inductantie verandert.
- Ook kan deze beweging rechtstreeks een spanning of stroom opwekken. Dit kan bijvoorbeeld door een potentiometer aan te drijven of via een beweging druk uit te oefenen op een kristal.

We zullen met enkele principes de volgende sensoren nader verklaren:

- temperatuursensoren;
- verplaatsingssensoren;
- druksensoren;
- debietsensoren;
- niveausensoren.

2. Temperatuursensoren

2.1 Directe omvorming van de weerstandswaarde



Fig. 4.2 Temperatuursensor met platinaweerstand (Siemens)

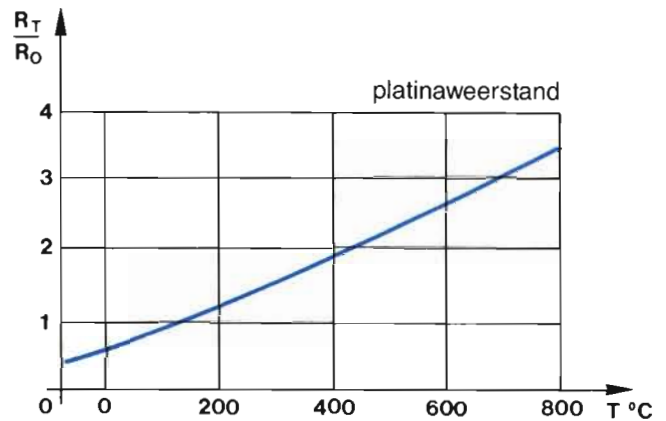


Fig. 4.3 Verandering van de weerstand van een platinaweerstand in functie van de temperatuur

In fig. 4.2 zien we een typische behuizing van een temperatuursensor. In een stalen beschermende buis is een **platinaweerstand** ingebouwd. De weerstand bevindt zich in het uiteinde van de buis, en het geheel kan met een schroefbevestiging in een wand van het proces gemonteerd worden. Van -200° tot $+600^\circ$ wordt een weerstandsvariatie opgegeven van 18,53 tot 313,65 Ω . Dit verloop wordt getoond in fig. 4.3.

De platinaweerstand is een voorbeeld waarbij een fysische grootheid, in dit geval de temperatuur, direct wordt omgezet naar een evenredige weerstandswaarde. Om ook kleine temperatuursveranderingen te kunnen meten, gebruiken we een meetversterker opgebouwd met operationele versterkers. Hierdoor ondergaat de signaalspanning van de sensor een instelbare constante versterking.

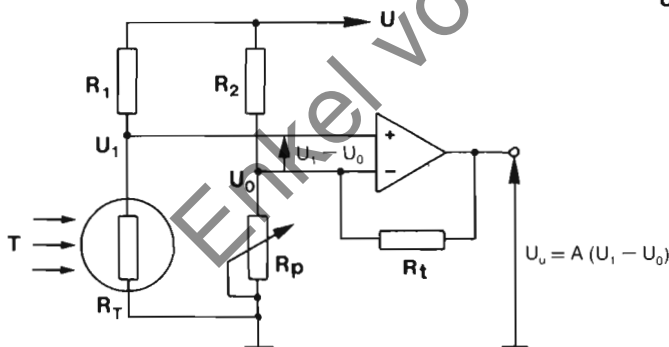


Fig. 4.4 Weerstandsmeting met brugversterker

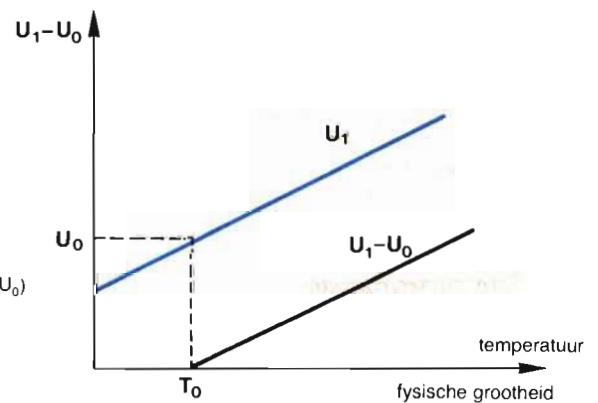


Fig. 4.5 De verschilspanning in functie van de fysische grootheid

In fig. 4.4 vormt de platinaweerstand R_T samen met R_1 een spanningsdeler. Nu is de waarde van R_T afhankelijk van de temperatuur. Hierdoor ontstaat over R_T een spanning U_1 die een maat is van deze fysische grootheid. Men kan nu U_1 vergelijken met een vast ingestelde waarde U_0 en het verschil als maatgetal voor de temperatuurmeting nemen. Op deze wijze doen we nul volt overeenstemmen met een bepaalde vertrekwaarde T_0 van de temperatuur als fysische grootheid. De vertrekwaarde kan men zelf kiezen door het instellen van R_p . Als bijvoorbeeld bij 0°C de spanning U_1 gelijk is aan 1 volt en we stellen met R_p de spanning U_0 gelijk aan 1 volt dan zal de verschilspanning $U_1 - U_0$ bij 0°C precies nul volt zijn. De weerstandsbrug, die gevolgd wordt door een versterker, noemt men de brugversterker.

De uitgangsspanning wordt nu A -maal groter of:

$$U_u = A (U_1 - U_0)$$

2.2 Directe omzetting naar een spanning

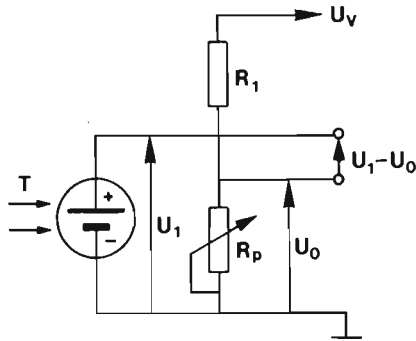


Fig. 4.6 Thermokoppel als actieve spanningsbron

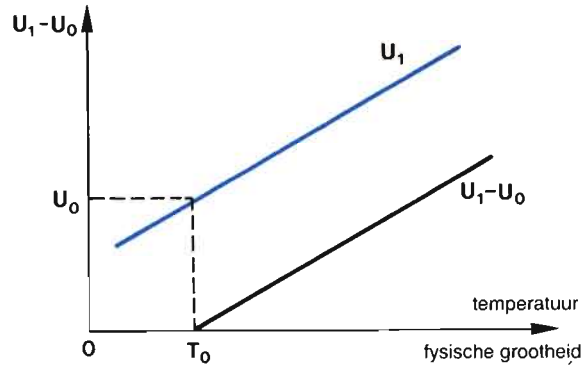


Fig. 4.7 Spanning thermokoppel is evenredig met de temperatuur

Met behulp van een thermokoppel kan de temperatuur rechtstreeks worden omgezet naar een evenredige spanning. De spanning wordt in fig. 4.6 voorgesteld door een actieve spanningsbron U_1 . Ook hier wordt de gemeten spanning U_1 vergeleken met een instelbare referentiewaarde U_0 . De verschilspanning $U_1 - U_0$ kan als maatgetal beschouwd worden van de temperatuur. Nul volt verschilspanning zal dan overeenkomen met een bepaalde vertrekwaarde T_0 .

Thermokoppel

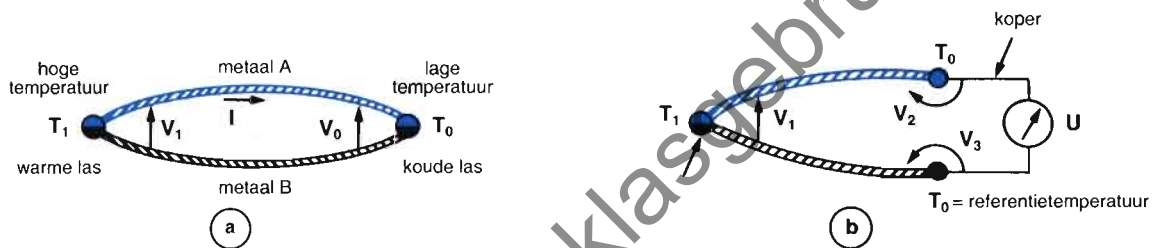


Fig. 4.8 Thermokoppel als temperatuursensor

Het thermokoppel bestaat uit twee draden van verschillende metalen die tegen elkaar gesoldeerd of geperst zijn. Tussen de scheidingsvlakken ontstaat een elektrische spanning die evenredig is met de temperatuur. Als in fig. 4.8a T_1 hoger is dan T_0 dan is $V_1 > V_0$. Hierdoor loopt er een stroom van de warme las naar de koude las.

Brengt men een voltmeter aan zoals in fig. 4.8.b dan ontstaan er twee extra thermospanningen V_2 en V_3 wegens contacten met de koperen leiding. Is de referentietemperatuur T_0 voor beide verbindingpunten dezelfde dan is $V_2 - V_3 = V_0$. Vandaar dat de voltmeter een spanning aanduidt $U = V_1 - V_0$ die evenredig is met de temperatuur. Dit wordt in fig. 4.9 weergegeven voor de materialen ijzer-constantan, nikkel chroom-nikkel en platina-platina-rhodium.

Stralingspyrometer

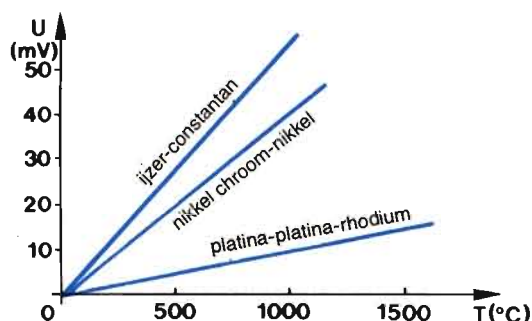


Fig. 4.9 Spanning van een thermokoppel

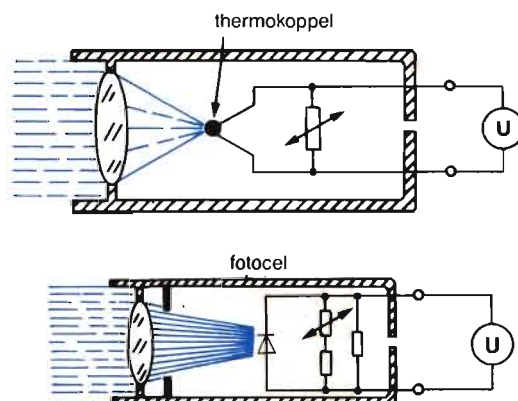


Fig. 4.10 Stralingspyrometer.

De beschermende wand van de hierboven beschreven sensors is niet bestand tegen extreem hoge temperaturen. Met de **stralingspyrometer** wordt de warmtestraling van een bron opgevangen en geconcentreerd op een thermokoppel of een fotocel. Zie fig. 4.10. De geproduceerde spanning aan deze elementen is evenredig met de temperatuur.

2.3 Temperatuursensor en meetzender

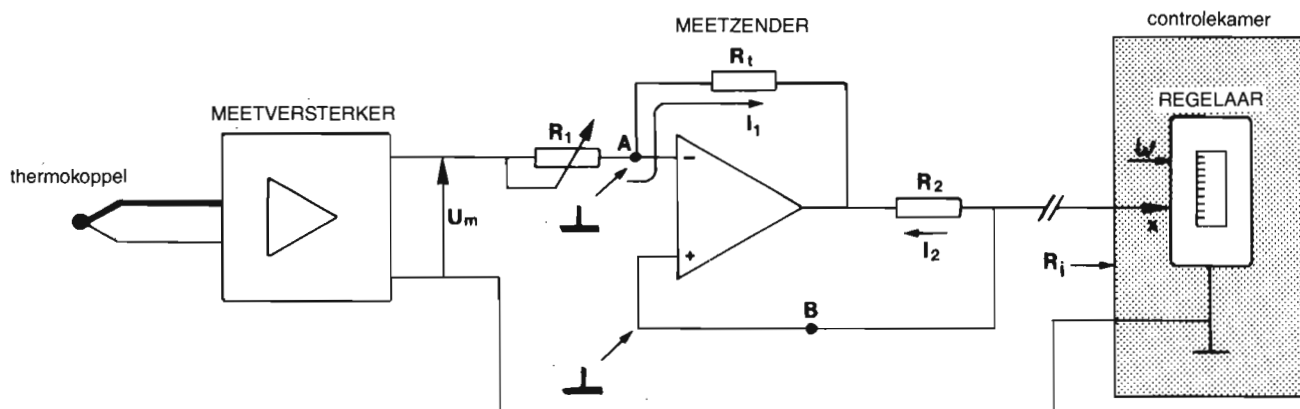


Fig. 4.11 Thermokoppel met meetversterker en meetzender

Het thermokoppel levert een gelijkspanning van 0 ... 50 mV in functie van de temperatuur.

Door de meetversterker in fig. 4.11 wordt deze lage spanning opgevoerd tot een meetspanning $U_m = 0 \dots 10$ V.

Meestal wordt deze meetspanning omgevormd tot een gestandaardiseerde meetstroom van 4 ... 20 mA.

Hierdoor kan men gemakkelijk de vaak lange afstanden tussen meetpunt en controlekamer overbruggen zonder dat er fouten optreden. Bovendien leidt de gestandaardiseerde meetstroom tot uniforme apparaten die gemakkelijk uitwisselbaar zijn. Ziehier een voorbeeld van een spanning U_m om te zetten naar een stroom I_2 .

Als meetzender gebruiken we een operationele versterker.

Als de stroomingang van de regelaar gebruikt wordt dan heeft deze een verwaarloosbare lage ingangsweerstand R_i . De potentiaal op de lijn B is dan praktisch nul volt. Op de (–) ingang van de opamp stelt zich een potentiaal in die gelijk is aan deze op de (+) ingang, dit door de hoge open loop gain. Op A is de potentiaal dus ook praktisch nul volt.

Hierdoor staan R_1 en R_2 parallel en is in de spanningsval over beide weerstanden gelijk of

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_2} \cdot I_1$$

Bij een ideale OA loopt doorheen R_1 en R_t dezelfde stroom I_1 , omdat de ingangsweerstand tussen (–) en (+) zeer groot is.

Nu is $I_1 = \frac{U_m}{R_1}$ U_m staat over R_1 aangezien A op nul volt gehouden wordt.

$$I_2 = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{U_m}{R_1} = k \cdot U_m$$

De meetzender levert een uitgangsstroom I_2 die evenredig is met de aangelegde meetspanning U_m . De grootte van I_2 is instelbaar met R_1 .

3. Verplaatsingssensoren

Het meten van verplaatsingen is een van de belangrijkste aspecten in de regeltechniek. Bovendien zijn er veel sensoren waar er eerst een verplaatsing moet optreden om vervolgens een elektrisch of pneumatisch signaal op te wekken. We bepalen ons tot enkele principes van veel in de praktijk voorkomende systemen.

3.1 Rekstrookje

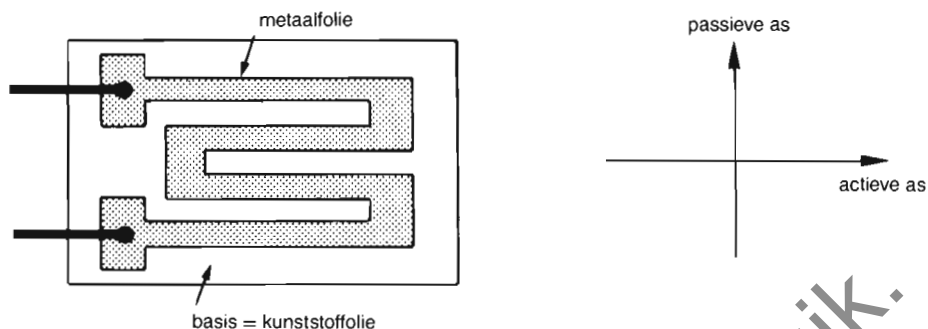


Fig. 4.12 Rekstrookje met zijn actieve en passieve as

Naast de potentiometer is het rekstrookje de belangrijkste resistieve sensor. Een rekstrookje is een dunne metaaldraad die bevestigd is op een drager uit kunststoffolie. In fig. 4.12 bestaat de draad uit een dunne metaallaag die een lengte verandering mag ondergaan volgens de actieve as.

Wordt een rekstrookje geplakt op een lichaam dan zullen alle oppervlaktebewegingen overgedragen worden op het rekstrookje waardoor de weerstand zal veranderen.

Wordt een metalen draad met een ohmse weerstand R_0 uitgerokken dan stijgt zijn weerstand met een bedrag ΔR .

$$\text{Inderdaad; } R_0 = \rho \cdot \frac{L_0}{A_0}$$

Als de lengte L toeneemt en de doorsnede A daalt dan wordt:

$$R = \rho \frac{L_0 + \Delta L}{A_0 - \Delta A} = R_0 + \Delta R$$

Met behulp van een brugschakeling, zoals deze van fig. 4.4, wordt de verplaatsing $\Delta L \triangleq \Delta R$ omgezet in een evenredige spanning.

Het rekstrookje kan dus beschouwd worden als een sensor die rechtstreeks een zeer kleine verplaatsing omzet naar een weerstandsverandering. Het is geschikt voor het meten van trek- en drukkrachten op een lichaam waarop het rekstrookje bevestigd is. Rekstrookjes worden daarom veel toegepast in weegapparatuur, bij persmachines en bij het onderzoek van vleugels en rompen van vliegtuigen.

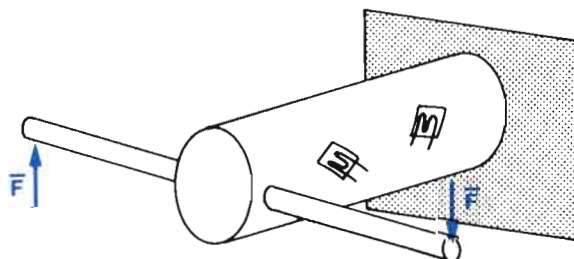


Fig. 4.13 Meten van wringing van een staaf

Met twee rekstrookjes kan men de vervorming meten die optreedt in de staaf van fig. 4.13 waarop een krachtenkoppel inwerkt. Door de rekstrookjes te plaatsen in de weerstandsbrug van fig. 4.4 kan men de gevoeligheid verdubbelen en de invloed van de temperatuur compenseren. Hiertoe neemt rekstrookje 1 de plaats in van R_T en rekstrookje 2 neemt de rol van R_p over. Het krachtenkoppel wordt dan omgezet in een evenredige spanning.

3.2 Differentiaaltransformator (LVDT)

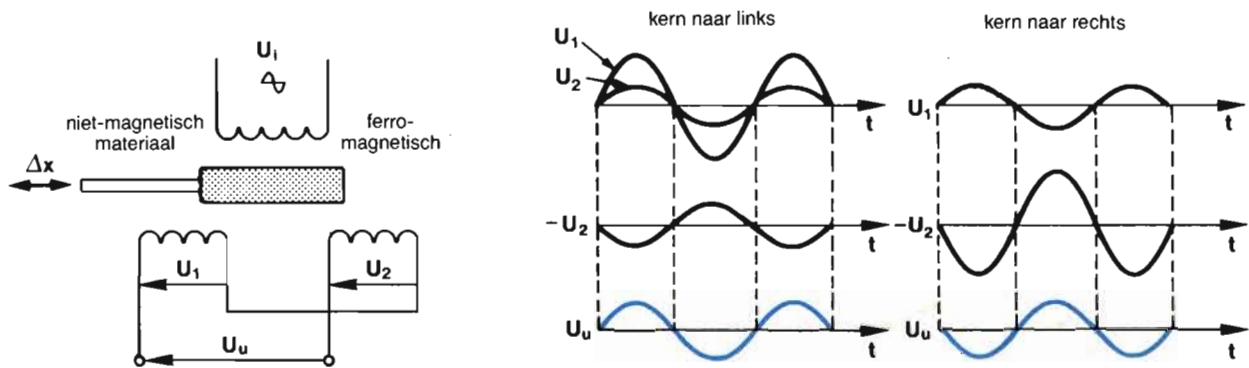


Fig. 4.14 Opbouw van een differentiaaltransformator en signaalvormen

De differentiaaltransformator van fig. 4.14 is een voorbeeld van een inductieve sensor. Hij bevat een beweegbare kern, een primaire wikkeling en twee secundaire wikkelingen. Bevindt de ferromagnetische kern zich in het midden of de nulstand dan zijn de secundaire spanningen U_1 en U_2 gelijk. Omdat de twee secundaire wikkelingen in serie maar in oppositie geschakeld zijn, wordt $U_u = U_1 - U_2 = 0$. Als de kern naar links beweegt dan is $U_1 > U_2$ of U_u is in fase met U_1 . Beweegt de kern naar rechts dan is $U_1 < U_2$ of U_u is in fase met U_2 . De grootte van de uitgangsspanning U_u is dus evenredig met de verplaatsing; de fase van U_u geeft de zin van de beweging aan.

De Engelse benaming voor differentiaaltransformator is "linear variable differential transformer" of afgekort LVDT.

In fig. 4.15 wordt het blokschema van een LVDT als verplaatsingssensor getoond.

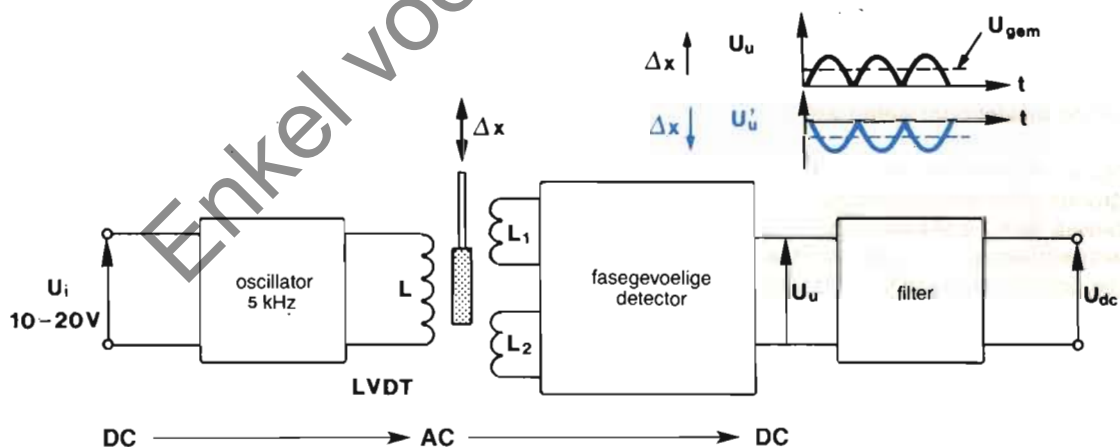


Fig. 4.15 Blokschema van een LVDT als verplaatsingssensor

De ingangsspanning U_1 is een gelijkspanning van 10 tot 20 V. Een oscillator wekt een wisselspanning op van 5 kHz. De totale verplaatsing van de kern bedraagt 24 mm; 12 mm naar boven en 12 mm naar onder, gerekend van de nulpositie. Bij een verplaatsing naar boven wordt U_u een positief dubbelzijdig gelijkgerichte wisselspanning. Beweegt de kern naar beneden dan ontstaat een negatief gelijkgerichte spanning U_u' . Met een laagdoorlaatfilter wordt de rimpelspanning beperkt tot 30 mV top tot top bij een gelijkspanning $U_{dc} = 5$ V.

LVDT's zijn geschikt voor verplaatsingen van 0,5 mm tot 600 mm en in dit werkgebied is de lineariteit beter dan 0,5%.

3.3 Capacitieve verplaatsingssensor

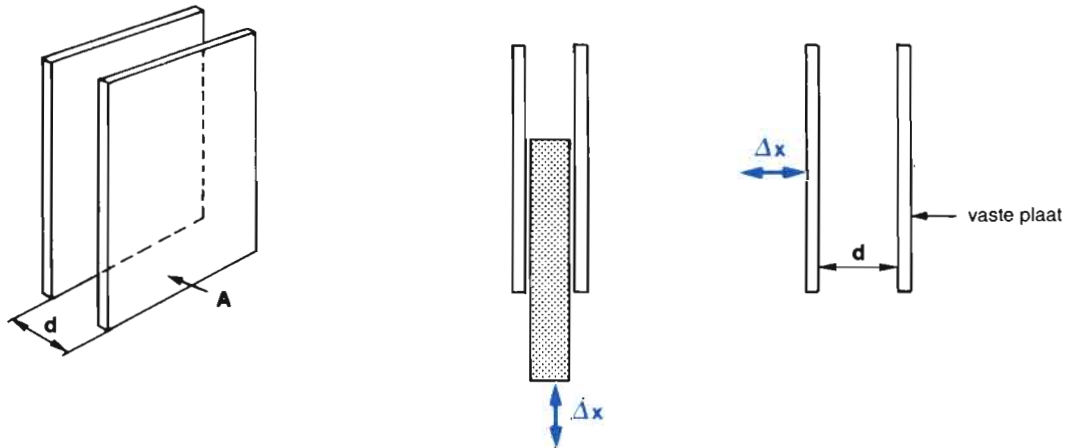


Fig. 4.16 Twee methoden om de capaciteit van een condensator te wijzigen

Een condensator bestaat uit twee geleidende plaatjes gescheiden door een isolator of diëlectricum. De meest eenvoudige vorm zijn twee evenwijdige plaatjes met lucht als diëlectricum zoals in fig. 4.16 is weergegeven. De capaciteit C van een condensator wordt bepaald door:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \text{ in farad}$$

Hierin is: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ = absolute diëlectrische constante;
 ϵ_r = relatieve diëlectrische constante; $\epsilon_r = 1$ voor lucht
 A = plaatoppervlakte;
 d = afstand tussen de platen.

Brengt men tussen de platen een isolator aan dan wordt $\epsilon_r > 1$ zodat C toeneemt. Hoe verder de isolator tussen de platen dringt, des te groter wordt C . Men kan de grootte van C ook variëren door gebruik te maken van een beweegbare plaat en een vaste plaat. Naarmate d stijgt, zal C afnemen.

Uit de wisselstroom weten we: $I = \frac{U}{1/\omega C} = \omega CU$

Nu is I afhankelijk van C terwijl C afhankelijk is van de afstand d . We bekommen dus een stroom waarvan de grootte afhankelijk is van de afstand d . Dit betekent dat de verplaatsing van het diëlectricum of van een beweeglijke plaat kan omgezet worden in een evenredige wisselstroom. Met behulp van een wisselspanningsbrug en een fasegevoelige gelijkrichter wordt de verplaatsing omgezet in een gelijkspanning die positief of negatief is afhankelijk van de verplaatsing.

3.4 Resolver

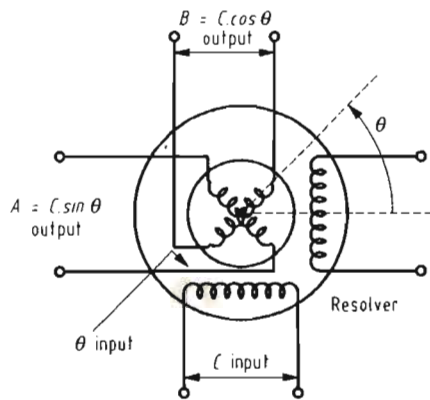


Fig. 4.17a

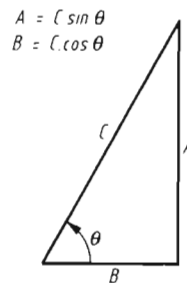


Fig. 4.17b

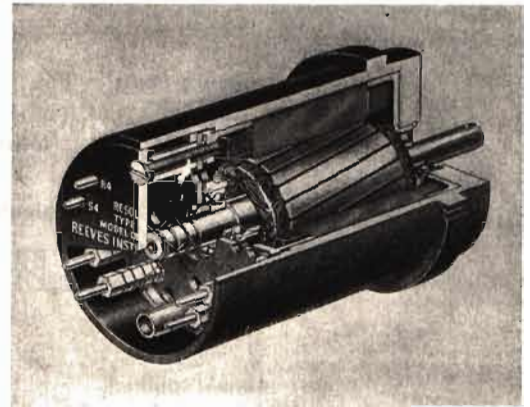


Fig. 4.17c

Met een resolver kunnen hoekverdraaiingen gemeten worden. We zien in figuur 4.17a de principiële schematische voorstelling van een resolver. Figuur 4.17c toont ons het uitwendig zicht. De constructie bestaat uit een stator en het draaiend gedeelte, de rotor. Op de stator bevinden zich twee windingen die in de ruimte loodrecht op elkaar staan. Ook op de rotor zijn de twee windingen loodrecht op elkaar gemonteerd. Het geheel kan beschouwd worden als een transformator, waarvan de rotorwindingen ten opzichte van de statorwindingen verdraaid kunnen worden. De overdrachtsverhouding is meestal 1 : 1. Naargelang het aantal gebruikte windingen en naargelang de wijze waarop ze gebruikt worden, zijn talrijke toepassingen mogelijk.

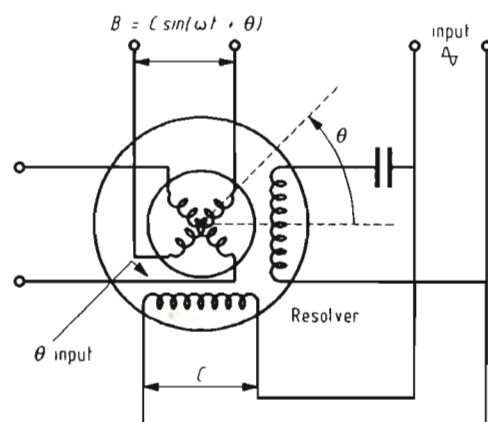
Stel dat op de winding C een wisselspanning wordt aangesloten. De overdrachtsverhouding naar de secundaire (de rotor) is 1. Staat de winding B evenwijdig met C dan is de amplitude van de opgewekte wisselspanning B gelijk aan C. Nemen we deze positie van de as als de vertrekstand $\theta = 0$.

Wordt de as verdraaid, zodat de spoel B op 90° staat t.o.v. de statorspoel C, dan wordt er geen spanning opgewekt in spoel B.

Wordt de as zodanig verdraaid dat de spoel B op een hoek θ staat t.o.v. de statorspoel C dan is de opgewekte spanning in B gelijk aan $B = C \cdot \cos \theta$. De opgewekte spanning in de spoel A is dan gelijk aan $A = C \cdot \sin \theta$.

De amplitude van deze spanningen kan men doen overeenkomen met de zijden van een rechthoekige driehoek, zoals voorgesteld in figuur 4.17b. Is dus de hoek θ een bekende waarde, samen met de waarde C, dan vormen de spanningen A en B de te zoeken onbekenden in de rechthoekige driehoek. Voor elke positie van de hoek θ , levert de resolver ons als oplossing de rechthoeks zijden van de driehoek.

Door gebruik te maken van andere schakelmethoden, kunnen alle problemen in een rechthoekige driehoek opgelost worden.



Een heel bijzondere toepassing zien we in figuur 4.17d. Door het serieschakelen van een aangepaste condensator kan de stroom door de ene statorwinding 90° verschoven worden t.o.v. de stroom door de andere winding. Er ontstaat een draaiveld door de rotor. Men kan aantonen dat de spanning geïnduceerd in de rotorwinding B over een hoek θ verschoven is t.o.v. de spanning C, hoek die overeenkomt met de mechanische verdraaiing van de rotor. De mechanische hoek wordt dus vertaald naar een faseverschuivingshoek.

3.5 Optische verplaatsingssensor

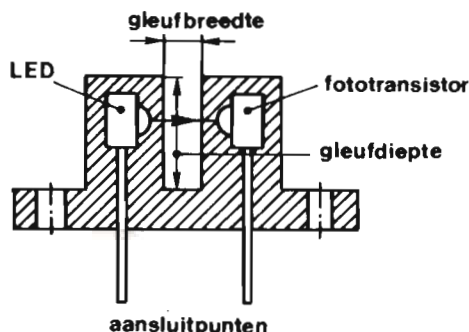


Fig. 4.18 Foto-microsensor met gleuf

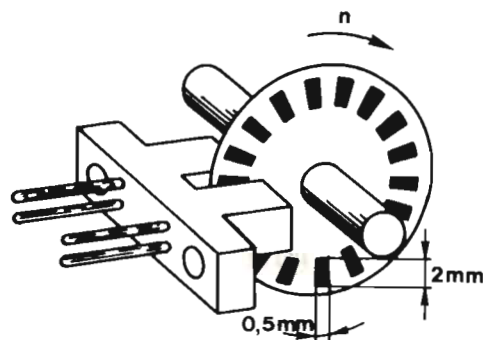


Fig. 4.19 Foto-microsensor met roterende schijf

Een optische sensor bestaat uit een LED die als lichtzender optreedt en een fototransistor als lichtontvanger. In fig. 4.18 is een foto-microsensor met gleuf weergegeven.

Wenst men het aantal omwentelingen van een as te bepalen, dan kan de opstelling van fig. 4.19 toegepast worden.

De afmetingen van de spleetjes zijn zodanig klein dat op een schijf tot 3000 spleetjes kunnen aangebracht worden.

Wanneer de schijf 1 omwenteling per seconde doet, dan worden er 3000 lichtonderbrekingen per seconde voortgebracht.

De schakelfrequentie van een microsensor is zo groot dat hij dit ritme gemakkelijk kan volgen.

Door het aantal impulsen te tellen, kan men het toerental of de positie van de as zeer nauwkeurig bepalen.

4. Druksensoren

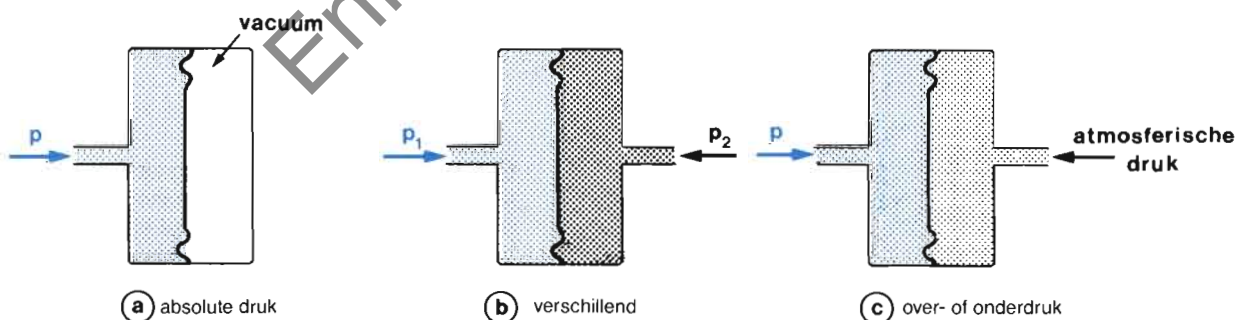


Fig. 4.20 Meten van druk

Druksensoren zetten de te meten druk via een membraanvlak om in een gerichte kracht die een beweging of vervorming veroorzaakt.

We onderscheiden in fig. 4.20 drie mogelijkheden om de druk te bepalen:

- Absolute druksensoren; hier wordt het drukverschil gemeten ten opzichte van het vacuüm.
- Verschildruksensoren; nu wordt het drukverschil gemeten tussen twee meetdrukken p_1 en p_2 .
- Over- en onderdruksensoren; het drukverschil wordt bepaald ten opzichte van de atmosfeer of de druk van de buitenlucht.

4.1 Elektromechanische druksensoren

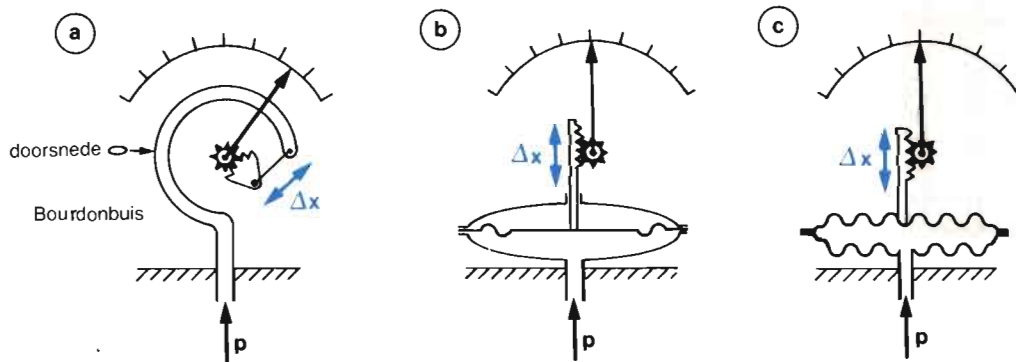


Fig. 4.21 Omzetting van luchtdruk naar beweging d.m.v.
a) Bourdonbuis - b) membraan - c) balg

In fig. 4.21.a zien we drie manieren om een luchtdruk om te zetten naar een beweging. We onderscheiden achtereenvolgens de bourdonbuis, het membraan en de balg. In deze gevallen kan de beweging worden omgezet in een evenredige spanning. We beschouwen drie mogelijke uitvoeringsvormen.

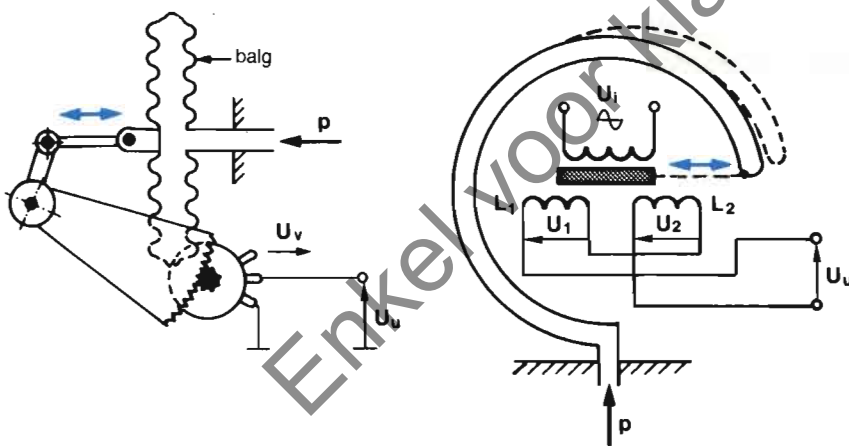


Fig. 4.22 Omzetting druk naar potentiometerstand

Fig. 4.23 Bourdonbuis en LVDT

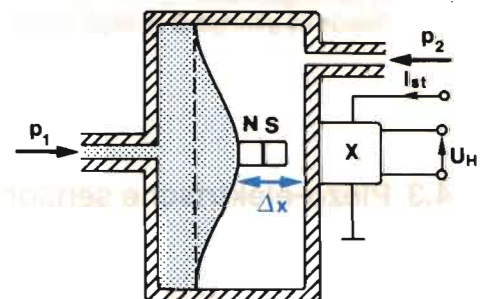


Fig. 4.24 Membraan met Hall-plaatje

a) Balg met potentiometer

In fig. 4.22 wordt het uitzetten van de balg via een tandwielmechanisme overgedragen naar een precisiepotentiometer.

Aan de looper kan men een spanning U_v aftakken die evenredig is met de druk p .

b) Bourdonbuis met LVDT

Als de druk p toeneemt zal de C-vormige Bourdonbuis in fig. 4.23 zich meer gaan strekken. Deze beweging wordt overgedragen naar de kern van een differentiaaltransformator. Voor de werking kijk je naar de uitleg op blz. 65.

c) Membraan met Hall-plaatje

In fig. 4.24 is een permanente magneet op het membraan aangebracht. Op het huis bevindt zich een Hall-plaatje. Wordt p_1 groter dan stijgt ook de magnetische veldsterkte rond het Hall-plaatje. Bij een constante stroom I_{st} is de Hall-spanning U_H recht evenredig met de fluxdichtheid B , dus met de te meten druk p_1 .

4.2 Halfgeleider druksensor

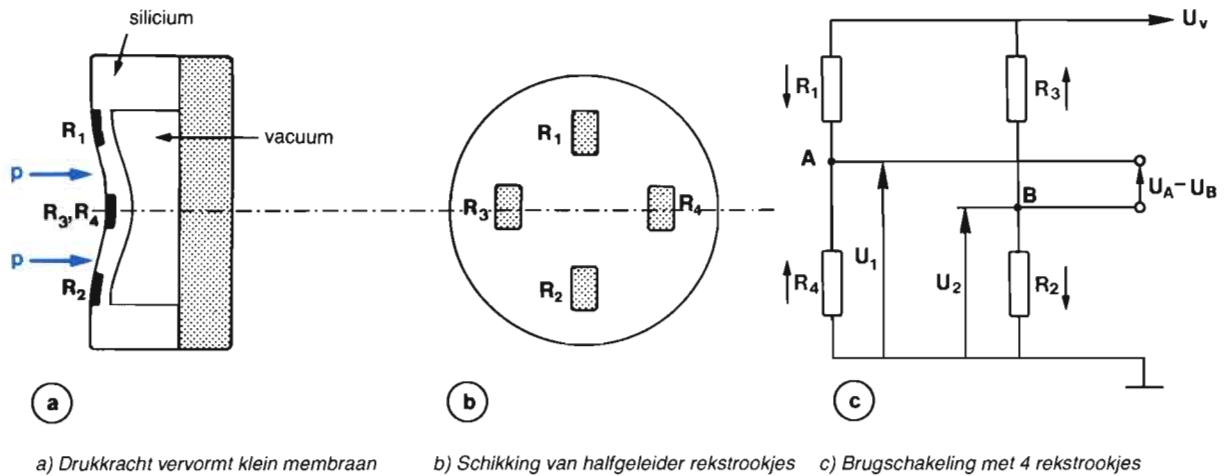


Fig. 4.25 Halfgeleider druksensor

Sommige kristallijne materialen zoals silicium bezitten een hoog piëzoresistief effect. Dit betekent dat een geringe drukkracht een grote weerstandsverandering tot gevolg heeft. Hierdoor bezitten ze een gevoeligheid die honderd maal groter is dan die van gewone rekstrookjes met metaalfolie.

Bij een halfgeleider druksensor bestaat het membraan uit een klein monokristallijn siliciumschijfje. De rekstrookjes zijn in het silicium gediffundeerd.

Onder invloed van een druk p wordt het membraan vervormd zoals in fig. 4.25.a overdreven is voorgesteld. De constructievorm en de plaatsing van de weerstanden is zodanig opgevat dat de weerstandswaarde van R_1 en R_2 kleiner wordt terwijl de weerstandswaarde van R_3 en R_4 stijgt. In de brugschakeling van fig. 4.25c is $U_A = U_B$ als $p = 0$ (geen druk en geen vervorming op het membraan). Reeds bij geringe druk stijgt U_A en daalt U_B zodat een potentiaal verschil ontstaat $U_A - U_B$.

4.3 Piëzo-elektrische sensor

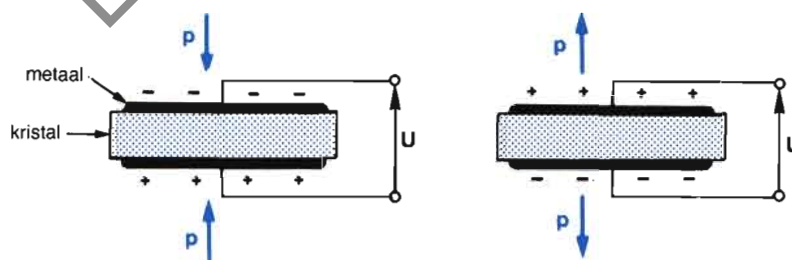


Fig. 4.26 Piëzokristal als druksensor

Een piëzo-elektrisch kristal wordt boven en onder van een metaallaag voorzien. Het kristal bestaat uit gekristalliseerd siliciumdioxide (SiO_2) waarin Si de drager is van positieve ladingen en zuurstof van de negatieve ladingen. Wordt in fig. 4.26 een drukkracht P uitgeoefend dan wordt de bovenste metaallaag negatiever en de onderste positiever. Bij een trekkracht ontstaan de tegengestelde polariteiten. Het ladingsverschil doet de spanning U ontstaan. Dit proces is omkeerbaar. Wordt aan het kristal een wisselspanning toegepast dan trilt het kristal op ritme van de frequentie van de toegepaste spanning.

5. Debiet-sensoren

In een proces komt de verplaatsing van materie veelvuldig voor. Wanneer het procesmedium een fluidum is zoals vloeistof, gas of damp dan is het debiet de hoeveelheid materiële transport per tijdseenheid.

Men kan op 3 manieren het debiet van vloeistoffen en gassen bepalen:

- 1) de snelheid meten waarmee de vloeistof of gas in een buis of kanaal stroomt in m/s (flow velocity);
- 2) het volume van de vloeistof of gas meten dat per tijdseenheid doorheen een buis verplaatst wordt in m³/s (volume flow rate);
- 3) de massa van de bewegende vloeistof of gas meten die per tijdseenheid doorheen de buis beweegt in kg/s (mass flow rate).

5.1 Turbinemeter

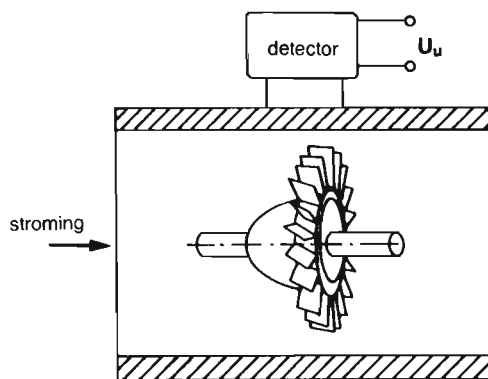


Fig. 4.27 a) Principe turbinemeter
b) uitvoering

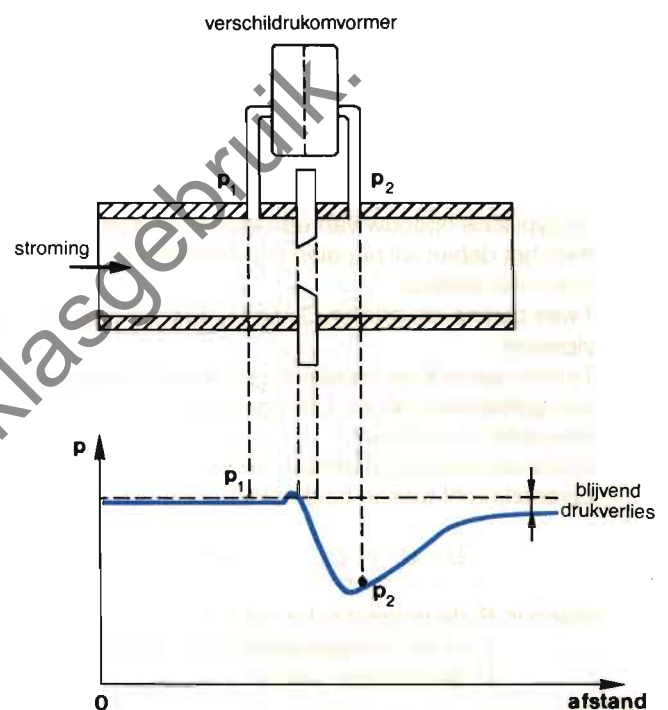


Fig. 4.28 Verloop van de druk in een verschilddruk meetelement

In de turbinemeter van fig. 4.27 bevindt zich een schoepenwiel. Zodra een vloeistof of gasstroom door de meter loopt, begint het schoepenwiel te draaien. Nabij het schoepenwiel bevindt zich een inductieve opnemer. Het periodisch voorbijtrekken van een schoep veroorzaakt een verandering van de magnetische flux zodat er in de spoel een spanning wordt opgewekt. Aan de uitgang van de detector ontstaat een pulstrein waarvan de frequentie evenredig is met de snelheid van de vloeistofstroom.

5.2 Debietmeting met meetschijf

Brengt men in het stromingstraject een schijf aan voorzien van een opening dan is de druk voor de meetschijf groter dan achter de schijf. In fig. 4.28 kan het verband tussen het debiet q en het drukverschil $p_1 - p_2$ als volgt uitgedrukt worden:

$$q = k \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$$

Het drukverschil wordt meestal in een verschilddrukvormer tot een pneumatisch of elektronisch signaal omgevormd.

5.3 Elektromagnetische debietmeter

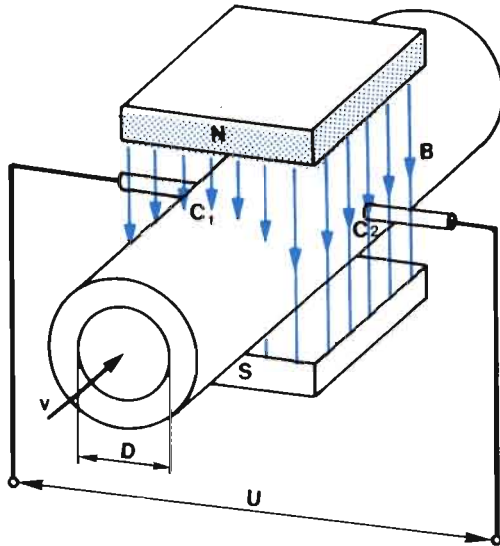


Fig. 4.29 Elektromagnetische debietmeter



Fig. 4.30 Uitvoering elektromagnetische debietmeter

De typische opbouw van een elektromagnetische debietmeter wordt getoond in fig. 4.29. De vloeistof waarvan men het debiet wil bepalen moet elektrisch geleidend zijn, terwijl de meetbuis zelf uit niet-elektrisch geleidend materiaal bestaat.

Twee platina elektroden C_1 en C_2 dringen door de buiswand zodat ze in contact treden met de stromende vloeistof.

Tevens bevindt de meetbuis zich in een homogeen magnetisch veld dat afkomstig is van twee spoelen waarin een gelijkstroom loopt. Om het magnetisch veld niet te beïnvloeden is de meetbuis gemaakt uit een niet magnetisch materiaal.

Zodra de vloeistof doorheen de meetbuis en dus ook door het magnetisch veld loopt, ontstaat door de Lorentzkracht tussen beide elektroden een inductiespanning:

$$U = B \cdot v \cdot D \quad \text{volt} \quad (1)$$

Hierin is B : de magnetische inductie
 v : de stromingssnelheid van de vloeistof
 D : de diameter van de buis.

Het volume van de vloeistof dat per seconde door de buis loopt wordt berekend met:

$$q_v = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v$$

Uit vergelijking (1) volgt: $v = \frac{U}{B \cdot D}$

zodat $q_v = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{U}{B \cdot D} = k \cdot U$

De opgewekte spanning U wordt in een signaalomvormer herleid tot een standaardsignaal van 0 ... 20 mA. Meestal wordt de magnetische flux voortgebracht door een impulsvormige stroom. Hierdoor ontstaat een blokvormige spanning U met dezelfde frequentie als de stroom. Op deze manier verkrijgt men een debietmeter met geringe meetfouten. Fig. 4.30 toont een praktische realisatie van een elektromagnetische debietmeter. Aan de binnenkant merkt men het uiteinde van de platina elektrode.

5.4 Ultrasoon debietmeter

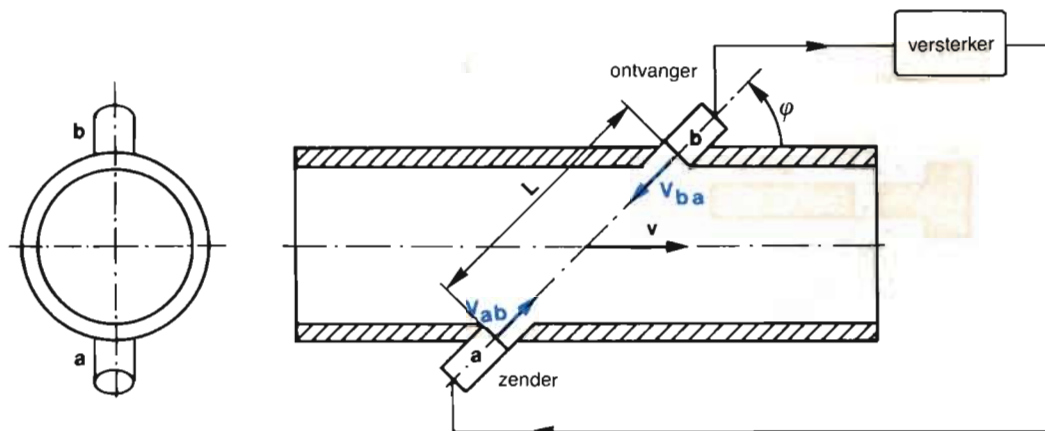


Fig. 4.31 Ultrasoon debietmeter

We beschouwen in fig. 4.31 een buis met twee ultrasoonproben a en b die beiden een ultrasoonzender en ontvanger bevatten.

Een geluidsgolf die in dezelfde zin beweegt als de vloeistof heeft een hogere snelheid dan de geluidsgolf die zich in tegengestelde zin voortplant. De geluidsgolf of impuls beweegt van punt a naar b met een snelheid:

$$v_{ab} = c + v \cdot \cos \varphi$$

De voortplantingstijd wordt dus:

$$t_{ab} = \frac{L}{c + v \cdot \cos \varphi}$$

Hierin is c de geluidssnelheid in de vloeistof en L de afstand tussen zender a en ontvanger b.

Zodra de ontvanger een impuls ontvangt, wordt door zender a de volgende impuls uitgezonden.

Hieruit volgt voor de herhalingsfrequentie:

$$f_{ab} = \frac{1}{t_{ab}} = \frac{c + v \cdot \cos \varphi}{L}$$

Wordt de rol van zender en ontvanger omgekeerd dan is:

$$v_{ba} = c - v \cdot \cos \varphi$$

$$t_{ba} = \frac{L}{c - v \cdot \cos \varphi}$$

$$f_{ba} = \frac{c - v \cdot \cos \varphi}{L}$$

Het verschil tussen beide frequenties wordt dus

$$f_{ab} - f_{ba} = \frac{c + v \cdot \cos \varphi}{L} - \frac{c - v \cdot \cos \varphi}{L}$$

$$\Delta f = \frac{2 v \cos \varphi}{L} = k \cdot v$$

Het frequentieverschil is dus onafhankelijk van de geluidssnelheid c in de vloeistof maar recht evenredig met de stromingssnelheid v .

De constante k is afhankelijk van de geometrie van de debietmeter.

Een praktische uitvoering van een ultrasoon debietmeter wordt getoond in fig. 4.32.

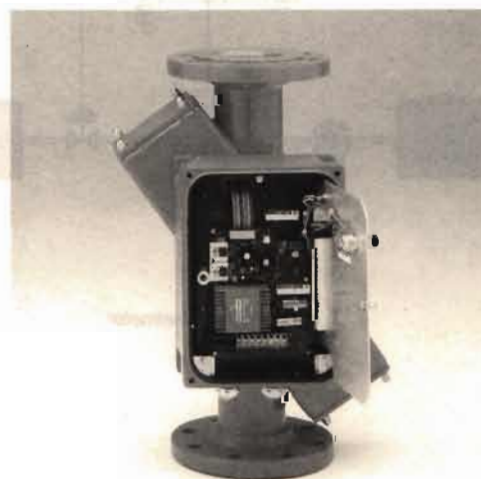


Fig. 4.32 Praktische uitvoering ultrasoon debietmeter

5.5 Debietmeting met wervellichaam

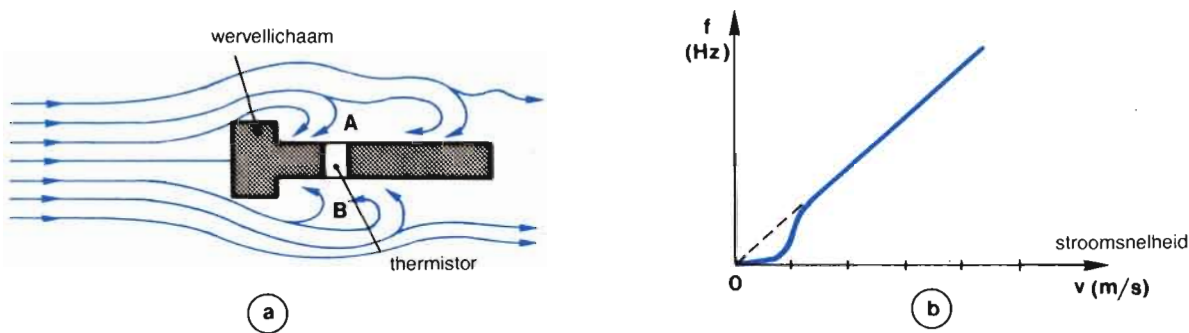


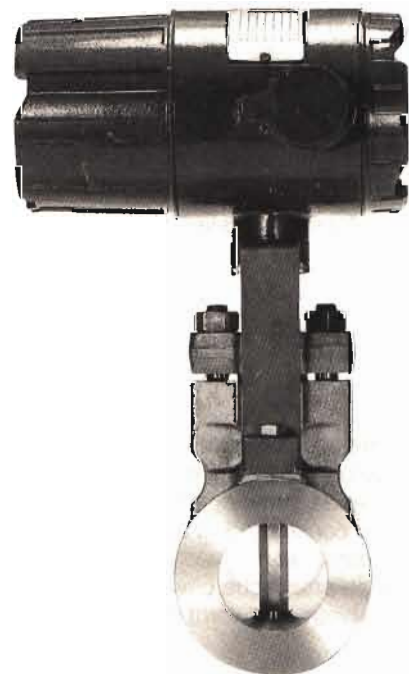
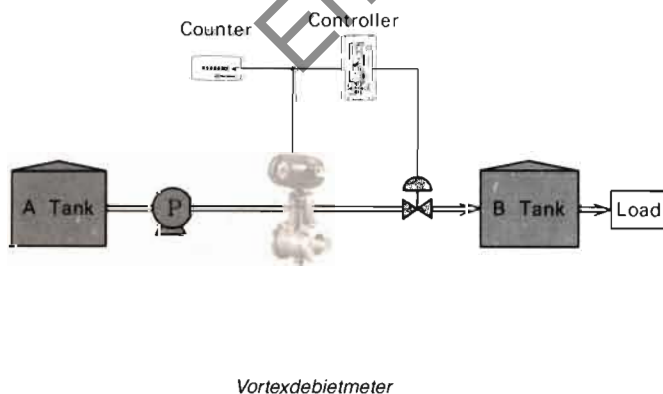
Fig. 4.33 Principe van de vortexdebietmeter

Een belangrijke methode om de snelheid van een fluidum te bepalen, steunt op het feit dat een hoekig obstakel of wervellichaam (bluff body) in een stroming turbulenties of wervelingen opwekt. Dit verschijnsel is voorgesteld in fig. 4.33. De wervelingen ontstaan langs beide kanten A en B van het wervellichaam. De wervelingen van zijde A zijn tegengesteld aan die van zijde B. Bovendien zijn ze t.o.v. elkaar over 180° in fase verschoven. Hetzelfde verschijnsel doet zich voor bij een vlag die flappert in de wind. Hierdoor ontstaat er tussen zijde A en B een wisselende verschildruk.

Plaatst men in het kanaal van het wervellichaam een verwarmde thermistor die in een brugschakeling is opgesteld: nu zorgt de wisselende stroming doorheen het kanaal voor een periodische koeling. Hierdoor ontstaat over de thermistor een wisselspanning waarvan de frequentie vanaf een zekere drempel evenredig is met de snelheid van de stroming. Zie fig. 4.33.b.

Een debietmeting met wervelingen noemt men meestal een vortexdebietmeter omdat vortex het Engelse woord is voor werveling.

Tenslotte tonen we een praktische uitvoering van een vortexdebietmeter en de meetopstelling om zeer nauwkeurige debietmetingen te verrichten.



6. Niveausensoren

Bijna alle niveaumetingen van vloeistoffen steunen op het meten van de volgende drie grootheden:

- verplaatsing;
- druk;
- kracht

6.1 Vlottermethode

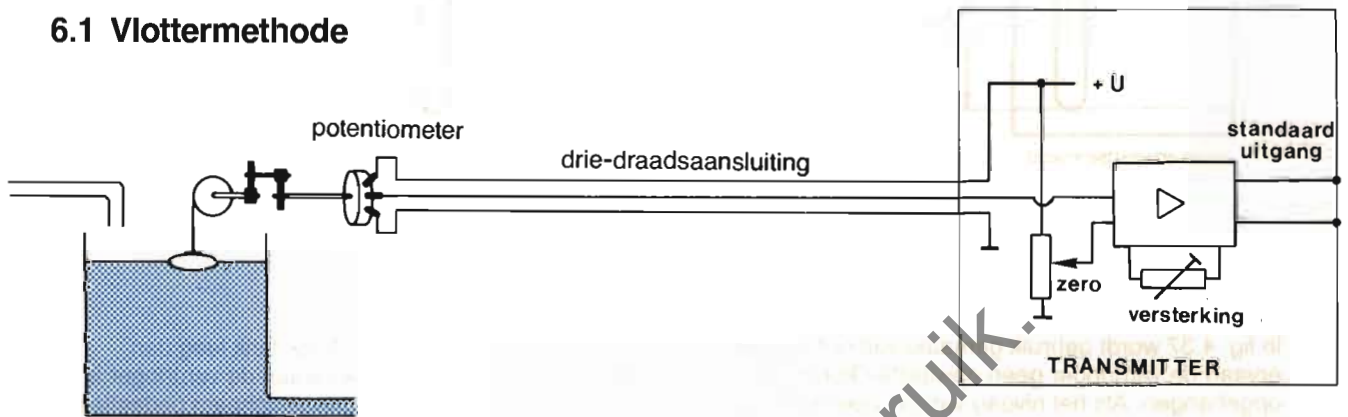


Fig. 4.34 Elektrisch meten van het niveau door de vlottermethode

In fig. 4.34 wordt een principiële opstelling gegeven om het niveau van een vloeistof te meten met een vlotter. Via een kabel, cilinder en tandwieltjes wordt de beweging van de vlotter overgedragen naar een draaibeweging van de as van een potentiometer. De stand van de loper is evenredig met het vloeistofniveau. Via een drie-draadsaansluiting wordt het signaal U overgedragen naar de transmitter. Een bepaalde "range" wordt omgezet naar een standaard signaal 0 ... 10 volt en (of) 4 ... 20 mA.

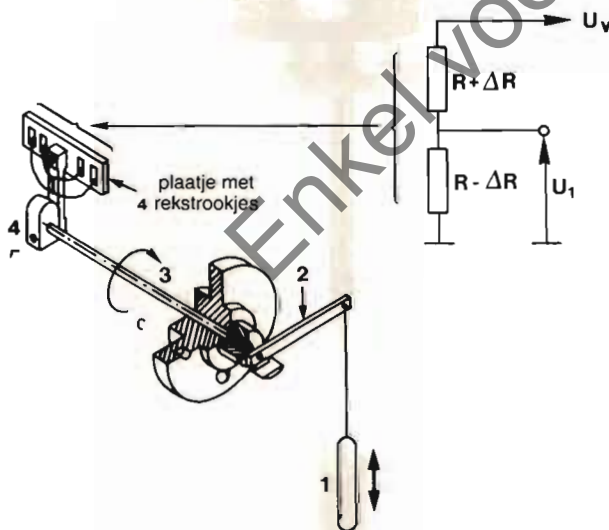


Fig. 4.35 Omzetting van niveau naar weerstands-waarde van rekstrookje



Fig. 4.36 Praktische realisatie van niveausensor

In fig. 4.35 wordt een totaal ander principe toegepast. De vlotter 1 hangt aan een hefboom 2 die staaf 3 kan doen draaien. Deze staaf verdraait een nok 4 die tegen een plooibaar plaatje drukt. Hierop zijn 4 rekstrookjes bevestigd. Als bijvoorbeeld de vlotter zakt, dan zal de staaf in de aangeduide richting verdraaien, de nok doet het plaatje verder plooiën, zodat de rekstrookjes op het plaatje van waarde veranderen. Worden deze weerstanden in een spanningsdeler opgenomen, dan is de uitgangsspanning evenredig met het niveau van de vlotter.

Een praktische uitvoering van een niveausensor is in fig. 4.36 weergegeven.

6.2 Verdringmethode

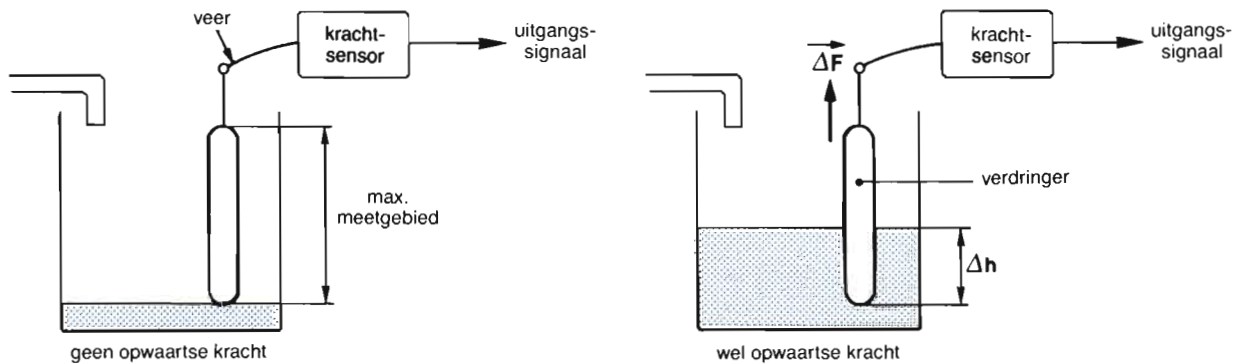


Fig. 4.37 Niveaumetingen met verdringerlichaam

In fig. 4.37 wordt gebruik gemaakt van een drijver uit staal die men verdringer noemt. Is de tank leeg dan ervaart de verdringer geen opwaartse kracht. Door zijn eigen gewicht buigt de veer, waaraan de verdringer is opgehangen. Als het niveau van de vloeistof stijgt dan wordt het gewicht van het verdringerlichaam gedeeltelijk gecompenseerd door een opwaartse kracht waardoor de veer minder doorbuigt. Deze opwaartse kracht is volgens de wet van Archimedes evenredig met het verplaatste vloeistofvolume.

Vandaar: $\Delta F = k \cdot \Delta V = k_f \cdot \Delta h$

Hierin is: ΔF : de krachtverandering;
 ΔV : de volumeverandering
 van de verplaatste vloeistof;
 Δh : de niveauverandering.

De lengte van het verdringerlichaam moet minstens gelijk zijn aan het maximaal meetgebied.
 De verplaatsing van de veer wordt via een krachtsensor omgezet in een standaardsignaal.

Een praktische uitvoering van een niveaumeter met verdringerlichaam wordt in fig. 4.38 getoond.



Fig. 4.38 Praktische uitvoering van niveaumeter met verdringerlichaam

6.3 Capacitieve niveaumeter

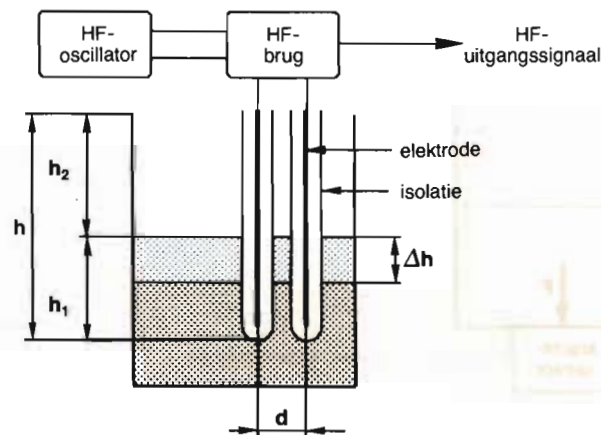


Fig. 4.39 Capacitieve opnemer.

Een eenvoudige methode om het niveau van vloeistoffen te meten, berust op de capaciteitsvariatie van een condensator.

In fig. 4.39 bestaat de condensator uit twee geleidende staven of elektroden die omgeven zijn met een dunne laag kunststofisolatie. Tussen de staven bevindt zich vloeistof tot een hoogte h_1 . Het overige deel h_2 is lucht met een relatieve diëlektrische constante $\epsilon_r = 1$.

De capaciteit gevormd door de 2 staven en met de vloeistof als dielectricum wordt dus:

(B)

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A_1}{d} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot k \cdot h_1}{d} \quad (\text{opp } A_1 = \text{hoogte } h_1 \times \text{breedte } k)$$

De capaciteit gevormd door de staven met lucht als middenstof wordt:

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A_2}{d} = \frac{\epsilon_0 k \cdot h_2}{d}$$

Omdat de twee condensatoren parallel geschakeld zijn, wordt de totale capaciteit:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 k}{d} (h_2 + \epsilon_r \cdot h_1)$$

Nemen we $h_2 = h - h_1$ ($h = \text{constant}$) dan wordt $C = \frac{\epsilon_0 k}{d} (h - h_1 + \epsilon_r \cdot h_1) = \frac{\epsilon_0 k}{d} [(h + (\epsilon_r - 1) \cdot h_1)]$

De waarde C is dus direct afhankelijk van de hoogte h_1 .

De condensator is opgenomen in een brugschakeling. Deze brug wordt gevoed met een wisselspanning met constante amplitude en frequentie.

Aan de uitgangsklemmen van de brug wordt een spanning afgetakt die evenredig is met C , dus met de hoogte h_1 .

Een verandering Δh veroorzaakt een verandering ΔC en via de brug een evenredige verandering van het uitgangssignaal.

Deze informatie wordt via een meetzender (hier niet getekend) naar de regelaar gezonden.

In plaats van twee staven kan men ook werken met 1 staaf als elektrode. De wand van de metalen opslagtank vormt dan de tweede elektrode. Zelfs wanden met gewapend beton kunnen deze rol vervullen.

Stad Antwerpen
Stedelijk Lyceum
 Hoofdstelling :
 Paardenmarkt 94
 2000 ANTWERPEN
 Tel. 03/470.25.30 - Fax 03/470.25.31

6.4 Gewichtmeting als niveaumeting

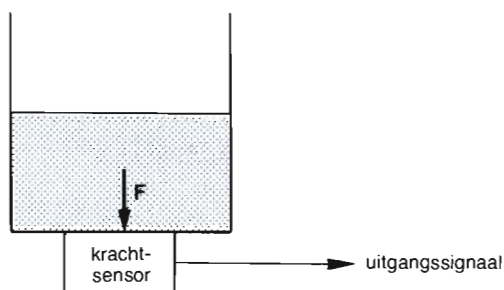


Fig. 4.40 Krachtsensor onder vloeistoftank

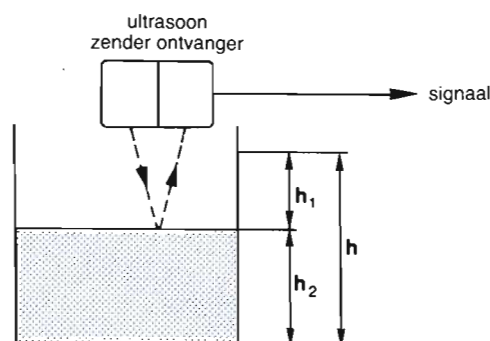


Fig. 4.41 Ultrasonische niveaumeting

Indien een tank overal dezelfde doorsnede heeft, dan is de hoogte van de vloeistof recht evenredig met het volume. Als bovendien de dichtheid of densiteit van de vloeistof constant is dan is de hoogte ook recht evenredig met de massa. Door een krachtsensor of drukdoos onder de vloeistoftank te plaatsen, ontstaat een spanning die evenredig is met de niveauveranderingen. Via een meetversterker (transmitter-meetzender) wordt het zwakke signaal op een standaardwaarde gebracht van 4-20 mA.

6.5 Niveaumeting met SONAR-systeem

Bij het meten van niveaus bij hoge temperaturen, hoge drukken en vooral bij agressieve stoffen maakt men dikwijls gebruik van het SONAR-principe. Hierbij worden ultrasonische geluidstrillingen, waarvan de frequentie boven de 16 kHz ligt, regelmatig gedurende korte tijd uitgezonden. Deze worden weerkaatst door het vloeistofoppervlak en enige tijd later door de ontvanger omgezet in een elektrisch signaal. Door de tijd tussen het uitzenden en ontvangen te meten, kan men de afstand h_1 bepalen. Door h_1 af te trekken van de maximale hoogte h vindt men de werkelijke niveauhoogte h_2 . Zie fig. 4.41.

Het voordeel van deze meting is dat ze niet beïnvloed wordt door de aard en de eigenschappen van de vloeistof. Men spreekt soms van SONAR als afkorting voor SOund Navigation and Ranging. Het is de Engelse benaming voor een apparaat waarmee met behulp van ultrageluidsgolven obstakels onder water kunnen gelokaliseerd worden.

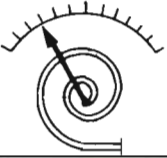
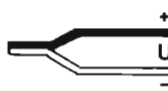
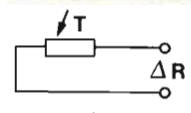
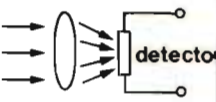
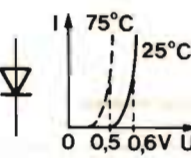
6.6 Niveaumeting met gammastralen

Plaatst men in een loden kamertje met een kleine opening of venster een radioactieve isotoop dan worden er via dit venster gammastralen uitgezonden. Men monteert deze energierijke stralingsbron aan één zijde van de tank terwijl aan de andere zijde een Geiger-Müller teller als detector aanwezig is.

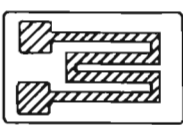
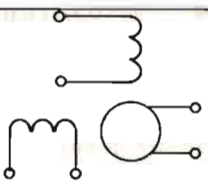
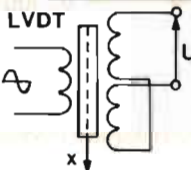
Als het niveau van de vloeistof hoog is, worden de gammastralen sterk gedempt en zal de teller een kleine stroom afgeven. Het omgekeerde is ook geldig. Niveaumetingen met gammastralen worden toegepast als andere meetprincipes geen voldoening schenken.

7. Overzicht van sensoren

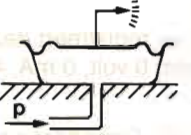
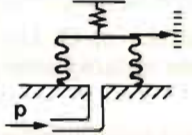
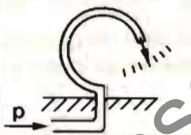
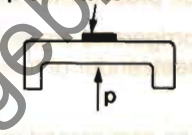
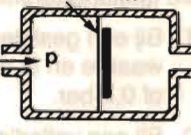
Temperatuursensoren

		 NTC - PTC-platina nikkel		
bimetaal	thermokoppel	temp. afh. weerstand	pyrometer	silicium diode

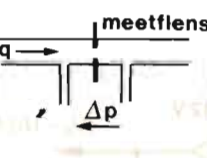
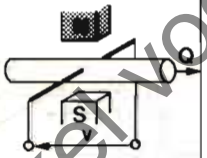
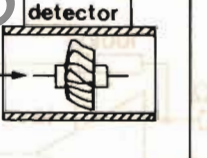
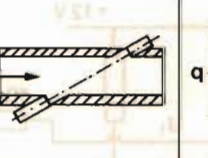
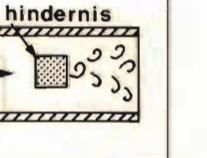
Verplaatsingssensoren

				
rekstrookje	resolver	inductief	capacitief	potentiometer

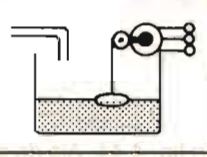
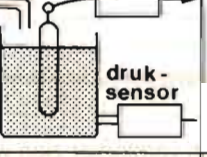
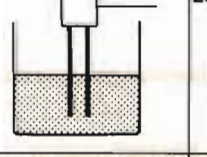
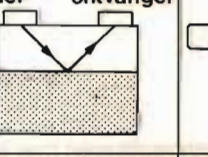
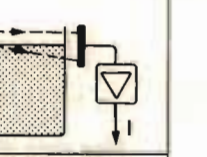
Druksensoren

				
membraansysteem	balgsysteem	Bourdonsysteem	piëzo-halfgeleider	capacitieve meting

Debietsensoren

				
drukverschilmeting	electromagnetisch	turbinemeter	ultrasoon	vortexprincipe

Niveausensoren

				
vlotter + pot. meter	verdringer	capacitief	SONAR	gammastralen

Toerentalsensoren

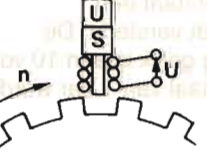
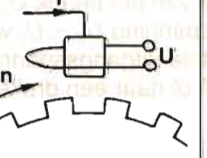
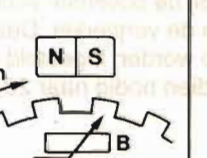
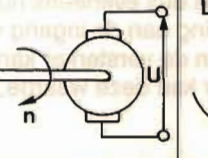
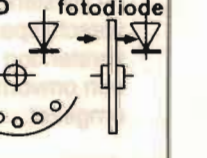
				
inductief	Hall-sensor	MDR-weerstand	tachogenerator	optisch

Fig. 4.42 Beknopt overzicht van sensoren

8. Meetzenders of transmitters

8.1 Algemene eigenschappen van meetzenders

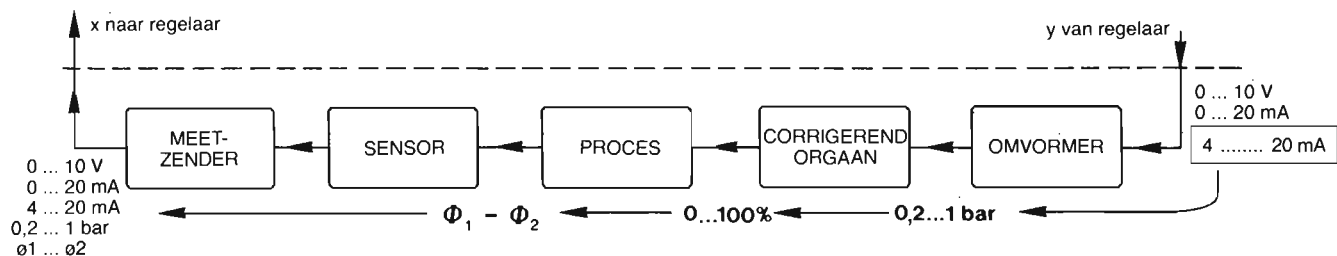


Fig. 4.43 Gestandaardiseerde procesketen met versterking 1

De meetzender moet een werkgebied of bereik $\Phi_1 - \Phi_2$ van de proceswaarde omzetten naar een standaardsignaal. Dit standaardsignaal kan dan aan een universeel bruikbare regelaar worden aangeboden, waar het vergeleken kan worden met de gewenste waarde of de set-point.

In een gestandaardiseerde procesketen van fig. 4.43 wordt het bereik als volgt bepaald:

1. Bij een gesloten corrigerend orgaan stelt zich de proceswaarde in op Φ_1 . De sensor registreert deze waarde en in de meetzender of transmitter moet deze waarde vertaald worden naar 0 volt, 0 mA, 4 mA, of 0,2 bar.
2. Bij een volledig open corrigerend orgaan, zou zich de proceswaarde instellen op Φ_2 . Opgepast we zeggen "zou", omdat meestal deze waarde niet ingesteld mag worden. De processpecialisten kunnen deze waarde met voldoende nauwkeurigheid berekenen. Via de sensor moet de meetzender de uitgang gelijk maken aan 10 volt, 20 mA of 1 bar.

ⓑ

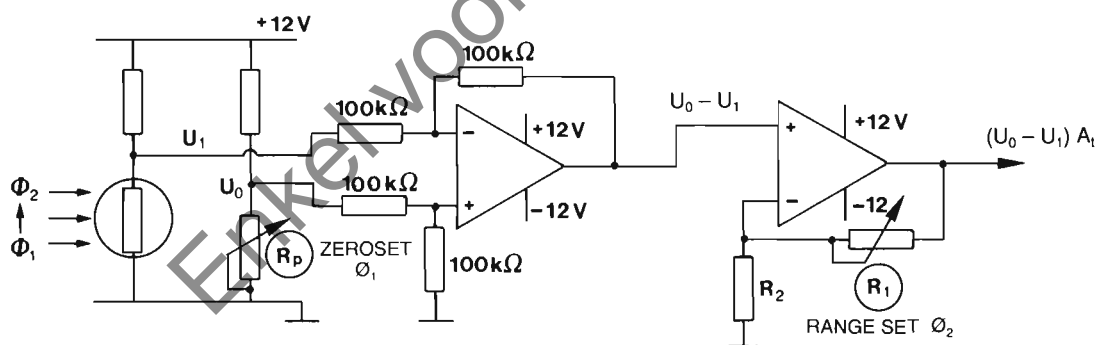


Fig. 4.44 Meetzender gevormd door brugschakeling en versterker

Hoe men dit kan realiseren met een brugschakeling en een versterker zien we in fig. 4.44. Als de sensor een elektrische weerstand is waarvan de waarde rechtstreeks of via een beweging veranderd wordt in functie van de fysische grootte, dan wordt deze weerstand in een tak van een brugschakeling opgenomen. Bij de onderste waarde van het bereik Φ_1 , kan met de tweede spanningsdeler R_p , de brug steeds in evenwicht worden gezet, zodat de verschilspanning $U_1 - U_0$ nul is. De uitgangsspanning van de versterker is dus eveneens nul. Bij de bovenste waarde van het bereik Φ_2 ontstaat een verschilspanning aan de ingang van de versterker. Deze spanning $U_1 - U_0$ wordt versterkt. De versterking van de versterker kan zo worden ingesteld dat de uitgangsspanning gelijk is aan 10 volt. Via een omvormer kan deze waarde, indien nodig naar 20 mA of naar een druksignaal van 1 bar worden omgezet.

Op een meetzender zijn er dus steeds twee instellingen die ons toelaten het werkgebied $\Phi_1 - \Phi_2$ te doen overeenkomen met de uiterste waarden van het standaardsignaal. Voor de onderste waarde Φ_1 wordt de brugschakeling in evenwicht ingesteld met R_p . Voor de bovenste waarde Φ_2 wordt de versterkingsfactor beïnvloed met behulp van de terugkoppelweerstand R_1 .

8.2 Constructievorm van meetzenders

De fabrikanten voor meet- en regelapparatuur hebben in hun programma steeds een uitgebreide reeks meetzenders of transmitters. Het uitzicht van deze toestellen is verschillend van merk tot merk maar over het algemeen is het een gesloten doos. In fig. 4.45 zien we een uitvoering van Hartmann-Braun met de vlotter als uitwendige sensor.



In sommige gevallen bevinden zich de sensors in de meetzender. Dit is dikwijls het geval bij druksensoren door middel van balg, bourdon, of membraan. In andere gevallen bevinden zich de sensoren buiten de meetzender, zoals bijvoorbeeld bij het thermokoppel.

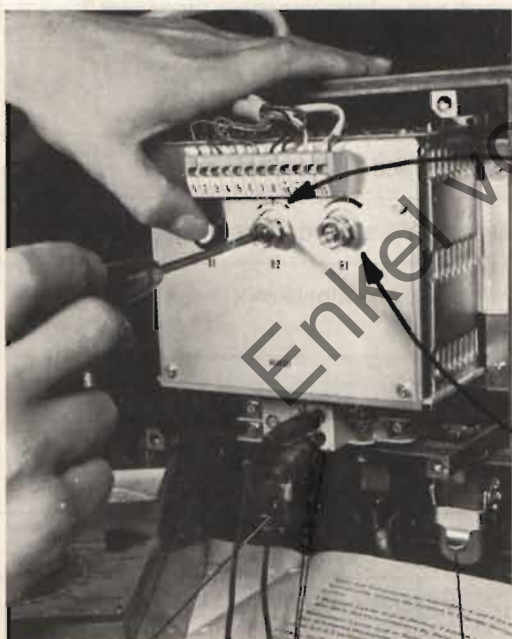
Meestal wordt de meetzender zo kort mogelijk bij het proces gemonteerd zodat de afstand sensor meetzender kort is, dit om de invloed van storingen klein te houden. Bovendien is de meetzender ook goed afgesloten om te beletten dat hij ontregeld wordt door ondeskundigen.

Zoals op de vorige bladzijde reeds werd uitgelegd, bevinden zich op de meetzender twee afstelpotentiometers. Door de afschermkap weg te nemen kan men met een schroevendraaier de twee potentiometers verstellen. Dit is duidelijk te zien in fig. 4.46. Ook kunnen beide potentiometers met duimwielletjes bediend worden, zoals in fig. 4.47 is weergegeven.

Hier is eveneens een meter ingebouwd om het hele meetbereik van het standaardsignaal weer te geven op een schaal die geijkt is van 0 tot 100%.

Fig. 4.45 Uitvoering meetzender

OPMERKING: Bij een ideaal gestandaardiseerde procesketen veroorzaakt 0 ... 10 volt aan de ingang (y) 0 ... 10 volt aan de uitgang (x), dit in open keten, dus als de regelaar niet ingeschakeld is. De procesversterking is dan gelijk aan 1. In de praktijk wordt dit zelden bereikt en ligt deze versterking rond 1.



ZERO
INSTELLING
 Φ_1

RANGE
INSTELLING
 Φ_2

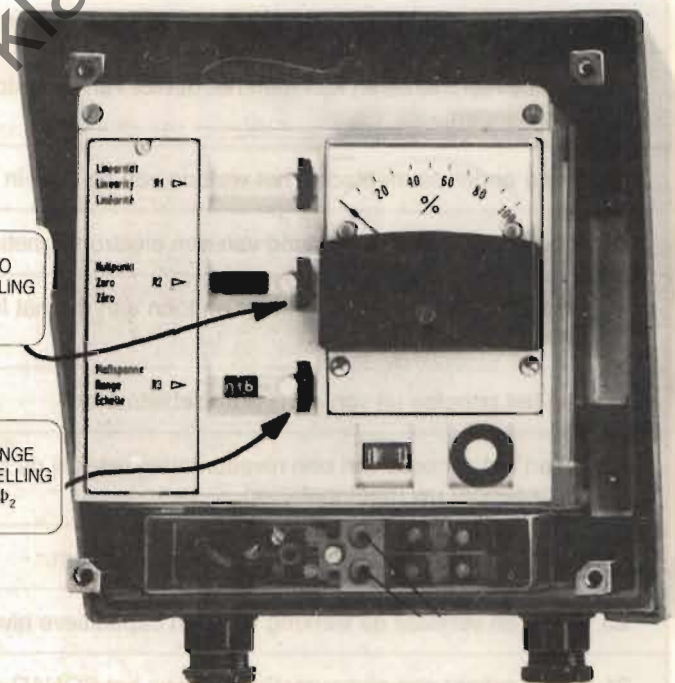


Fig. 4.46 (Meetzender H & B). Instelling van het meetbereik gebeurt met schroevendraaier

Fig. 4.47 (Meetzender H & B). Instelling van het meetbereik gebeurt met duimwielletjes.

9. Opdrachten

1. Geef een beknopt overzicht van verschillende soorten sensors in functie van het principe van omzetting.
2. Verklaar de werking van een sensor met directe omzetting naar weerstandswaarde die zich in een brugschakeling met versterker bevindt.
3. Geef de samenstelling en verklaar het principe van een thermokoppel.
4. Welke rol vervult de meetzender bij een temperatuurmeting?
5. Verklaar de werking van een rekstrookje. Waar plaatst men twee rekstrookjes en twee weerstanden in een weerstandsbrug en waarom?
6. Verklaar de werking van een LVDT als inductieve verplaatsingssensor.
7. Teken het blokschema van een LVDT als verplaatsingssensor en verklaar de functie van ieder blok.
8. Hoe kan men de verplaatsing van een condensatorplaat omzetten in een evenredige wisselstroom?
9. Op welke wijze kan men het toerental van een as nauwkeurig bepalen met een foto-microsensor?
10. Verklaar de werking van een synchro-resolver. Waar wordt deze toegepast?
11. Noem drie mechanische systemen om de druk te bepalen. Op welke wijze wordt de druk omgezet in een elektrisch signaal?
12. Verklaar de werking van een halfgeleider druksensor. Waarom wordt een rekstrookjesbrug toegepast?
13. Op hoeveel manieren kan men het debiet van vloeistoffen of gassen bepalen? Geef de Engelse benamingen.
14. Teken onder de meetschijf het verloop van de druk in functie van de afstand.
15. Teken en verklaar de werking van een elektromagnetische debietmeter. Waar wordt deze toegepast?
16. Teken de ultrasoon-debietmeter en toon aan dat het frequentieverschil alleen afhankelijk is van de stromingssnelheid.
17. Leg het principe uit van een vortexdebietmeter.
18. Teken het schema van een niveaumeting waarbij de controlekamer zich op 500 m van een sensor bevindt. Verantwoord uw meetopstelling.
19. Verklaar de niveaumeting met verdringerlichaam.
20. Teken en verklaar de werking van een capacitieve niveaumeting.
21. Wat betekent een niveaumeting volgens het SONAR-systeem?
22. Bespreek het principe van een meetzender. Verklaar hoe een bepaald bereik van de fysische grootte omgezet wordt naar een standaardsignaal. Welke twee afregelpunten zijn steeds bereikbaar in een praktische constructievorm van een meetzender?