

Een keramische verschildrukopnemer*

Dr. V. Graeger, Dipl.-Ing. R. Kobs en M. Liehr,

medewerkers van Philips GmbH Forschungslaboratorium Hamburg, Hamburg

De verschildrukopnemer die is ontwikkeld in het Philips Forschungslaboratorium Hamburg, is geheel vervaardigd van keramisch aluminiumoxide en is daardoor bestand tegen nagenoeg alle procesvloei-stoffen. De opnemer heeft één met vloeistof gevulde kamer, die van de media waarvan het drukverschil moet worden gemeten, is gescheiden door twee membranen. De uitwijkingen van deze membranen worden capaciteef gemeten. Het drukverschil is evenredig met het verschil van de reciproke waarden van de capaciteiten van twee condensatoren. Dit verschil wordt echter ook beïnvloed door de temperatuur van de vloeistof in de opnemer.

Deze invloed wordt gecompenseerd met behulp van de som van de reciproke waarden van de capaciteiten; deze som is evenredig met de temperatuur. Er is een elektronische schakeling met operationele versterkers en een terugkoppellus ontworpen, waarmee de lineaire temperatuurcompensatie tot stand komt. Deze schakeling maakt samen met de keramische opnemer deel uit van de Philips verschildrukopnemer PD3, die in vier uitvoeringen met verschillende meetgebieden in de handel is gebracht. Er wordt in het laboratorium ook nog gewerkt aan een verschildruk-meetapparaat voor laboratoriumgebruik, waarin ook niet-lineaire temperatuureffecten worden gecompenseerd. Verder wordt er onderzoek gedaan aan een methode om het meetresultaat over te brengen via glasvezels.

In de procesindustrie is het nauwkeurig meten van drukverschillen van groot belang, aangezien zowel doorstroomhoeveelheden als kolomhoogten van vloeistoffen kunnen worden afgeleid uit een gemeten drukverschil. In deze industrie heeft men dikwijls te maken met agressieve media

De tot nu toe gebruikelijke verschildrukopnemers waren altijd uitgerust met membranen van metaal; de meeste metalen worden echter op den duur door bepaalde procesmedia aangetast. De verschildrukopnemer die is ontwikkeld in het Philips Forschungslaboratorium Hamburg, en die onlangs in productie is genomen door het Philips bedrijfsonderdeel voor Process Control Instrumentation in Kassel, is voorzien van membranen van keramisch aluminiumoxide. Dit materiaal is tegen nagenoeg alle procesmedia bestand. Bij de productie van de nieuwe verschildrukopnemers wordt dankbaar gebruik gemaakt van de zogenaamde dikkelaagtechniek, die oorspronkelijk is ontwikkeld om hybride elektronische schakelingen te fabriceren.

* Dit artikel is eerder, in uitgebreidere vorm, verschenen in Philips Technisch Tijdschrift 43, nr. 1, 10-18, mei 1986

Inleiding

De volumestroom in een leiding kan men meten met behulp van een zogenaamde meetflens, een plaat met een opening waarvan de afmetingen nauwkeurig bekend zijn.

Het verschil Δp van de statische vloeistofdruk vóór en achter de meetflens is een maat voor de volumestroom Q_v volgens de formule

$$Q_v = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

waarin μ de zogenaamde doorstromingscoëfficiënt, A de oppervlakte van de opening en ρ de soortelijke massa van de vloeistof voorstelt. Aan deze formule ligt de bekende vergelijking van Bernoulli ten grondslag [1]. De hoogte van een vloeistofkolom kan men bepalen door het meten van het verschil van de druk boven en onder in de vloeistof. De hoogte H is evenredig met het gemeten drukverschil

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

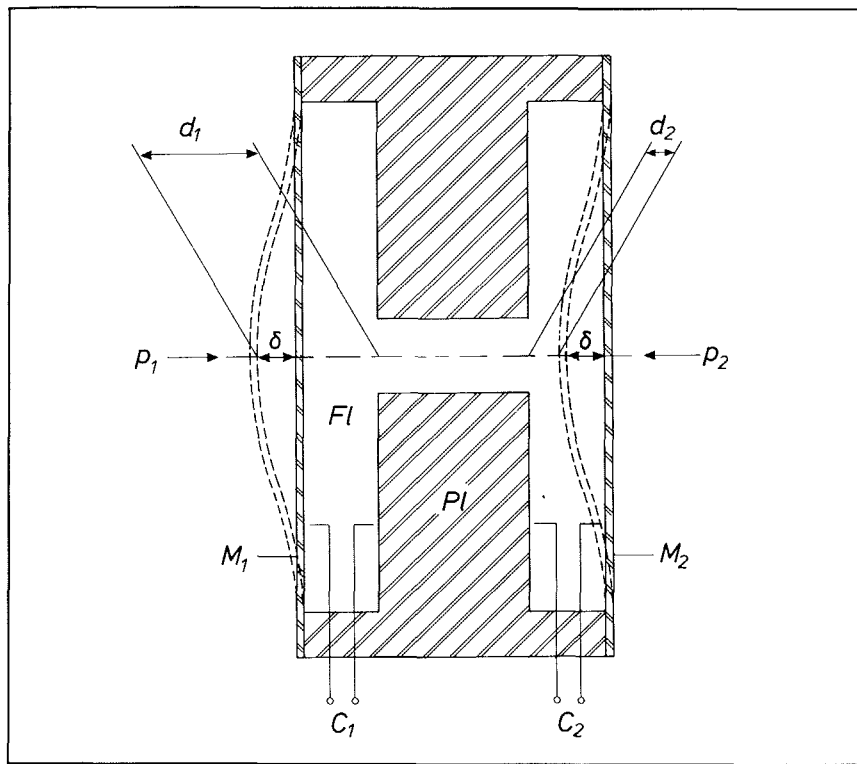
waarin g de versnelling van de zwaartekracht voorstelt. Op deze manier is de hoeveelheid vloeistof in een reser-

voir vast te stellen, mits de dimensies van het reservoir bekend zijn. Zowel het meten van de volumestroom in een leiding als van de hoeveelheid vloeistof in een reservoir zijn belangrijk in de procesindustrie.

Daarbij gaat het er vooral om dat de metingen nauwkeurig zijn en blijven, dat het meetinstrument weerstand kan bieden aan de temperatuur, druk en chemische agressiviteit van het procesmedium en dat het instrument niet door vonkoverslag explosies kan veroorzaken.

Opnemers voor het meten van drukverschillen zijn meestal uitgerust met een meetelement in de vorm van een membraan van roestvast staal, dat aan weerszijden is belast door de drukken waarvan met het verschil wenst te meten. De uitwijking van het membraan is voor niet al te grote uitwijkingen evenredig met het drukverschil. In het algemeen is het niet gewenst een dergelijk membraan rechtstreeks bloot te stellen aan – vaak agressieve – vloeistoffen of gassen. De tot nu toe gebruikelijke verschildrukopnemers zijn daarom uitgevoerd als zogenaamde tweekameropnemers [2]. De beide kamers zijn gevuld met een niet-agressieve vloeistof, bij voorbeeld siliconenolie, en de kamers zijn ieder gescheiden van het eigenlijke procesmedium door hulpmembranen. Tweekamer-verschieldrukopnemers hebben daarom drie membranen, waarvan de buitenste zijn vervaardigd van roestvast staal, tantaal, titaan of monel (een nikkelkoperlegering). Dit soort verschieldrukopnemers is door de moeilijke metaalverbindingen nogal kostbaar.

De eenkamer-verschieldrukopnemer, die het onderwerp is van dit artikel, is eenvoudiger van opbouw en bestaat uit één soort materiaal: keramiek, zie *figuur 1*. Er zijn slechts twee membranen, die cirkelvormig zijn. Ze zijn gescheiden door een kamer die is gevuld met siliconenolie. De procesmedia met drukken p_1 en p_2 bevinden zich aan weerszijden van de opnemer en belasten de membranen, aangeduid als M_2 en M_1 . Als we de vloeistof in de opnemer als onsamendrukbaar beschouwen en bovendien aannemen dat de membranen exact gelijk zijn, ondergaan deze dezelfde uitwijking δ . Deze is gelijk aan de uitwijking van een denkbeeldig membraan met een



Figuur 1 Doorsneetkening van de keramische verschilddrukopnemer. PI centrale plaat FI vloeistof (meestal siliconenolie). M_1, M_2 membranen. C_1, C_2 capaciteiten van de twee condensatoren waarmee men de uitwijkingen van de membranen meet. p_1, p_2 drukken van het procesmedium. De opnemer meet het drukverschil $\Delta p = p_2 - p_1$, δ uitwijking in het midden van de membranen d_1, d_2 elektrodenafstanden in het midden van de twee condensatoren. Het te meten drukverschil Δp is evenredig met $1/C_1 - 1/C_2$.

stijfheid die gelijk is aan de dubbele stijfheid van de afzonderlijke membranen

De verplaatsing van de membranen kan men meten met rekstrookjes, met inductieve verplaatsingsopnemers en met capacitieve verplaatsingsopnemers. In ons geval is voor de laatste mogelijkheid gekozen, en wel door een tweetal condensatoren te integreren met de opnemer. Daartoe zijn elektroden aangebracht aan de binnenzijde van de membranen en aan weerskanten van de centrale keramische plaat PI. Deze plaat is bovendien voorzien van een boring voor het doorlaten van de siliconenolie, die de beide membranen koppelt. De vier elektroden vormen twee condensatoren met capaciteiten C_1 en C_2 . De uitwijking δ in het midden van elk membraan volgt, bij bovengenoemde veronderstellingen, uit

$$\delta = \frac{1}{2} (d_1 - d_2),$$

waarin d_1 en d_2 de afstanden van de elektroden in het midden van beide condensatoren voorstellen. Aangezien de uitwijking δ van de membranen evenredig is met drukverschil dat gemeten wordt, en d_1 en d_2 omgekeerd evenredig zijn met de respectievelijke

capaciteiten, kunnen we de volgende relatie formuleren.

$$p_2 - p_1 \sim \frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \quad (1)$$

Deze vergelijking vormt de basis voor de nieuwe verschilddrukopnemer.

Als keramisch materiaal voor de diverse onderdelen van de opnemer hebben wij aluminiumoxide gekozen. Het voordeel van dit materiaal is niet alleen dat de membranen bestand zijn tegen nagenoeg alle procesvloeistoffen, maar ook dat de vervorming van de membranen nauwkeurig evenredig is met de kracht: het materiaal vertoont noch hysteresis, noch kruip, noch plastische deformatie. Het vervormingsgedrag is dus in overeenstemming met de wet van Hooke. Voor de laboratoriummodellen bedraagt de uitwijking van de membranen niet meer dan $10 \mu\text{m}$ bij een membraandikte van $0,24 \text{ mm}$ en een meetgebied van 25 mbar verschilddruk voor de meest gevoelige opnemer, en $3,5 \mu\text{m}$ bij een membraandikte van $1,6 \text{ mm}$ en een meetgebied van 3000 mbar verschilddruk voor de meest ongevoelige opnemer. (De vervormingen zijn dus in figuur 1 en volgende figuren sterk ver-

groot weergegeven.) Het zal duidelijk zijn dat hoge eisen worden gesteld aan de maat- en vormnauwkeurigheid van de membranen en de opgebrachte elektroden. Het is gebleken dat de zeefdruktechnieken die bekend zijn uit de dikkelaagtechniek voor de vervaardiging van hybride elektronische schakelingen [3], ook erg geschikt zijn voor het aanbrengen van elektroden. Bovendien kan met deze techniek ook het 'glassoldeer' worden aangebracht dat wordt gebruikt voor de hermetische dichte verbinding van de membranen met de rest van de opnemer.

Figuur 2 laat zien dat onze keramische verschilddrukopnemer aanzienlijk compacter is dan conventionele metalen verschilddrukopnemers volgens het tweekamerprincipe

Als de opnemer wordt gevuld met siliconenolie, wordt de druk hiervan wat hoger gekozen dan de atmosferische druk, zodat de membranen in de uitgangstoestand van de opnemer een uitwijking hebben die naar buiten is gericht. Bij het gebruik van de opnemer veroorzaakt zowel verhoging van de temperatuur als verlaging van de gemiddelde druk van het procesmedium een toename van de som $d_1 + d_2$ van de elektrode-afstanden. Dit geeft weliswaar in eerste benadering geen fout in het gemeten drukverschil volgens (1), maar door de ermee gepaard gaande verandering van de druk en daarmee de dielektrische constante van de vloeistof in de opnemer, verandert toch het meetresultaat. Uit het voorafgaande zal het duidelijk zijn dat de grootte $d_1 + d_2$ kan worden gebruikt om veranderingen in de temperatuur en druk van de vloeistof in de opnemer te constateren. Door naast de grootte $1/C_1 - 1/C_2$ volgens (1) ook $1/C_1 + 1/C_2$ te meten hebben wij de invloed van temperatuur en gemiddelde druk van het procesmedium op het meetresultaat gecompenseerd. Het is daardoor gelukt de invloed van een temperatuurverandering van 10°C op het meetresultaat te beperken tot minder dan $0,1\%$ van het meetgebied

De verschilddrukopnemer is onlangs onder de algemene typeaanduiding PD3 in productie genomen door het Philips GmbH bedrijfssonderdeel voor Process Control Instrumentation in Kassel, W.-Duitsland. Dit bedrijfssonderdeel behoort tot de Philips productdivisie Industrial and Electro-acoustic Systems. Er zijn zes verschillende typen met een kleinste instelbaar meetgebied van maximaal 10 mbar verschilddruk en een grootste eveneens instelbaar meetgebied van maximaal 3000 mbar verschilddruk. In het volgende zullen we iets meer

vertellen over de technologie en constructie ervan. Tot slot gaan we kort in op enkele toekomstige ontwikkelingen

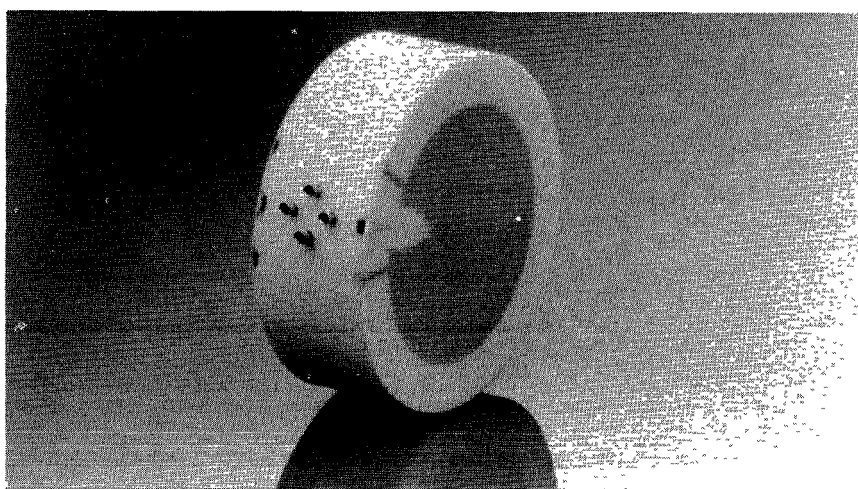
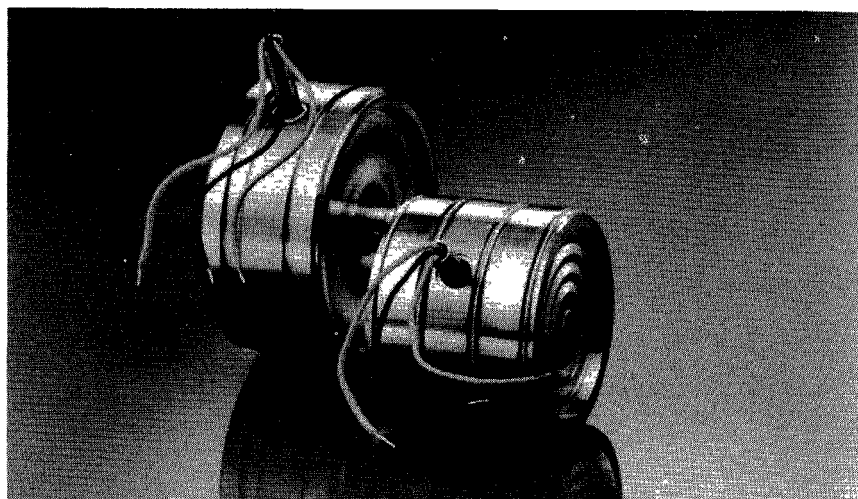
Technologie en constructie

Zoals gezegd, is de opnemer, als men de elektroden buiten beschouwing laat, geheel vervaardigd van keramiek, zie figuur 3. Het materiaal van de centrale plaat PI en de membranen M_1 en M_2 bestaat voor 99,5% uit gesinterd aluminiumoxide met een restant van glasachtige bestanddelen. De toelaatbare buigspanning en de elasticiteitsmodulus van dit materiaal zijn hoog. (De elasticiteitsmodulus is circa 1,6 maal die van staal.) De membranen hebben dus geen verstijwingsribben nodig. De centrale plaat bevat een axiaal en een radiaal geboord gat, beide met een diameter van slechts 0,8 mm. Via het radiale gat wordt de opnemer gevuld met siliconenolie, waarna het gat wordt afgesloten met een kogel.

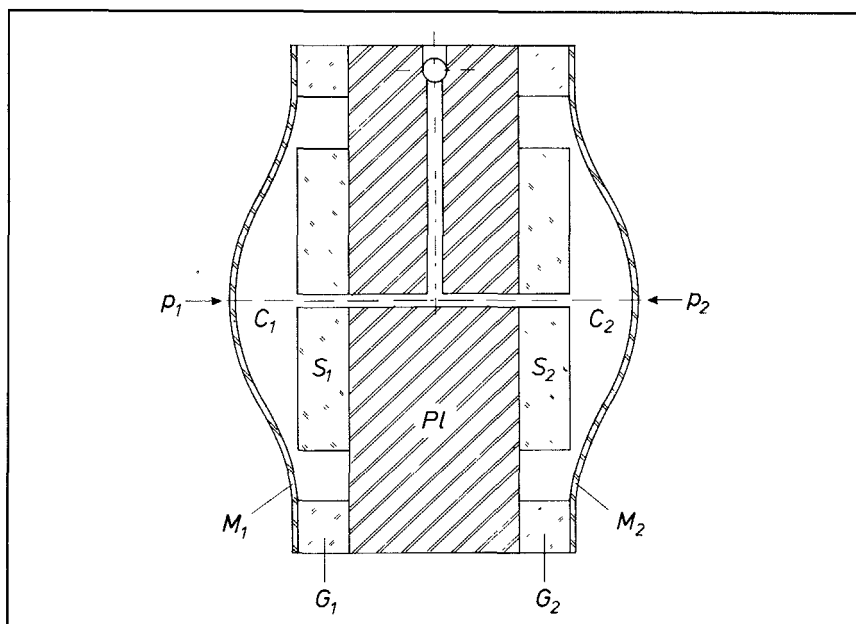
Doordat er voor keramiek is gekozen, kan gebruik worden gemaakt van de dikkelaagtechniek [3]. Door middel van zeefdrukken worden hierbij lagen met een tussen 3 en 15 μm nauwkeurige vastgelegde dikte op een substraat aangebracht, waarna de lagen door een sinterproces in een oven vast met het substraat worden verbonden. De ervaring die in de elektronische industrie met de dikkelaagtechniek is opgedaan bij de vervaardiging van hybride schakelingen, is erg nuttig gebleken bij het ontwerpen van onze verschilddrukopnemer. Het proces is goedkoop en er zijn heel veel pasta's voorhanden, waarmee lagen met geheel verschillende fysische eigenschappen kunnen worden vervaardigd. Enkele mogelijkheden van de dikkelaagtechniek zijn:

- het metalliseren van keramiek met een minimale lijnbreedte van 100 μm ,
- het isoleren van oppervlakken door het aanbrengen van lagen glasceramiek,
- het bedekken en daarna onderling verbinden van keramische onderdelen met behulp van "glassoldeer" (ook wel "smeltglas" genoemd). Glassoldeer heeft de eigenschap dat men er bij 400 °C of hoger een glasachtige "soldeerverbinding" mee kan vormen.

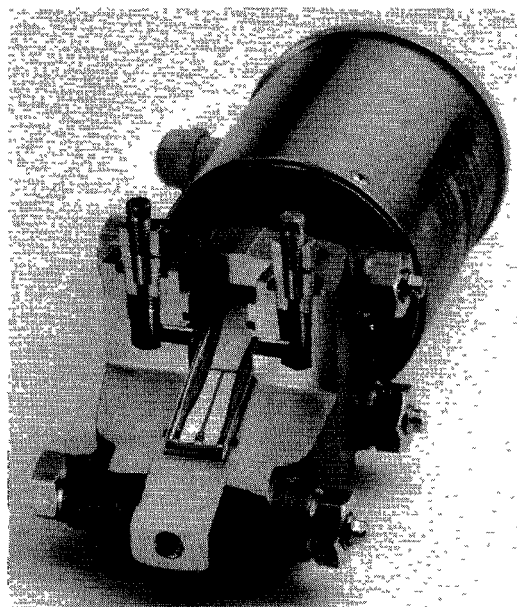
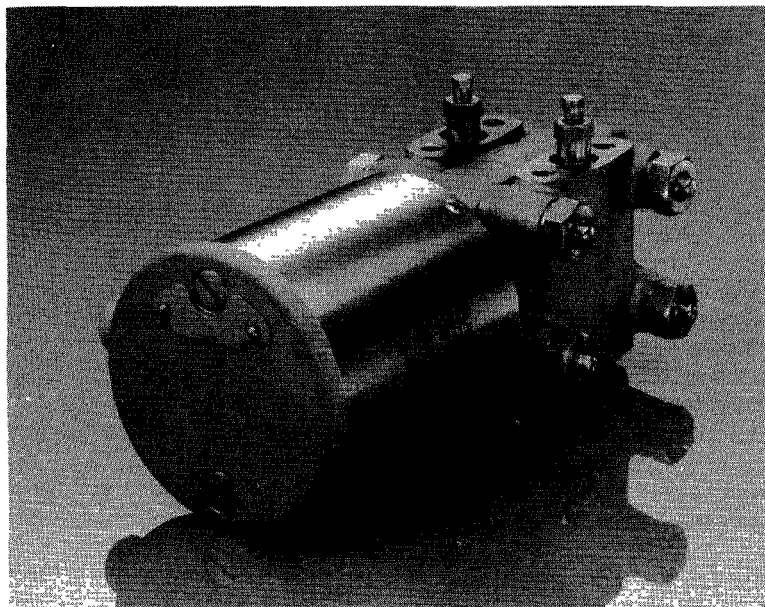
In overeenstemming met deze mogelijkheden hebben wij de volgende werkwijze gevolgd. Eerst worden de membranen van een plaatselijke metallisering voorzien. Vervolgens worden er ringen (G_1 en G_2) van glassoldeer op de centrale plaat aangebracht



Figuur 2 Boven: Conventionele verschilddrukopnemers, gemaakt van metaal en werkend volgens het tweekamerprincipe. Onder: De nieuwe keramische verschilddrukopnemer, werkend volgens het eenkamerprincipe, zie figuur 1. De diameter is 60 mm



Figuur 3 De constructieve uitvoering van de verschilddrukopnemer. G_1 , G_2 ringen van glassoldeer. S_1 , S_2 lagen die dienen als basis voor de binnenste elektroden. G_1 , G_2 , S_1 en S_2 worden aangebracht door middel van zeefdrukken (dikkelaagtechniek). Zie verder het onderschrift van figuur 1.



Figuur 4 Links: De verschilddrukopnemer, compleet met temperatuurcompensatieschakeling, zoals deze onder de algemene typeaanduiding PD3 in productie is bij het Philips GmbH bedrijfsonderdeel voor Process Control Instrumentation in Kassel, W.-Duitsland. Rechts: Idem, gedeeltelijk doorgesneden, zodat het meetelement zichtbaar is.

De inwendige diameter van deze ringen bepaalt de stijfheid van de membranen, zodat hoge eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid van deze ringen. Vervolgens worden er lagen glaskeramik (S_1 en S_2) aangebracht, die maar weinig dunner zijn dan de ringen van glassoldeer. De lagen S_1 en S_2 dienen als begrenzing van de beweging van de membranen en als onderlaag voor de binnenste elektroden, die daarna worden aangebracht. Hierbij worden tevens met de buitenkant van de opnemer verbindingen gemaakt die dienen om de condensatoren later aan te kunnen sluiten. Tot slot wordt het geheel in een oven verhit, waarbij het glassoldeer smelt en een lekvrije, geometrisch nauwkeurige verbinding ontstaat.

De elektroden van een opnemer die nog niet met olie is gevuld, maken nog twee aan twee contact met elkaar. De druk van de siliconenolie waarmee de opnemer aan het einde van het fabricageproces wordt gevuld, bepaalt de voorspanning van de membranen en dus de elektrodenafstand in rusttoestand. In de praktijk wordt de druk van de siliconenolie zo groot gekozen dat bij een (uitwendig) drukverschil $p_2 - p_1$ van 1,3 maal het meetgebied de elektroden van een der condensatoren elkaar juist raken. Zoals gezegd, bedraagt de slag van de membraanbeweging 3,5 tot 10 μm . De buitendiameter van de membranen bedraagt 60 mm en het olievolume 60 mm³. De capaciteit van iedere condensator is in rusttoestand circa 400 pF

Figuur 4 toont de Philips verschilddrukopnemer PD3, waarin een temperatuurcompensatieschakeling is opge-

nomen; deze schakeling, gebaseerd op de grootte $1/C_1 + 1/C_2$, is in dit artikel niet beschreven. Het meetgebied is instelbaar, bijvoorbeeld van 20 tot 100 mbar voor het type met een maximaal meetgebied van 100 mbar verschilddruk. Dit type heeft in de gemeten Δp -waarde een maximale afwijking die gegarandeerd kleiner is dan 0,2% van het meetgebied. Dit geldt voor een temperatuurgebied van -30°C tot 80°C . De opnemer levert een uitgangsstroom van maximaal 20 mA, die naar keuze evenredig is met het gemeten drukverschil of - voor het meten van een volumestroom - met de wortel uit het drukverschil.

Verdere ontwikkelingen

Het is mogelijk temperatuur- en drukeffecten te compenseren, o.a. door het inschakelen van een microprocessor. Bovendien kan deze dan gebruikt worden voor het berekenen van de massastroom uit gemeten drukverschil, de temperatuur, de gemiddelde druk en de geometrische gegevens van de meetflens. Ook kan een meetapparaat dat bestaat uit een combinatie van een verschilddrukopnemer en een microprocessor, bij storingen zelf een foutmelding genereren. De gegevens voor de temperatuurcompensatie behoeven niet te worden opgegeven met behulp van instelbare weerstanden, maar kunnen als getallen in een PROM (programmable read-only memory) worden opgeslagen. Het meetapparaat kan de uitkomsten van de metingen leveren aan een gestandaardiseerd datatransmissiesysteem ("bus"). Er is gewerkt aan een ver-

schilddruk-meetapparaat voor laboratoriumgebruik, dat een hoge nauwkeurigheid heeft - tien keer hoger dan de verschilddrukopnemer voor de procesindustrie - en geschikt is voor een bussysteem volgens de norm IEEE 488 of IEC 625

Een andere veelbelovende ontwikkeling is die van een verschilddruk-meetapparaat dat zijn meetuitkomsten levert via een glasvezelverbinding. Er wordt daardoor geen hinder onderhouden van elektromagnetische velden, die in conventionele koperdraden wel storingen kunnen veroorzaken. Deze storingen zijn des te ernstiger naarmate dichter in de buurt van elektromotoren of transformatoren van groot vermogen wordt gemeten. Omdat een opnemer nog niet rechtstreeks een optisch signaal in een glasvezel kan genereren, volgen wij een methode waarbij de opnemer via een elektronische schakeling met LEDs (light-emitting diodes) een optisch signaal produceert. De door ons ontworpen schakeling met componenten in CMOS-technologie (complementary metal-oxide semiconductor) verbruikt slechtst 50 μA , zodat de schakeling bij gebruik van lithiumbatterijen ten minste tien jaar ononderbroken kan werken

Literatuur

- [1] J Hengstenberg, B Sturm en O Winkler, Messen, Steuern und Regeln in der chemischen Technik, Band I, Springer, Berlin 1980
- [2] Zie blz 250 van H. N Norton, Sensor and analyzer handbook, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982
- [3] W. Funk, De dikkelaaagetechniek, Philips Techn T 35, 151-157, 1975.