

Beter dan de

Kalibratie-instrumenten voor flowmeters bevatten een kwikring-afdichting. Fabrikant van flowmeters Bronkhorst High-Tech vroeg mechatronisch ontwerp bureau Demcon een kwikloos instrument te ontwikkelen. Het resultaat is de Active Piston Prover (APP), waarvoor Demcon de ‘proof of principle’ leverde. Daartoe ontwikkelde het een actief meetprincipe en toonde met berekeningen aan dat de gevraagde meetonzekerheden haalbaar zouden zijn. Bij eerste testen door het Nederlands Meetinstituut bleek dat de APP een goede kandidaat is voor een nieuwe primaire standaard.

• Jan Leideman, Rini Zwikker en Hans van Eerden •

Bronkhorst High-Tech in Ruurlo ontwikkelt nauwkeurige massflow-meters en -controllers en is daarmee Europees marktleider. De meters worden gebruikt voor vloeistof- dan wel gasstromen in industrie en laboratorium. Voor (her)kalibratie van de meters maakt Bronkhorst gebruik van een secundaire standaard, een zogeheten ‘piston prover’, die het bedrijf in eigen beheer heeft ontwikkeld. Zo’n secundaire standaard wordt op zijn beurt vergeleken met een primaire standaard; in Nederland beheerd door het Nederlands Meetinstituut (NMI). Kalibratie vindt altijd plaats met gas, meestal lucht.

Volumetrische kalibratie

De term ‘piston’ verwijst naar het volumetrische principe van kalibratie: meting van de afgelegde weg en de benodigde tijd bij verplaatsing van een zuiger in een meetbuis onder invloed van een gasstroom; zie Afbeelding 1. De volumestroom wordt bepaald uit het volume- en tijdsverschil tussen twee niveaus:

$$\Phi_V = \Delta V / \Delta t$$

$$\Phi_V = \text{volumestroom [m}^3/\text{s]}$$

$$\Delta V = \text{volumeverschil [m}^3\text{]}$$

$$\Delta t = \text{tijdsverschil [s]}$$

De massastroom wordt dan berekend volgens Boyle-Gay Lussac:

$$p \cdot \Phi_V = \Phi_m \cdot R_s \cdot T$$

$$p = \text{druk [Pa]}$$

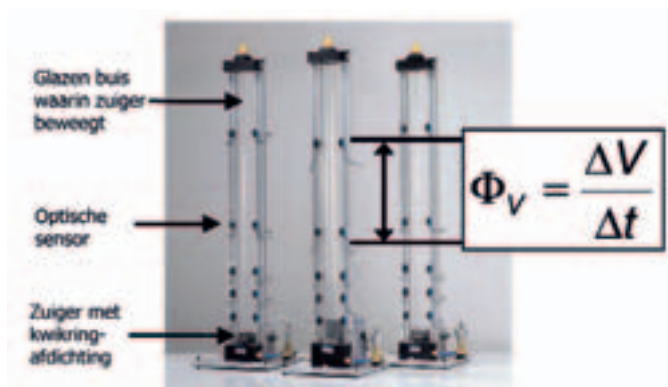
$$T = \text{temperatuur [K]}$$

$$R_s = \text{specifieke gasconstante [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$$

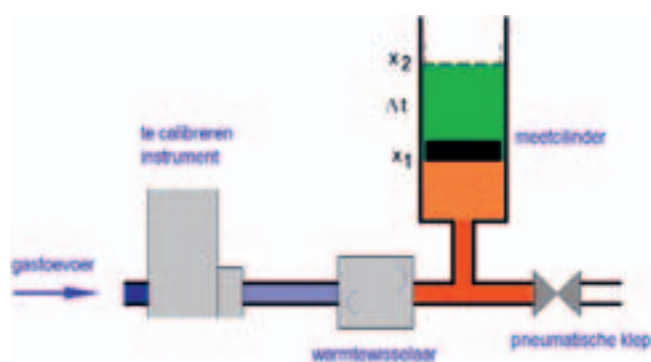
$$\Phi_m = \text{massastroom [kg/s]}$$

Zie Afbeelding 2 voor een schematische kalibratieopstelling.

primaire standaard?



Afbeelding 1. Bepaling van de volumestroom Φ_V met de huidige ('oude') piston prover. Met twee optische sensoren wordt het tijdsverschil Δt bepaald tussen twee posities (met bijbehorend volumeverschil ΔV) van de zuiger die beweegt onder invloed van een gasstroom.



Afbeelding 2. Schematische weergave van een piston prover met een warmtewisselaar die zorgt voor een uniforme temperatuur van instrument en gasstroom. Voor een kalibratiemeting sluit de pneumatische klep, zodat de gasstroom de zuiger omhoogbrengt.

Het gewicht van de zuiger zorgt voor een drukverschil tussen het gas in het kalibratie-instrument en de buitenwereld; daarom dient de zuiger in de meetbuis van een afdichting te zijn voorzien. Lekkage zou immers de kalibratie verstoren. Wrijving tussen afdichting en meetbuis zorgt echter ook voor verstoringen: drukvariaties als gevolg van schoksgewijze beweging (frictie) en temperatuurverandering door warmteontwikkeling. Vandaar dat tot dusver een kwikring-afdichting werd toegepast; deze is nagenoeg wrijvingsloos.

Ontwerpopgaven

Gebruik van kwikhoudende instrumenten zoals de piston prover wordt op grond van Europese regelgeving verboden (verkoop is dat al per 1 juli 2006). Reden voor Bronkhorst in 2005 om een kwikloos instrument te gaan ontwikkelen en daarbij gelijk andere kenmerken onder de loep te nemen. Zo is het huidige werkingsprincipe passief: instromend gas tilt de zuiger op. Het alternatief is actieve meting, waarbij de beweging van de zuiger wordt gestuurd. Als de positie van de zuiger wordt afgeregeld op een drukverschil van 0 Pa, dan wordt de afdichting minder kritisch. Verder meet de oude piston prover discreet: voor één meting moet het tijdsverschil tussen twee posities (met bijbehorend volumeverschil) worden bepaald. Zo kan alleen een gemiddelde flow worden gemeten. Voordeel van het actieve principe is dat er een continue meting mogelijk is; uit de snelheid waarmee de zuiger wordt bewogen valt de momentane volumestroom af te leiden, zodat ook de variaties in flow zijn te registreren.

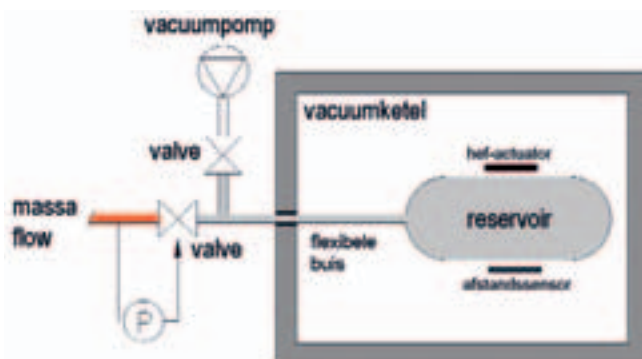
Naast 'kwikvrij' was verbetering van de meetonzekerheid van het kalibratie-instrument een andere eis. De oude piston prover kent een onzekerheid van 0,3%, niet slecht vergeleken met de 0,2% van de primaire standaard bij het NMI, maar te hoog voor de nieuwste generatie digitale flowmeters, die Bronkhorst met een onzekerheid van slechts 0,1% wil gaan aanbieden. Een kalibratie-instrument moet minstens diezelfde onzekerheid behalen (en bij voorkeur een factor drie beter zijn)

Bovenstaande ontwerpopgaven wezen in de richting van een mechatronische oplossing en Bronkhorst schakelde daarvoor mechatronisch ontwerp bureau Demcon in Oldenzaal in. Het NMI werd ook bij het project betrokken, om het ontwerp voor een nieuwe secundaire standaard te kunnen testen met behulp van de beschikbare primaire standaard.

Alternatief meetprincipe

Als eerste onderzocht Demcon de mogelijkheid van een alternatief meetprincipe. Met het oog op de gewenste onzekerheid van slechts 0,1% kent het volumetrische principe namelijk het nadeel dat de massastroom wordt bepaald uit liefst vier grootheden: druk, temperatuur, volume en tijd. De relatieve fout in de massastroom is dan – op grond van bovenstaande formules – de som van de relatieve fouten in

de vier genoemde grootheden. De vier relatieve meetfouten mogen dan elk gemiddeld slechts 0,025% bedragen! Een logisch alternatief is directe gewichtsmeting van het gas. Afbeelding 3 toont een mogelijke uitvoering met behulp van een reservoir in een vacuümketel. Een hef-actuator houdt de verticale positie van het reservoir constant; de stroom door de actuator is dan een maat voor de massa in het reservoir. Het vacuüm elimineert daarbij de verstoring door opwaartse druk. Analyse van dit alternatief leverde de twee knelpunten op: het dood volume in de leiding tussen meter en kalibratie-instrument en de kleine massa van het gas ten opzichte van het reservoir zelf, waardoor de massa van dat reservoir met extreem hoge nauwkeurigheid bekend zou moeten zijn. Conclusie is dat het volumetrische meetprincipe, met behulp van een zuiger, toch de voorkeur

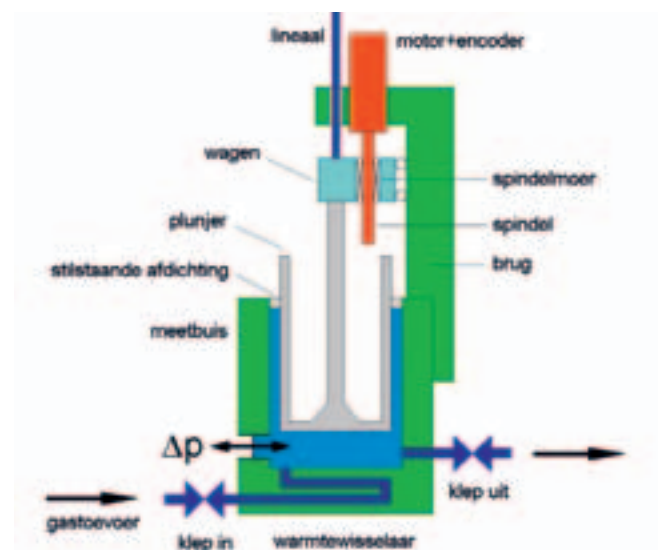


verdient.

Afbeelding 3. Alternatief kalibratieprincipe: directe gewichtsmeting van gas in een reservoir.

Ontwerp

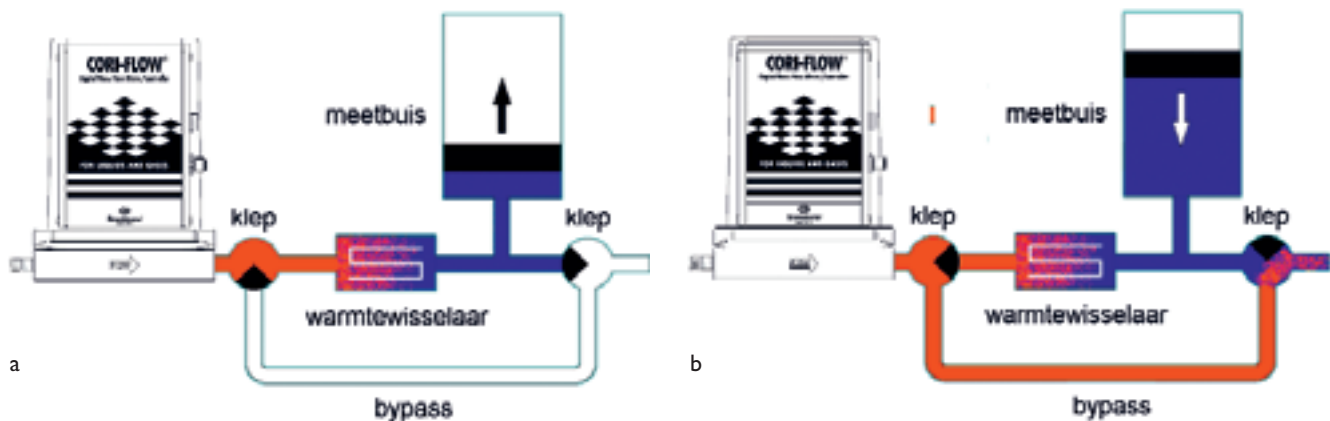
Afbeelding 4 toont het mechatronisch ontwerp voor een nieuw volumetrisch kalibratie-instrument, de Active Piston Prover. De zuiger is verbonden aan een wagen die beweegt langs een rechtgeleiding en via een spindel wordt aangedreven door een motor. De zuiger is uitgevoerd als een plunjer, oftewel een cilinder die langer is dan de gemaakte slag. Daardoor kan de afdichting op een vaste plaats op de meetbuis worden aangebracht (in plaats van op de bewegende plunjer). De afdichting sluit dan af tegen de buitenkant van de plunjer (en niet tegen de binnenkant van de meetbuis). Voordeel daarvan is dat een buitenkant eenvoudiger nauwkeurig is te fabriceren dan een binnenkant, met hogere meetnauwkeurigheid als gevolg. De positie van de plunjer wordt gemeten met een lineaal.



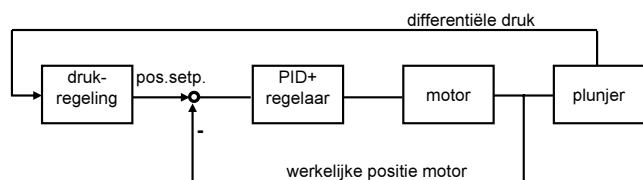
Afbeelding 4. Ontwerp van de Active Piston Prover.

Tijdens de opgaande slag van de plunjer wordt er gemeten; de uitgangsklep is dicht zodat er gas instroomt en de plunjer stijgt om het drukverschil op nul te houden; zie Afbeelding 5a. Tijdens de neergaande slag van de plunjer stroomt het gas via een by-pass weg (Afbeelding 5b). Het instrument kan meerdere slagen uitvoeren, door telkens de eindwaarden uit de voorgaande slag vast te houden. Als een nieuwe slag gelijk met de juiste plunjersnelheid wordt ingezet, hoeft er niet elke slag opnieuw te worden 'ingeregeld'. Zo kan een zeer lange virtuele slag worden gerealiseerd, die door langdurige middeling de meetonzekerheid verkleint.

Setpoint voor de differentiële drukregeling is: $\Delta p = 0$ Pa. Drukverschil tussen 'binnen' en 'buiten' geeft, na vermenigvuldigen met het oppervlak, een kracht op de plunjer. Delen door de plunjer massa geeft een versnelling en tweemaal integreren een positie. Zo wordt het positie-setpoint voor de plunjerbeweging uit de differentiële druk afgeleid. In het ontwerp is dit vertaald in een PID+-positieregelaar; zie Afbeelding 6. Een eenvoudig PID-algoritme bleek voldoende te zijn; alleen is er door toevoeging van een tweede-orde laagdoorlaatfilter een zogeheten 'tamme' PID-regelaar van gemaakt, om te voorkomen dat er bij hoge frequenties alleen maar ruis wordt versterkt. De positierugkoppeling vindt direct vanaf de encoder van de motor plaats, voor maximale bandbreedte (snelle responsie!) van de regeling. De uiteindelijke bandbreedte bedraagt 2 kHz voor de drukregeling en 100 Hz voor de positieregeling.



Afbeelding 5. Meetprocedure voor de APP.
 (a) Opgaande slag van de plunjer (meetslag).
 (b) Neergaande slag (retourslag).



Afbeelding 6. Positieregeling voor de plunjer in de APP afgeleid van de differentiële drukregeling.

Minimaliseren meetfouten

Centraal in het ontwerpproces stond het minimaliseren van de fouten in alle te meten grootheden. Zo is de plunjer nagemeten op diameter en onrondheden en wordt daarvoor in de meetsoftware gecorrigeerd. In principe is de positie van de plunjer (en daarmee de volume- c.q. massastroom) direct af te leiden van de motor-encoder, maar vanwege speling in de overbrenging is voor een aparte lineaal gekozen. De lineaal meet in het verlengde van de plunjerstang, om een meetfout als gevolg van het eventuele kantelen van de plunjer te voorkomen. Bij ‘excentrisch’ meten zou die meetfout wel kunnen optreden. Voor tijdmeting bleek de klok van de besturings-PC onvoldoende nauwkeurig, reden om een externe klok te gebruiken.

De absolute luchtdruk wordt met een extern systeem bepaald; in de proof of principle wordt de betreffende waarde simpelweg vóór de meting in de software ingevoerd. De differentiële druk wordt met een ingebouwde membraan-sensor bepaald en de offset van deze sensor wordt voor elke meting ‘genuld’, door de uitlezing op nul

te stellen terwijl de klep naar buiten open staat. Voor de temperatuurmeting zijn twee sensoren in de wand van de meetbuis geplaatst en één in de luchtstroom, vóór de warmtewisselaar.

Om de fout ‘onder in het meetbereik’ te beperken, wordt het complete bereik van het kalibratie-instrument (0,05 ml/min tot 50 l/min) verdeeld over vier meetbuizen met verschillende diameter, van 2,5 tot 145 mm. Elke meetbuis heeft een range 1:300 en een factor 20 overlap met de volgende buis. Op deze manier kan elke individuele flowmeter met één meetbuis worden gekalibreerd.

Nauwkeurighedsanalyse

Gedurende het ontwerptraject werd de nauwkeurighedsanalyse voortdurend verfijnd. Uiteindelijk werden de volgende meetonzekerheden bepaald. Voor het volume 0,5 µm in diameter en onrondheid van de plunjer, en 10 µm in de slag van de plunjer (gemeten via de motor-encoder). In de druk 40 Pa absoluut en 20 Pa differentieel. In de temperatuur 0,1 K en in de tijd 25 µs/s. Daarnaast liggen variaties in omgevingsparameters in de orde van 0,5 K voor de temperatuur (van toevoerslang), 100 Pa voor de druk en 10 K voor de temperatuur van het gas voordat het de warmtewisselaar is gepasseerd.

Op grond van deze gegevens kon, voordat er iets was gebouwd, een totale meetfout worden berekend en de decompositie over de verschillende grootheden worden bepaald. Uitkomst was dat een totale fout van 0,10% van de reading haalbaar is. Alleen bij de kleinste meetbuis werd aan de onderkant van het meetbereik een grotere fout, van 0,34%, gevonden; daarbij dient aangetekend dat deze fout kan worden verkleind door de bij de berekening aangenomen

relatief korte meettijd van maximaal 5 min te vergroten. Uit decompositie bleek dat de fout vooral door de temperatuur en in iets mindere mate de absolute druk wordt bepaald, terwijl volume en tijd relatief kleine fouten bijdragen.

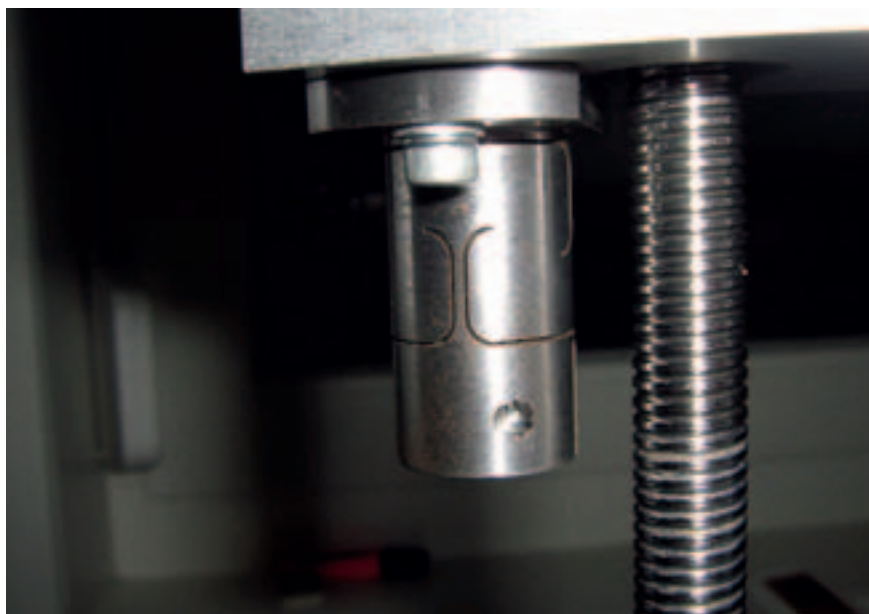
Thermisch ontwerp

Gezien de decompositie van de meetonzekerheid werd veel aandacht besteed aan het thermisch ontwerp. Zo is onder de meetbuis een warmtewisselaar voor het instromende gas toegevoegd om ervoor te zorgen dat het te meten gas de omgevingstemperatuur aanneemt. Ook is rond de plunjer in de kleinste uitvoering boven de meetbuis een warmtewisselaar geplaatst, om wrijvingswarmte ten gevolge van de afdichting af te voeren en zodoende lengteverandering van de plunjer (= volumeverandering van het gas) en ook temperatuurverandering van het gas zelf te voorkomen. De motor is thermisch geïsoleerd van de plunjer en het kleppenblok onder de meetbuis wordt pneumatisch bekrachtigd, zodat er ter plekke geen warmte door de elektrische besturing wordt gedissipeerd. De kleppen bevinden zich namelijk zo dicht mogelijk bij de meetbuis om het dood volume zo klein mogelijk te houden. Een gering dood volume is nodig om het effect van temperatuurverandering op het altijd aanwezige gasvolume te beperken. Voor de afdichting tot slot werd een low-friction seal toegepast met een beperkte voorspanning, dit om wrijvingswarmte te minimaliseren.

Overbepaaldheid spindelaandrijving

Een punt van aandacht in het ontwerp was ook nog de spindelaandrijving. Een gewone schroefspindel bleek een te laag rendement te hebben, veel lager dan de opgave van de fabrikant, om de voor de maximale flow benodigde snelheid te halen. Met een kogelomloopspindel bleek de gewenste snelheid wel haalbaar.

Een hiermee verbonden punt van zorg was de overbepaaldheid die nog op twee plaatsen in de aandrijving aanwezig was. Zo wordt de kracht tussen motor en wagen zowel via de lagering van de wagen op de brug (zie Afbeelding 4) als via de spindelmoer overgedragen, hetgeen aanvankelijk als



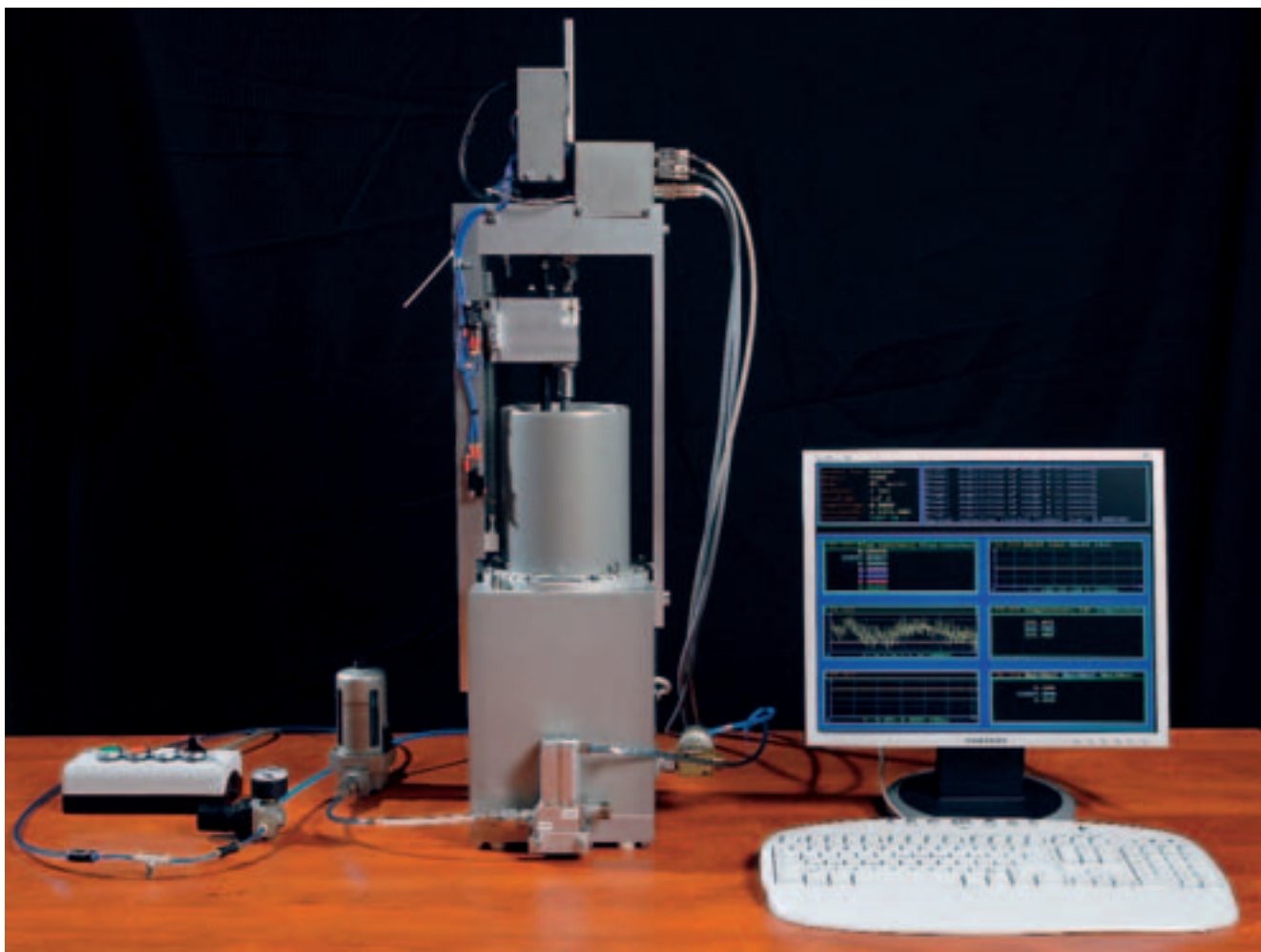
Afbeelding 7. Elastisch scharnier als verbinding tussen wagen en plunjerstang.

oorzaak van het lage rendement werd beschouwd. Om ongewenste krachten als gevolg van onvoldoende uitlijning van beide krachtpaden te vermijden, werd de spindelmoer flexibel bevestigd aan de wagen. Een tweede overbepaaldheid is dat de krachtoverdracht van de wagen naar de plunjer plaatsvindt via de plunjerstang én via de afdichting. Om deze te elimineren is de plunjerstang met een elastisch scharnier, uitgevoerd als een gedraadvonkt busje (zie Afbeelding 7), verbonden aan de wagen. Op deze manier worden twee rotaties van de plunjer(stang) vrijgelaten. Om ook translaties vrij te laten kan een tweede scharnier worden geïntroduceerd; dit is in het nu in ontwikkeling zijnde prototype gerealiseerd. Het voordeel van een dergelijke ontkoppeling is dat er geen wrijving wordt geïntroduceerd en er geen speling optreedt.

Tot slot

Voor de proof of principle heeft Demcon een uitvoering van de APP gebouwd voor de kleinste en de grootste diameter van de meetbuis; zie Afbeelding 8.

Eerste testen bij het NMI lieten nog een te grote afwijking ten opzichte van de primaire standaard zien, mogelijk als gevolg van een te groot dood volume in de testopstelling. De interne spreiding van de resultaten lag echter al onder de gewenste 0,1%. Inmiddels wordt in samenwerking met



Afbeelding 8. Proof of principle van de APP, in de uitvoering met de grootste meetbuis (145 mm diameter).

Bronkhorst High-Tech een prototype uitgewerkt met aandacht voor verdere verkleining van de meetonzekerheid door inzet van nauwkeuriger sensoren en vermindering van (variaties in) het dood volume door toepassing van kortere, dünnere en stuggere slangen.

De besturingssoftware werd gerealiseerd met behulp van Matlab/Simulink xPC. Voordeel daarvan is dat de software in de ontwikkelingsfase op een standaard-PC kan worden geschreven en getest en dat later voor het definitieve besturingsplatform, zoals een micro-controller, dezelfde software kan worden gebruikt.

Auteursnoot

Jan Leideman is mechatronic systems engineer bij mechatronisch ontwerp bureau Demcon in Oldenzaal. Rini Zwikker is senior mechanical engineer bij Demcon en leider van het APP-project. Hans van Eerden is freelance tekstschrjver te Winterswijk en tevens eindredacteur van Mikroniek.

Informatie

www.demcon.nl
www.bronkhorst.com