

Concepten voor precisiemetingen

In de metrologie is precisie gerelateerd aan onzekerheid, onnauwkeurigheid. Met de Engelse term 'precision' wordt ook wel 'resolutie' bedoeld: de kleinst waarneembare verandering in een meetgrootte. In sommige vakgebieden, waaronder de werktuigbouwkunde, wordt precisie geassocieerd met (zeer) kleine afmetingen. Het meten aan voorwerpen met micro-dimensies vraagt een hoge resolutie, een grote nauwkeurigheid: precisiewerk dus.

• P.P.L. Regtien •

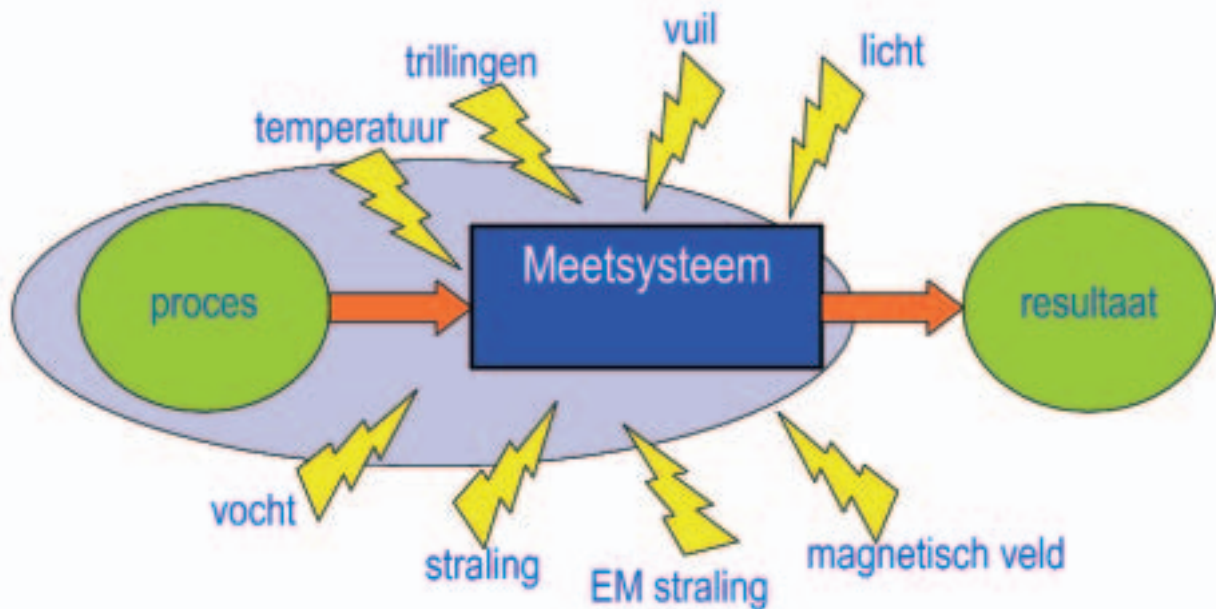
Het meten van een fysische (of chemische) grootte gebeurt vrijwel uitsluitend op basis van een of ander transductieprincipe: een fysisch effect waarbij de te meten grootte wordt omgezet in een daarmee gerelateerde elektrische grootte (spanning, frequentie, weerstandswaarde), al dan niet via een of meer tussenstappen. Het elektrische signaal laat zich verder eenvoudig verwerken met een computer. Een elektrisch signaal kan ook vrijwel onbeperkt worden versterkt. Daarom mag een sensor (of omzetter) best een lage gevoeligheid hebben. Voor een nauwkeurige meting is de signaal-ruisverhouding of signaal-stoorverhouding veel belangrijker dan de grootte van het meet-signaal zelf.

Hoe kleiner de afmetingen, hoe lastiger het meten ervan. En ook: hoe nauwer de toleranties van constructie-onderdelen, des te hoger de eisen aan de nauwkeurigheid van de meting. Micrometerprecisie is al lange tijd gewoon, nanometerprecisie is zijn opmars al begonnen, niet alleen in het laboratorium, maar ook in de machinebouw en voor allerlei producten. De consequentie is dat ook de benodigde meet-systemen een steeds grotere precisie moeten hebben.

Precisie begint bij een solide ontwerp. Keuzes daarbij zijn onder andere: een robuuste constructie (maar wel klein en licht), bestendige materialen (maar wel betaalbaar),

afscherming tegen storende invloeden (maar wel toegankelijk voor de te meten grootte). Door de noodzakelijke compromissen is het systeem nooit geheel gevrijwaard van storende invloeden. De volgende keuze betreft daarom de meetstrategie: hoe kan het effect van de onvermijdelijke storingen teniet worden gedaan of op zijn minst sterk worden gereduceerd. Hoewel de intrinsieke nauwkeurigheid van een (elektronisch) meetsysteem doorgaans zeer hoog is, wordt de kwaliteit van een meting echter bedorven door invloeden van buitenaf: temperatuur, elektromagnetische straling, trillingen, vochtinwerking, enzovoort (Figuur 1).

Een goede meetstrategie is daarom van groot belang. In het volgende voeren we een aantal principes ten tonele die kunnen leiden tot een sterke reductie van mogelijk optredende fouten, en met name die ten gevolge van een ongeconditioneerde omgeving. Die maatregelen lopen sterk uiteen: van het zo goed mogelijk buitensluiten ervan (afschermen) tot het compleet toelaten en vervolgens elimineren van het effect van de storing met behulp van specifieke signaalbewerkingen. Dit artikel kan slechts een beknopt overzicht geven van de vele methoden voor het verkrijgen van een hoge meetnauwkeurigheid.



Figuur 1. Belemmeringen voor een nauwkeurige meting.

Overzicht van methoden voor precisie-metingen

Net als bij precisiestystemen loopt de ontwerper van een elektronisch (meet)systeem voor een specifieke toepassing langs een reeks van min of meer generieke technieken die kunnen bijdragen aan de kwaliteit van het systeem. Onderstaande lijst toont de meest toegepaste methoden, met een korte toelichting en enkele voorbeelden.

- **Wel of niet contactloos**

Contactloos houdt in: de informatie wordt overgedragen via elektrische of magnetische velden, op licht- of geluidsgolven of op nog andere wijze, zonder mechanisch contact tussen proces en systeem. Voordelen: er treedt geen slijtage op, en het proces wordt nauwelijks belast.

Voorbeelden: stralingsthermometrie, wervelstroomverplaatsingssensor.

- **Filteren (isoleren)**

Twee mogelijkheden:

- voorafgaand aan transductie, dus in het domein van de te meten grootheid (voordeel: de storing hoeft niet door het meetsysteem te worden meegenomen);
- na transductie, dat wil zeggen in het elektrische domein (voordeel: meestal beduidend goedkoper).

Voorbeelden: thermische isolatie, infraroodfilter, elektrische en magnetische afscherming, mechanische demping.

- **Compensatie**

Globaal twee mogelijkheden:

- compensatie van het elektrische meetsignaal: de meetgrootte wordt meervoudig gemeten, onder zodanig verschillende condities dat het stoorsignaal geen effect heeft;
- compensatie in het domein van de grootte zelf.
Voorbeelden: differentiaalmetingen, brugmetingen, (actieve) guarding.

- **Correctie**

Achteraf wordt het meetresultaat gecorrigeerd voor het effect van de storing; voorwaarde is dat dit effect bekend is (gemeten, dan wel vervat in modellen).

Voorbeelden: temperatuurcompensatie bij bekende temperatuurcoëfficiënt; driepuntsmeting.

- **Modulatie**

Verschuiving van de informatie naar een ander deel van het frequentiespectrum, buiten het spectrum van de storingen; vereist tevens demodulatie.

Voorbeelden: optische chopper, fluxgate sensor.

- **Terugkoppeling**

Bekende en zeer effectieve manier van storingsonderdrukking; ook toepasbaar op niet-elektrische signaalgrootheden.

Voorbeeld: teruggekoppelde versnellingssensor ('force feedback').

Figuur 2 toont een schema waarin deze technieken in beeld zijn gebracht. Het middengedeelte (donkerblauw) vormt het basissysteem; afhankelijk van de eisen en toepassing kunnen daaraan een of meer van de bovengenoemde technieken worden toegevoegd. De lichtblauw gekleurde delen kunnen niet of met moeite achteraf worden toegevoegd; die moeten vanaf de beginfase van het ontwerp worden meegenomen. De geel gekleurde delen kunnen eventueel later nog worden toegevoegd, wanneer het ontwerp achteraf gezien toch niet voldoet.

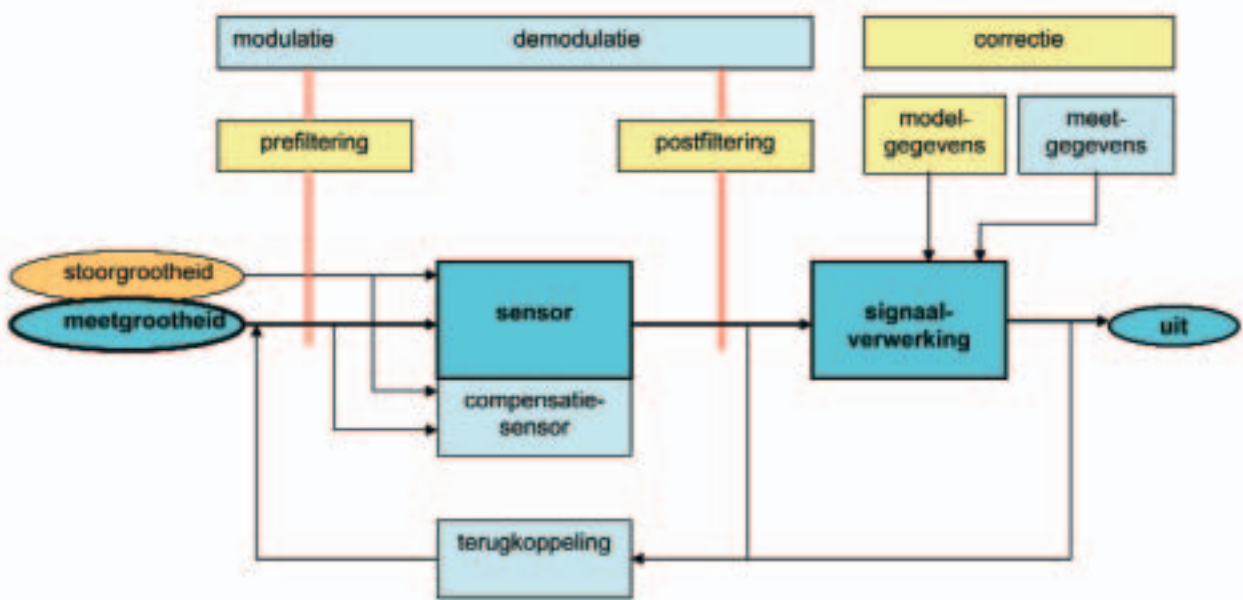
In het volgende zullen enkele van deze technieken nader worden geanalyseerd en met voorbeelden geïllustreerd: compensatie en modulatie.

Compensatiemethoden

Foutreductie door compensatie kan op velerlei wijzen worden geïnstrumenteerd. Eén daarvan is *actieve guarding*. De

methode wordt toegepast in geval de te meten grootheid naar de omgeving dreigt 'weg te lekken'. Men voorkomt dit door de grootheid te dupliceren. De volgende voorbeelden verduidelijken dit. Een luchtzuiger vertoont altijd wel enige lek. Wil men de hoeveelheid lucht onder de zuiger via een volumemeting nauwkeurig bepalen, dan mag er geen lek zijn. Dit wordt bereikt door de druk aan weerszijden van de zuiger gelijk te maken, onafhankelijk van de stand van de zuiger. Een ander voorbeeld betreft een nauwkeurige meting van een zeer kleine elektrische stroom. Alle meetstroom moet door het meetinstrument vloeien; eventuele lekstroom via de kabelweerstand wordt geëlimineerd door de buitenmantel van de kabel op dezelfde potentiaal te leggen als de binnengeleider. Een derde voorbeeld is aanbrengen van guard-elektrodes in een capacitief meetsysteem. Deze hulpelektrodes worden op dezelfde potentiaal gebracht als de actieve elektrode, waardoor er geen capacatieve lekstroom meer kan vloeien.

Een andere vorm van compensatie is *balancing*. Hierbij wordt de sensor dubbel uitgevoerd, en wel zodanig dat de beide sensoren tegengesteld reageren op de meetgrootheid (de differentiaaluitvoering), maar een even grote gevoeligheid hebben op een stoorsignaal dat de sensor bereikt. Het verschil tussen de sensorsignalen is dan vrij van storing.



Figuur 2. Diverse foutreducerende technieken in een meetsysteem.

De methode is relatief eenvoudig maar zeer effectief en wordt daarom veelvuldig toegepast. Figuur 3 toont een paar voorbeelden: een differentiële capacitieve verplaatsingssensor, een differentiële inductieve positie-sensor en een rotatiemeetsysteem met wervelstroomverplaatsingssensoren. Bij de eerste twee wordt de middenplaat respectievelijk de spoelkern mechanisch verbonden met het te meten bewegende onderdeel. Het derde betreft een voorbeeld waarbij de ontwerper zelf de differentiaalconfiguratie heeft opgebouwd met daarin twee enkelvoudige sensoren en een excentriek. Ook in geïntegreerde en andere miniatuursensoren wordt de balansconfiguratie veelvuldig toegepast om ongewenste effecten te reduceren. Al deze sensoren hebben een uitgangssignaal nul bij een specifieke waarde van de ingangsgrootte (de initiële waarde). In die toestand hebben, in het ideale geval, gemeenschappelijke stoorsignalen geen invloed (die worden immers ook gecompenseerd). De bekende brugschakeling berust eveneens op compensatie. In de initiële toestand hebben alle actieve componenten in de brug dezelfde waarde: de uitgangsspanning is nul. De twee of vier sensoren in de brug staan in differentiaalmodus: ze reageren paarsgewijs tegengesteld op de meetgrootte. Belangrijkste voordelen van brugmeting zijn:

- groot dynamisch bereik (voor metingen van relatief kleine veranderingen);
- stabiel nulpunt (onafhankelijk van de voedingsspanning en alle soorten common-mode signalen);
- grotere lineariteit (door de differentiële opstelling vallen even machten in een niet-lineaire overdrachtsfunctie tegen elkaar weg).

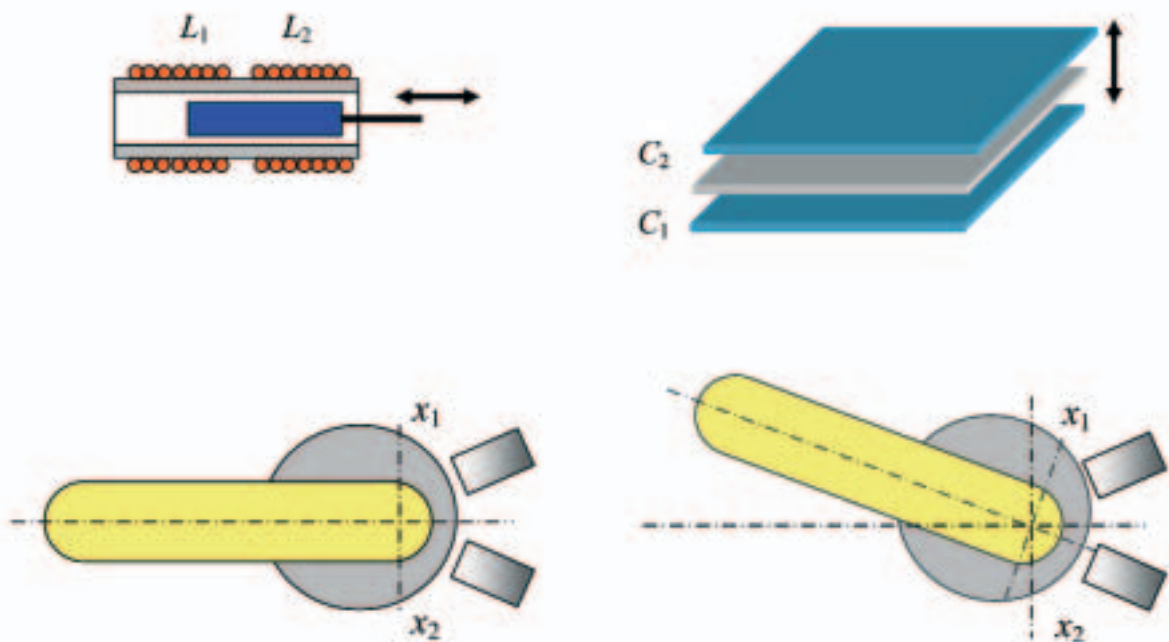
Een criterium voor de kwaliteit van een differentiële sensor is de *common-mode rejectiefactor* (CMRR). Stel de gevoeligheid van sensor i voor meetsignalen is S_{mi} en voor (gemeenschappelijke) stoorsignalen S_{ni} . De beide uitgangssignalen bedragen dan

$$y_1 = S_{m1}x_m + S_{n1}x_n$$

$$y_2 = -S_{m2}x_m + S_{n2}x_n$$

(het minteken weerspiegelt de balansconstructie). Het gecompenseerde uitgangssignaal (het verschil) is dan:

$$y_{comp} = (S_{m1} + S_{m2})x_m + (S_{n1} - S_{n2})x_n$$



Figuur 3. Voorbeelden van differentiaalsensoren.

Stellen we de gevoeligheden voor meetsignalen gelijk, en het verschil in gevoeligheden voor stoorsignalen op ΔS_n , dan vinden we:

$$y_{comp} = 2S_m x_m + \Delta S_n x_n = 2S_m \left(x_m + \frac{\Delta S_n}{2S_m} x_n \right)$$

De CMRR bedraagt $2S_m/\Delta S_n$, en geeft aan hoe goed de symmetrie van de constructie moet zijn om een bepaalde mate van storingsonderdrukking te realiseren.

Bij het vaststellen van relatief kleine veranderingen in een overigens willekeurige grootte, is het altijd verstandig om een differentiële meting na te streven.

Modulatie

Modulatie is een effectieve methode van storingsonderdrukking bij het meten van zwakke verschijnselen met een relatief smalle bandbreedte (dus langzaam variërende signalen). De kleine signalen kunnen niet zonder meer worden versterkt omdat een versterker ruis en andere storende componenten toevoegt die vele ordes van grootte sterker kunnen zijn dan het meetsignaal zelf. Modulatie omzeilt dit probleem.

Er bestaan diverse mogelijkheden om een meetsignaal te moduleren, waarbij 'choppen' de meest eenvoudige is. De meetgrootte wordt periodiek aan- en uitgeschakeld, waarmee in feite het signaal wordt vermenigvuldigd met een blokvormig signaal, de draaggolf. Vermenigvuldiging resulteert in frequentieconversie; het (laagfrequent) signaalspectrum wordt geconverteerd naar een gebied rond de draaggolffrequentie.

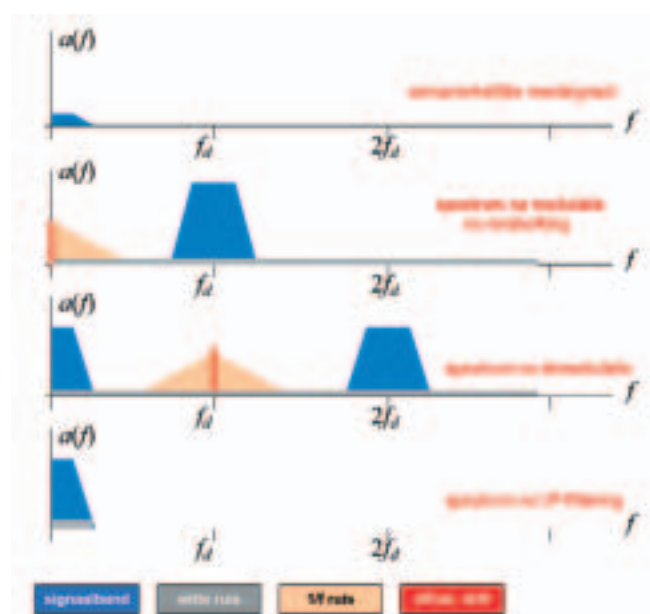
De kracht van de methode zit in het feit dat het vaak zeer kleine, maar nu gemoduleerde signaal zonder problemen kan worden versterkt. De met versterking gepaard gaande extra offset, drift, laagfrequent ruis en andere storende signalen kunnen van het (relatief hoogfrequente) signaalspectrum eenvoudig worden gescheiden met filters. Na demodulatie en eventueel verdere filtering ontstaat een ruisarm signaal.

Uiteraard moet het wel mogelijk zijn de meetgrootte daadwerkelijk te moduleren. In het optische domein is dat eenvoudig. De optische drager van de te meten grootte (de sterkte van een licht- of warmtebron) wordt vlak vóór de optische sensor periodiek onderbroken met een chopperwiel. Een magnetisch signaal kan worden gemoduleerd

door het periodiek in verzadiging brengen van een ferromagnetisch materiaal (dit gebeurt onder meer in een fluxgate sensor voor het detecteren van zwakke statische magneetvelden).

In veel andere gevallen moet de meetgrootte toch eerst worden omgezet naar het elektrische domein. Een bekend voorbeeld is de eerder genoemde brug. Een resistieve (of capacitieve of inductieve) transducent zet de meetgrootte om in een (verandering in) weerstand (respectievelijk capaciteit of zelfinductie). Twee of vier van deze transducenten vormen een meetbrug, die – gevoed met een periodiek wisselspanningssignaal – fungeert als een modulator. De meetbrug combineert dus twee technieken, compensatie en modulatie!

Na modulatie en versterking volgt demodulatie. Synchrone detectie is een elegante manier van demoduleren: het gemoduleerde signaal wordt vermenigvuldigd met de draaggolf of een daarmee synchroon signaal. Het product bevat naast allerlei signaalcomponenten met hogere frequenties ook het oorspronkelijke frequentiespectrum, dat met een eenvoudig laagdoorlaatfilter (low-pass, LP) daarvan is te scheiden. Het gehele proces van moduleren-demoduleren is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Signaalspectra in de verschillende stadia van modulatie-demodulatie.

De kracht van deze methode blijkt uit het volgende voorbeeld. Een 1 m lange ijzeren staaf wordt onderworpen aan een trekproef. Daartoe plakt men – op de juiste wijze – vier rekstrookjes (met rekfactor $K = 2$) op de staaf, om de uitzetting over langere tijd te meten. Het is duidelijk dat de afmeting van de staaf maar langzaam verandert; we stellen de bandbreedte van het signaal op 0,01 Hz. Vervolgens gaan we na wat de kleinste lengteverandering is die we nog kunnen waarnemen. Stel die grens gelijk aan de verandering die een even groot uitgangssignaal produceert als de ruis van het systeem zelf. Daar deze ruis voornamelijk afkomstig is van de versterker die het brugsignaal moet versterken, kiezen we een goede, ruisarme versterker met een spectrale ruisspanning van (bijvoorbeeld) $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Kies verder een brugvoeding van 5 V (effectieve waarde). Het uitgangssignaal van een ‘volle’ brug is gelijk aan de relatieve weerstandsverandering van de rekstrookjes maal de brugvoeding. In Figuur 4 is te zien dat als alle ruis buiten de signaalband door het laagdoorlaatfilter wordt uitgefilterd, de resterende ruis een effectieve waarde heeft van 20 nV maal de wortel uit de bandbreedte van dat filter, hetgeen 2 nV oplevert. Teruggerekend naar de lengteverandering van de 1 m lange staaf is dat equivalent met 0,2 nm. Dit resultaat wordt verkregen met vrijwel uitsluitend standaardcomponenten, hetgeen de kracht van de methode overtuigend demonstreert.

Slotopmerkingen

De meeste van de hiervoor beschreven methoden van storingsvermindering zijn ontstaan binnen het elektrische domein. Echter, zij kunnen wegens hun generieke aard met meer of minder aanpassingen ook worden toegepast in andere fysische domeinen. Naast de genoemde methoden voor storingsonderdrukking zijn er nog vele andere, meer specifieke oplossingen te bedenken. Het hangt af van de toepassing welke (combinatie van) methoden kunnen worden gebruikt in het ontwerp. Bieden zij geen van allen voldoende soelaas, dan zal naar bijzondere oplossingen moeten worden gezocht, welke overigens vaak in een hogere prijs zullen resulteren.

Een voorbeeld van een dergelijke bijzondere oplossing is een capacitieve dauwpuntssensor voor hoge temperaturen. De nauwkeurigheid van dit type vochtigheidsmeters hangt mede af van de zuiverheid van het op de detector gecondenseerde water. Toepassing in een niet erg schone omgeving resulteert in vuil op het detectoroppervlak, dat (gedeeltelijk) oplost in het condenswater. Daardoor verandert de dampspanning van water, waarmee de meting inboet aan nauwkeurigheid. Probleem is echter dat dit niet te zien is aan het meetresultaat zelf. Een maat voor de vervuilinggraad werd gevonden door niet alleen de capaciteit van de detector te meten (het reactieve deel van de impedantie) maar gelijktijdig ook het resistieve deel. Bij zuiver water is de weerstand hoog, maar die daalt met toenemende vuilconcentratie. Hiermee kon weliswaar het meetresultaat niet worden gecorrigeerd (simpelweg omdat de aard van de vervuiling niet bekend is), maar het systeem kon wel een signaal afgeven wanneer de vervuiling een zekere grens overschreed. Een analoge gedachtegang in het mechanische domein leidt tot het benutten van verschillende eigenfrequenties in resonerende systemen.

Het ontwerpen van systemen voor precisieingen metingen vergt de nodige kennis en ervaring. Een eenduidig recept voor een optimaal resultaat is niet te geven. De besproken algemene methodieken kunnen echter wel als richtlijn dienen gedurende het ontwerpproces. Het is aan te bevelen vanaf de start van het ontwerpproces de verschillende methodieken systematisch langs te lopen en deze zorgvuldig te toetsen op hun toepasbaarheid in het onderhavige ontwerp. Dit voorkomt het doorvoeren van ontwerpwijzigingen in een te laat stadium.

Auteursnoot

Prof.dr.ir. P.P.L. (Paul) Regtien verzorgde tijdens de Precisiebeurs 2006 in Veldhoven op 29 november de hoofdlezing, binnen het thema ‘Het precisie meten van fysische grootheden’. Hij is hoogleraar Meettechniek en Instrumentatie aan de Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica van de Universiteit Twente.

Informatie

www.ce.utwente.nl