

Meten en detecteren: alles, altijd en overal

Emissie en depositie van reactief stikstof, PFAS, microplastics, CO₂-emissies, methaanemissies, fijnstof, de materialencrisis, zoönoses. Voor elk van deze voorbeelden spelen meet- en detectietechnologie een cruciale rol; zowel voor het inschatten van de magnitude van het probleem als voor de ontwikkeling van oplossingen ervoor. Onze behoefte aan detailinformatie groeit hierdoor enorm en stelt stevige eisen aan de benodigde instrumentatie, aan de interpretatie van meetgegevens en aan communicatie, perceptie, en eigendom van meetresultaten. Metingen aan complexe systemen en de integratie van verschillende meetgegevens worden steeds belangrijker. Daarnaast willen we veranderingen in meetgegevens beter en sneller kunnen identificeren, om daarmee de overgang van curatief of reactief handelen naar preventief of proactief handelen mogelijk te maken.

Meten en detecteren zijn van essentieel belang voor de transitie naar een duurzame en gezonde samenleving. Meten en detecteren leveren de daarvoor benodigde gegevens voor systeembegrip en innovatie. Analytische wetenschap en technologie vormen de zintuigen van wetenschapper, innovator, beleidsmaker, -uitvoerder, bedrijf en burger. Daardoor is er een continue vraag naar nieuwe, verbeterde en meer gedetailleerde metingen. Dit vereist voortdurend innovatie van meet- en detectietechnologie. Doordat metingen ook in toenemende mate deel uitmaken van het dagelijks leven, onder andere als gevolg van *citizen science*, *Internet of Things* en *personalized medicine*, wordt het steeds belangrijker om de betekenis en de waarde van meetresultaten in te zien. Mensen die met meetresultaten geconfronteerd worden of deze bekijken, moeten de meetresultaten en veranderingen daarin kunnen interpreteren en in een kader kunnen plaatsen. Ook moeten zij zich bewust zijn van de waarde van hun gegevens voor anderen. Met het oog op privacy zal de maatschappij als geheel een gedragscode of zelfs wetgeving ten aanzien van eigendom en gebruik van meetgegevens en informatie moeten opstellen of aanpassen. Deze route verbindt daarom de funderende en toepassingsgerichte bètawetenschapsgebieden met alfadisciplines zoals educatie, psychologie, ethiek, gedrag en recht.


Vier gamechangers laten zich onderscheiden:

1. Van puntmeting naar systeembegrip

Droombeeld: Een instrument dat de volledige elementaire en moleculaire samenstelling en dynamiek van

een levend systeem, proces of materiaal plus de daarin aanwezige chemische, fysische en biologische interacties met submicrometerdetail en op microsecondentijdschalen kan bepalen op niet-destructieve wijze.

We kunnen al veel meten, ofwel met geavanceerde apparatuur in het lab ofwel in het veld met behulp van sensoren. Voor de hand liggende vragen als 'Hoeveel microplastics zitten er in mijn pizza en wat betekent dat voor mijn gezondheid?', 'Schaadt het fijnstof in de omgevingslucht waarin ik mij nu bevind mijn gezondheid?', 'Hoe groot is hier de depositie van reactief stikstof en waar komt die vandaan?' of 'Wat is dit voor een plastic en hoe kan ik die optimaal recycleren?' kunnen we echter nog steeds niet beantwoorden, zelfs niet als we de precieze samenstelling van het voedsel of de lucht zouden weten. Dat komt doordat we de complexe werkelijkheid niet op systeemniveau begrijpen. Dit begrip kunnen we verkrijgen door de materiële werkelijkheid en haar dynamiek vanuit verschillende invalshoeken te bekijken, en een studie te maken van hoe het geheel van de verschillende componenten zich gedraagt. Dit vraagt om complementaire en vaak ongelijksoortige metingen vanuit verschillende invalshoeken, met verschillende mate van fysisch, chemisch of biologisch detail, op verschillende lengte- en tijdschalen. Deze metingen moeten dan nog zo worden uitgevoerd dat ze zelf het systeem niet beïnvloeden. Om ons systeembegrip te kunnen verhogen, is een aantal oplossingen mogelijk. Op de eerste plaats moeten we de mate van detail van de metingen vergroten. Daarnaast moeten we nieuwe non-invasieve en non-destructieve meetmethoden



ontwikkelen. Voorts is ontwikkeling, inzet en combinatie van complementaire meettechnieken nodig, die verschillende aspecten van de materie en dynamiek daarin belichten. Tot slot moeten we generieke methoden ontwikkelen om ongelijksoortige meetgegevens, informatie en kennis van complexe systemen en systeemelementen met elkaar te combineren.

2. Meten waar en wanneer het nodig is

Droombeeld: In de toekomst hebben we onder andere een sensor voor persoonlijke voeding; een fabriek die haar productieparameters continu aanpast op basis van de actuele samenstelling van de grondstoffen; een systeem dat plastic- of metaalrecyclestromen meet en aangeeft met welk verwerkingsproces gekozen moet worden voor optimaal waardebehoud; een camera voor de directe specifieke detectie van schadelijke virussen en sensoren die continu en lokaal meten welke stoffen in op welke niveaus in lucht en water zitten.

Door in een vroeg stadium afwijkingen van een normale situatie te detecteren, kan ook zonder volledig begrip van het systeem preventief opgetreden worden. Dit vereist evenwel dat er voldoende meetgegevens beschikbaar zijn, en dat bekend is wat een significante of zorgwekkende afwijking is. In het geval van individuen geldt dat wat voor de ene persoon een indicatie voor een goede gezondheid is, voor de ander kan duiden op een zorgwekkende situatie. Om tijd te besparen en snel ingrijpen mogelijk te maken, moeten we de metingen, de verwerking ervan en in veel gevallen de terug- of doorkoppeling van de resultaten op dezelfde plek doen. Eigenlijk moet het lab dus naar of zelfs in het te meten object of individu gebracht worden. Miniaturisering van hightechinstrumentatie is daarvoor cruciaal. Omdat de metingen in toenemende mate door ongetrainde gebruikers gedaan zullen worden (*Measurement for the Millions, Citizen Science*), worden extra eisen aan de robuustheid en aan de doelmatigheid gesteld. Validatie en standaardisatie zijn daarbij cruciaal. Voor de gebruiker is belangrijk dat er een betrouwbaar en zoveel mogelijk eenduidig resultaat gepresenteerd wordt. De vragen 'Wat moeten we meten, hoe, waar en hoe vaak moeten we het meten, aan wie moeten we de data terugkoppelen en kunnen we metingen combineren' vereisen een verbinding tussen wetenschappers in de applicatiegebieden, analytische wetenschap, standaardisatie, design en systeemintegratie.

3. Het begrijpen van de relatie tussen structuur, samenstelling en functie

Droombeelden: Een expertsysteem dat op basis van moleculaire structuurinformatie de mogelijke gedaantes van een stof onder verschillende omstandigheden kan voorspellen; een expertsysteem dat aangeeft hoe zeer zorgwekkende stoffen in producten vervangen kunnen worden door veilige alternatieven; en een interdisciplinair wetenschappelijk platform voor structuur-eigenschaps- en structuur-prestatierelaties.

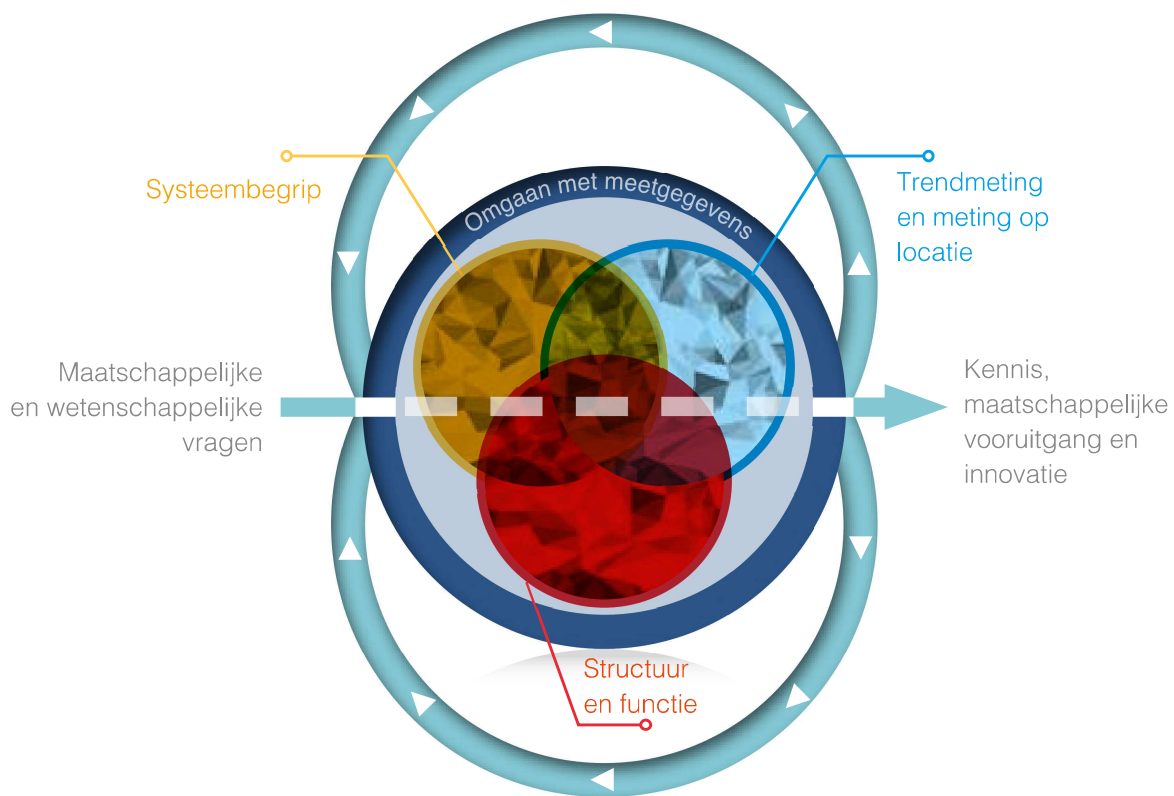
Systeembegrip staat of valt met begrip van de functie of het gedrag van de afzonderlijke componenten van dat systeem, en hun onderlinge interactie. Dit is onder andere van eminent belang voor de farmacie, om zowel de werking als bijwerkingen van medicijnen te kunnen begrijpen of om zonder dierproeven uitspraak te doen over de toxiciteit van verbindingen. Allereerst is het nodig om stoffen echt te leren kennen door meerdere structuuranalytische technieken in te zetten en het gedrag van de stof onder verschillende condities te bestuderen. Dit soort praktisch onderzoek kan versterkt worden door chemische en fysische berekeningen aan de confor-

maties. Een tweede stap is het in kaart brengen van de prestaties van de stof in haar functie. In wezen gaat het hier om het ontwikkelen van 'structuur-prestatie-relaties'. Een belangrijke succesfactor daarvoor is de beschikbaarheid van instrumenten waarmee we het gedrag van materie en de dynamiek van de componenten ervan tijdens hun gebruik of in hun functie kunnen bestuderen, zonder het systeem te verstoren. Er zijn enkele voorbeelden in wetenschap en industrie waar structuur en eigenschap of prestatie met elkaar in verband gebracht worden, maar deze zijn relatief beperkt en een generiek wetenschappelijk model ontbreekt. Door de Nederlandse publiek-private samenwerking op relevante wetenschapsgebieden is een platformfunctie goed te ontwikkelen.

4. Leren omgaan met meetgegevens

Droombeeld: Van analytische wetenschap naar analytische maatschappij; de verbinding van natuurkunde, chemie, biologie, statistiek, ethiek, recht, psychologie en ontwerp met gebruikers zoals telers, milieudeskundigen, voedingsdeskundigen, patiënten, artsen, burgers en operators, zodat wetenschappers en ontwikkelaars weten voor welke gebruikers ze iets ontwikkelen en gebruikers weten waarvoor en hoe ze de gegevens optimaal kunnen aanwenden.

Er zijn al honderden miljarden sensoren in gebruik voor een grote variëteit aan meettoepassingen, van milieumonitoring tot patiëntmonitoring, en van fabrieksmonitoring tot metingen aan infrastructuur en gebouwen. Dit sluit aan bij de in onze maatschappij toenemende behoefte aan zekerheid en het mijden van risico's, bijvoorbeeld op het gebied van psychische en lichamelijke gezondheid, voeding, veiligheid en integriteit van materialen. De burger zal niet alleen 'leven in een sensorium' maar zelf ook steeds meer deel gaan uitmaken van het team dat metingen uitvoert en interpreteert. Geminiaturiseerde meetapparatuur komt hierdoor in de handen van ongetrainde gebruikers en zal daardoor ook weleens verkeerd gebruikt worden. Deze ontwikkeling leidt tot een groeiende behoefte aan gevalideerde en gestandaardiseerde methoden om de kwaliteit van meetresultaten te bepalen en garanderen. Omdat meetgegevens ook zonder enige tussenkomst van experts gebruikt worden, in bijvoorbeeld het *Internet of Things*, is een nieuw soort kwaliteitsborging nodig. Deze kan gedeeltelijk ontwikkeld worden op basis van bestaande borgingsmethoden



en technieken, maar zal ook verregaande vernieuwing behoeven. Daarnaast kan educatie van zowel leek als wetenschapper helpen om slechte metingen en foutief gebruik van metingen te voorkomen. Inzetten op een goed begrip van de sterktes en zwaktes van de meetmethoden, de nauwkeurigheden, selectiviteit en specificiteit, alsmede op begrip van doel en gebruik van de metingen is daarbij cruciaal. De inhoudelijke training over deze basale aspecten van meetmethoden is geen probleem; de aanpassing van didactiek en onderzoek ten behoeve van identificatie van de meest effectieve didactische methoden zijn wel uitdagingen. Hiervoor zullen deskundigen op het gebied van meettechnologie, statistiek en didactiek de handen ineen moeten slaan en gezamenlijk onderzoek moeten entameren.

De wetenschap zal zeker in staat zijn om door verdergaand begrip van systemen de onzekerheidsmarges te verkleinen, maar onzekerheden zijn inherent aan meten. We moeten voor gebruikers inzichtelijk maken wat de betekenis van de onzekerheidsmarges is. Dit is extra relevant wanneer de meetresultaten slecht nieuws brengen. Vandaar dat een verbindend onderzoek met de psychologie op het gebied van perceptie en presentatie van resultaten op zijn plaats is. Ook komt hier de eerdergenoemde verbinding met de didactiek kijken.

Door gebruik van sensoren zullen we niet alleen veel te weten komen over het leven en over materie, maar ook over omgevingen en zelfs individuen. Vooruitgang in instrumentatie zal zo ook discussies over intellectueel eigendom, sociale acceptatie en privacy opleveren. Wie is eigenaar van de meetgegevens, van de informatie en van de kennis, en wat mag daar wel en niet mee gedaan worden? Wat mogen we doen met bijvangst? Unieke combinaties met ethisch en juridisch onderzoek moeten hier uitkomst bieden, maar niet zonder afschatting van de mogelijke impact en risico's van het 'in verkeerde handen vallen' van meetgegevens. Veiligheidsexperts moeten betrokken worden om oplossingen te ontwikkelen voor de beheersing van risico's. Ook zal onderzoek moeten worden gedaan naar de bewustwording van de maatschappij ten aanzien van de waarde van meetresultaten.

De ontwikkeling van een multidisciplinair platform dat zich richt op de sociale, ethische en juridische aspecten van meten en detecteren ligt voor de hand. Een geheel nieuw wetenschapsgebied, Analytische logica genaamd, moet geïnitieerd en aangestuurd worden vanuit bestaande samenwerkingsverbanden in de analytische wetenschap en technologie en de eerder genoemde overige betrokken wetenschapsdisciplines.