

Met complexiteit de wereld te lijf

Een introductie in een ingewikkeld onderzoeksveld

We zijn omringd door talloze complexe zaken. Neem bijvoorbeeld het internet, het menselijk immuunsysteem of een mierenkolonie. Wat deze verschijnselen gemeen hebben, legt **Gerrit Burgers** uit aan de hand van enkele recent verschenen publicaties. Daarbij staat de vraag ‘wat is complexiteitsonderzoek nu eigenlijk?’ centraal.

H

ET zou ‘the wrong kind of snow’ zijn, waardoor British Rail op 6 februari 1991 in de problemen kwam, meldt Wikipedia. Daar zit een grond van waarheid in; die dag zorgde het samenspel van weerpatronen en de fysica van het vormen van sneeuw-kristallen voor de vorming van een laagje uitzonderlijk geniepige poedersneeuw. Een klein beetje andere luchtstromingen, ietsje andere temperatuur, en de gewone vieze natte sneeuw zou zijn gevallen waaraan de Britten gewend zijn – vervelend, maar niet meer dan dat. De vraag of neerslag valt in de vorm van regen, natte of poedersneeuw is het resultaat van een complex proces, dat voor ons bij het KNMI ook anno 2011 vaak lastig te voorstellen is.

In de ons omringende wereld hebben we heel veel te maken met complexe verschijnselen. Poedersneeuw raakt ons in de regel nauwelijks, maar voor bijvoorbeeld de crisis rond de euro, of het beginnen van dementie kan dat anders liggen. Complexiteitsonderzoek zoekt naar gemeenschappelijke kenmerken van complexe processen om deze beter te begrijpen.

Voor een wetenschap die pretendeert van fundamenteel belang te zijn, is complexiteitsonderzoek verrassend lastig in een definitie te vangen. Bij onderzoek naar het heelal en naar elementaire deeltjes ligt dat stukken eenvoudiger. Die onderzoeksgebieden hebben direct te maken met vragen als ‘wat is onze plaats in het geheel?’, ‘waaruit bestaan we?’, en spreken daarmee een groot publiek aan. Met de studie naar het heel grote en het heel kleine is het reductionisme opgekomen als een succesvolle methode om verschijnselen te begrijpen in termen van natuurwetten. Maar lang niet alles laat



Insectenkolonies vormen complexe systemen die op een eigen wijze geanalyseerd kunnen worden.

Complexiteitsonderzoek begint vanuit de algemeen menselijke ervaring van verwondering en bewondering over de rijke variatie die we zien in de wereld waarin we leven. Hoogleraar computerwetenschappen Melanie Mitchell vertelt in de inleiding van haar boek *Complexity. A Guided Tour* hoe zij tot het besef kwam dat hier grote vragen liggen:

‘One of my motivations was in fact, how people think – how abstract reason-

Het is een motief dat bij de studie van alle complexe systemen telkens terugkeert: alleen de eigenschappen van de onderdelen bestuderen is niet genoeg voor het begrijpen van het geheel. Complexe systemen hebben een aantal karakteristieke eigenschappen met elkaar gemeen. Om te beginnen is er niet één natuurlijk niveau van detail om deze systemen te beschrijven, maar zijn er verscheidene beschrijvingsniveaus. Verder bestaat het systeem op microniveau uit heel veel aparte elementen die op elkaar inwerken en reageren. Ten slotte is er sprake van wat in het Engels ‘emergent behavior’ heet, oftewel spontaan optredend gedrag; het macroniveau vertoont structuren en interacties, zonder regie van buiten, die niet direct te herleiden zijn tot eigenschappen van de individuele micro-elementen. Mitchell is vooral geïnteresseerd in adaptieve complexe systemen die nog twee extra eigenschappen bezitten: ze verwerken externe informatie en ze zijn in staat tot aanpassing.

De studie van complexe systemen heeft wortels die teruggaan tot de negentiende eeuw, met de komst van de thermodynamica, de wiskunde van dynamische systemen en de statistische mechanica. Vakken die van wezenlijk belang zijn en die briljante mensen nodig hebben om

COMPLEXITY. A GUIDED TOUR door Melanie Mitchell. Oxford University Press. Oxford 2009. 366 pag. € 27,95

UNSIMPLE TRUTHS. SCIENCE, COMPLEXITY, AND POLICY door Sandra D. Mitchell. University of Chicago Press. Chicago 2009. 160 pag. € 29,70

‘Bij complexe problemen valt de scheiding tussen systeem en omgeving veelal niet eenduidig te maken.’

zich reductionistisch verklaren. Zo kunnen we binnen de natuurkunde het optreden van turbulentie niet zomaar uit de basisvergelijkingen aflezen, laat staan de ontwikkeling en organisatie van buiencomplexen, die zo mooi op de buienradar zijn te volgen. De reductionistische natuurkunde is op zijn best bij het formuleren van invariante en constante wetmatigheden, maar schiet vaak tekort om het optreden van complexe structuren adequaat te beschrijven.

ning, emotions, creativity, and even consciousness emerge from trillions of tiny brain cells and their electrical and chemical communications. [...] It was becoming clear that the reductionist approach to cognition was misguided – we just couldn’t understand [how thinking arises from brain activity] at the level of individual neurons, synapses, and the like. Therefore, although I didn’t yet know how to call it, the program of complex systems resonated strongly with me.’

voortgang te boeken. Maar ze gaan niet direct over de materie en interacties in de natuur; beoefening van deze vakken leidt daarom niet tot de bekendheid van een Newton of Einstein.

Een uitzondering vormt misschien de ‘vlinder van Lorenz’ die de onvoorspelbaarheid van het weer vangt – de wiskundige Edward Lorenz associeerde in 1963 het patroon van banen in een simpel ‘vlindermodel’ met het idee dat in chaotische systemen kleine veranderingen (‘de vleugelslag van een vlinder’) aanleiding kunnen geven tot grote gevolgen (‘een orkaan’) – maar dat komt waarschijnlijk doordat daar juist wel de relatie met de tastbare werkelijkheid van het weer wordt gelegd. Mitchell probeert

tegas te geven door hoog op te geven van de buitengewone intelligentie en veelzijdigheid van de Amerikaans-Hongaarse wiskundige John von Neumann. Aan het einde van het boek verzucht zij te hopen op een nieuwe Sadi Carnot, grondlegger van de thermodynamica. Daarmee benadrukt zij de ambivalentie over de rol van het complexiteitsonderzoek: is het nu een *toolbox* of een fundamentele wetenschap? Mitchell doet dit overigens welbewust; zij gaat controverses niet uit de weg in haar strijd om de lezer te overtuigen van wat complexiteitsonderzoek te bieden heeft.

Een rode draad door *A Guided Tour* is de overeenkomst tussen de werking van een computer en die van levende systemen. Dit is een sterk punt, omdat het een brug slaat tussen het onderzoek aan geconstrueerde computeralgoritmen en de werkelijkheid van levende systemen. Vooral aansprekend is het concept van de dualiteit van programma's en data. Als een programma zichzelf reproduceert, is het nodig dat uitvoergegevens ook als programma kunnen worden opgevat; ongeveer op de manier zoals het nodig is dat een cel de eiwitten produceert die nodig

aan hoe in *cellular automata* – wiskundige modellen waarin patronen zich ontwikkelen volgens simpele, lokale regels – spontaan optredend gedrag kan ontstaan dat op een hoger abstractieniveau op een natuurlijkere manier te beschrijven is dan met behulp van de lokale regels. Dat klinkt ingewikkelder dan het is: als we op de buienradar een bui zien aankomen en denken dat het wel eens kan gaan regenen, bekommeren we ons er ook niet om hoe de individuele regendruppels worden gevormd – terwijl die individuele regendruppels toch echt niet meereizen met de bui.

Het aardige is dat systemen die opgebouwd zijn uit heel eenvoudige componenten heel complex gedrag kunnen vertonen. Mitchell heeft zelf werk verricht aan het schrijven van een computerprogramma dat analogieën kan leggen, namelijk tussen rijtjes letters. Dit programma is in staat met heel menselijke antwoorden te komen en zelfs heel menselijk niet altijd hetzelfde antwoord op dezelfde vraag te geven.

Complexe systemen zijn vaak op te vatten als netwerken. Menselijke relaties, weginfrastructuur of telefoonverbin-

keur aan zich bij een netwerk aan te sluiten via een knooppunt met veel verbindingen. Sinds deze doorbraken is het onderzoek naar netwerken een volwaardige tak van complexiteitsonderzoek geworden.

Met een gebalanceerde keuze van onderwerpen is *A Guided Tour* een toepasselijke titel. Mitchell schrijft buitengewoon helder en biedt voor lezers met een gezonde dosis natuurwetenschappelijke interesse een uitstekend overzicht van het *complexity* veld. Hoe boeiend dit onderzoek is, komt goed uit de verf, maar het wordt aan de lezer overgelaten om te bedenken wat complexiteitsonderzoek nu precies is. Een eerste benadering is dat het daarbij gaat om het gebruik van wiskundige complexe systemen als prototypen voor systemen uit de werkelijkheid. Deze aanpak lijkt het sterkst wanneer gewerkt wordt aan simpele prototypen, die model staan voor grote klassen van systemen – en heeft tot een groot aantal invloedrijke, nieuwe concepten geleid, zoals chaos in dynamische systemen en schaalvrije netwerken. Bij ingewikkelder systemen is het vaak de vraag wat de relevantie van het prototype systeem is voor de werkelijkheid.

Een volgende opvatting is om complexiteitsonderzoek te zien als een soort *toolbox* van wiskundige technieken om de complexe wereld mee aan te pakken. Niet wezenlijk anders dan de *toolbox* van de mathematische fysica, die onontbeerlijk is voor het beschrijven van de negentiende-eeuwse natuurkunde. Mitchell lijkt aan het einde van haar boek toch deze opvatting op het oog te hebben, als zij schrijft dat het zo mooi zou zijn als complexiteitsonderzoek aan samenhang zou winnen en het stadium van de integraal- en differentiaalrekening van Newton zou weten te bereiken. Zij lijkt zichzelf daarmee echter tekort te doen. Want de laatste, en interessantste hier te noemen zienswijze is impliciet in haar hele boek aanwezig: complexiteitsonderzoek bestudeert hoe de natuur zich in structuren en clusters van structuren organiseert en hoe levende systemen werken in termen van zulke structuren. Dit onderzoek heeft dus niet de pretentie om het leven te begrijpen, maar levert wel steeds

traditionele reductionisme ontoereikend is. Zij weet hierin een buitengewoon verfrissend geheel te maken van ingrediënten die op zichzelf weinig schokkend of nieuw zijn. Het boek is een aanrader voor iedereen die geïnteresseerd is in de filosofische onderbouwing van onderzoek naar complexe problemen en in de vraag hoe dit onderzoek kan bijdragen aan het nemen van verantwoorde beleidsbeslissingen. Daarbij zijn Mitchells zelfverzekerde, ritmisch lopende zinnen een genoegen om te lezen, zelfs als de lezer niet altijd direct de betekenis ervan begrijpt.

De eerste lijn van het betoog gaat over spontaan optredend gedrag en over de noodzaak om bij een complex systeem verschillende niveaus van detaillering te beschouwen. Mitchell laat zien dat in een complex systeem niet alleen de lagere niveaus (de componenten) de hogere niveaus bepalen, maar ook dat de hogere niveaus invloed hebben op de lagere. Om deze systemen goed te begrijpen is het nodig verschillende niveaus van detaillering in samenhang te bekijken, een aanpak die Mitchell 'integrative pluralism' noemt.

Nu lijkt het rijgedrag van een auto een mooi voorbeeld van een alledaags complex systeem waarbij 'integrative pluralism' van pas komt. Mitchell schrijft echter: 'The behavior of a car, though perhaps not its aesthetic appeal, can be reduced to the many behaviors of the parts of which it is constructed.' Natuurlijk is een auto een ontworpen constructie die niet zonder bestuurder en monteur kan. Wellicht is een auto daarom als complex systeem minder interessant dan een mierenhoop, maar het blijft jammer dat Mitchell de kans laat glippen om te beschouwen in hoeverre *engineering* meer gewend is met complexiteit om te gaan dan *science*.

Hoe dan ook, Mitchell wil haar aandacht en energie juist richten op problemen die mensen wel kunnen beïnvloeden maar niet controleren. Een mooi voorbeeld van zo'n soort probleem is wat de kans op het optreden van depressieve stoornissen bepaalt en hoe genetische en omgevingsfactoren hierbij op elkaar inwerken. Als wetenschapsfilosoof besteedt Mitchell een aanzienlijk deel van haar betoog aan het beargumenteren dat

'Complexiteitsonderzoek heeft niet de pretentie om het leven te begrijpen, maar levert wel steeds meer inzicht in hoe levende systemen zich organiseren en tot gedrag komen.'

zijn voor het dupliceren van zijn eigen DNA. Hetzelfde geldt voor de reproductie van hogere vormen van leven: voor individuele dieren, maar ook voor bijvoorbeeld een kolonie mieren. Bij levende systemen is de reproductie onlosmakelijk verbonden met de evolutie.

Je kunt je afvragen of dit een aanwijzing is dat beredeneerd werken aan een betere toekomst voor de mensheid zijn grenzen kent, maar zover reiken de bespiegelingen van Mitchell niet. Zij laat wel zien hoe evolutie op een computer gebruikt kan worden voor het zoeken naar effectieve algoritmen. Bij de methode van 'genetic algorithms' wordt een populatie van kandidaat-programma's aan het broeden gezet. De geslaagdere recombinaties hebben meer kans om door te mogen naar de volgende generatie. In veel gevallen is dit een goede methode om geschikte oplossingen te vinden voor problemen die mensen niet in hun geheel kunnen overzien maar waarvoor wel ideeën bestaan over welke ingrediënten een algoritme zou kunnen bevatten – een voorbeeld is een innovatief ontwerp van een antenne voor NASA.

Een meer in het oog lopende overeenkomst tussen computerprogramma's en levende systemen is het verwerken van informatie. Bij levende systemen gebeuren op het basisniveau vaak simpele dingen – een stukje netvlies ontvangt een signaal – die pas op een hoger niveau een betekenis krijgen: met het verschil zien tussen een bewegende omgeving en ons eigen hoofd draaien, hebben onze hersenen geen enkele moeite. Mitchell toont

dingen zijn maar een paar voorbeelden van netwerken. Ook hier bestaan grote parallellen tussen natuurlijke systemen en computernetwerken. Iets meer dan tien jaar geleden is een wiskundige basis gevonden voor twee algemene eigenschappen die veel netwerken hebben. De eerste vinding is dat er in veel grote netwerken maar weinig stappen nodig zijn om twee willekeurige knooppunten te verbinden, het zogeheten *small world*-effect. In 1998 lieten de Amerikaanse wiskundigen Duncan Watts en Steven Strogatz zien dat je *small world*-netwerken kunt verkrijgen door het midden te houden tussen een regelmatig netwerk en een netwerk met *random* verbindingen tussen de knooppunten.

De tweede doorbraak was de introductie van het concept van 'schaalvrije netwerken' door twee uit Roemenië afkomstige Amerikaanse natuurkundigen, Albert-László Barabasi en Réka Albert, in 1999. Dit zijn heel grote netwerken waarin het aantal verbindingen dat een knooppunt heeft sterk uiteenloopt. Een bekend voorbeeld is de populariteit van websites. Populaire sites zijn zeldzamer dan minder populaire sites, en de variatie in populariteit is enorm. In schaalvrije netwerken bestaat een eenvoudig verband tussen de grotere zeldzaamheid van knooppunten naarmate ze meer verbindingen hebben. Voor websites is de vuistregel dat tienmaal zo populaire websites honderdmaal zeldzamer zijn. Bovendien vonden Barabasi en Albert een mechanisme voor het ontstaan van zulke netwerken: nieuwe knooppunten geven er de voor-

'Alleen de eigenschappen van de onderdelen bestuderen is niet genoeg voor het begrijpen van het geheel.'

meer inzicht in hoe levende systemen zich organiseren en tot gedrag komen. Het komt daarmee tegemoet aan een even diepe menselijke behoefte als waarin de astronomie of het elementaire deeltjesonderzoek voorziet.

Sandra Mitchell – geen familie van – schreef een heel ander boek over complexiteit. Deze auteur kijkt niet naar complexe systemen, maar naar de aanpak van complexe problemen. In haar boek *Unsimple Truths. Science, Complexity, and Policy* komt Mitchell met een nieuw kenistheoretisch raamwerk om complexe problemen aan te pakken, waarvoor het

spontaan optredend gedrag wezenlijk meer is dan een uiting van eigenschappen van het microniveau. Zij verwerpt daarbij als te beperkt het negentiende-eeuwse concept van 'emergente' eigenschappen die niet aan samenstellende elementen kunnen worden toegeschreven, zoals het nat zijn van water.

Uiteindelijk komt zij niet verder dan de redenering dat behalve de eigenschappen van de micro-elementen, ook de interacties tussen deze elementen voor het bijzondere macrogedrag zorgen. Dat is een zwaktebod, want het klassieke reductionisme neemt eveneens de interacties tussen de samenstellende ele-

menten mee. Er is veel meer te zeggen als je wilt vastpinnen wat spontaan optredend gedrag is – daarbij is gebruik te maken van zowel het negentiende-eeuwse

leggen en verwachten, en waarmee we handelingsperspectief verkrijgen voor onze acties in de wereld. We zouden aan deze redenering kunnen toevoegen dat

ses te maken van het effect van bepaalde maatregelen. Zo vormen waarschijnlijkheidsanalyses een centraal onderdeel van het instrumentarium waarmee in Nederland de hoogte van waterkeringen wordt bepaald. Mitchell merkt op dat voor complexe systemen het veelal ondoenlijk is te wachten totdat er vertrouwen is in of overeenstemming over de kansen dat bepaalde gebeurtenissen zich voordoen of dat die tot een specifiek gevolg zullen leiden. De situatie dat de kansen slecht bekend zijn, noemt Mitchell 'diepe onzekerheid'. Deze treedt bijvoorbeeld op in de discussie over de zin van maatregelen om CO₂-emissies te reduceren. In het geval van diepe onzekerheid missen waarschijnlijkheidsanalyses een harde basis en leiden slechts tot pseudo-exacte uitkomsten. Mitchell is er een groot voorstander van om dan met een alternatief te komen, namelijk het formuleren van

van de wetenschap om juist voor complexe problemen met een passend advies te komen en te zorgen dat over deze kwesties contact tussen wetenschap en beleid blijft bestaan.

Evolutie, immuunsysteem, behandeling van depressies, insectenkolonies: de levenswetenschappen domineren de beide hier besproken boeken, al bevatten ze wel eens een verwijzing naar het klimaatprobleem. Beide auteurs behandelen complexiteit als een bindend element, ieder vanuit een eigen invalshoek. Wie wil weten hoe je met complexiteit zaken als de evolutie, het immuunsysteem en het internet kunt analyseren, vindt in het boek van Melanie Mitchell een toegankelijke, enthousiaste introductie. Sandra Mitchell geeft optimisme en stof tot nadenken voor wie zich afvraagt of complexe systemen een eigen wetenschappelijke aanpak nodig hebben, en hoe wetenschap de maatschappij kan helpen bij het aanpakken van complexe problemen.

'In hoeverre is *engineering* meer gewend met complexiteit om te gaan dan *science*?'

concept van emergente eigenschappen als van de wiskunde van dynamische systemen uit de twintigste eeuw die wel aan de orde komt in *A Guided Tour*.

De futiliteit van het najagen van universele wetten voor complexe systemen vormt de tweede lijn van het betoog in *Unsimple Truths*. Bij complexe problemen speelt de context meestal een grote rol. De scheiding tussen systeem en omgeving valt veelal niet eenduidig te maken. Mitchell noemt een hiërarchie van wetenschapsgebieden die loopt van logica tot biologische systemen, waarbij wetten steeds minder absoluut en meer contextafhankelijk worden. Haar belangrijkste boodschap is dat zolang die balans tussen universaliteit en aandacht voor de context maar in orde is, de mate van universaliteit van de wetten irrelevant is voor de waarde van het onderzoek. Het blijft erom gaan relaties te leggen en kennis te verwerven (Mitchell noemt dit 'waarheden' vinden), waarmee we verschijnselen kunnen uit-

onderzoek niet alleen gaat om het bepalen van de wetten, maar ook om het karakteriseren van de realisatie waarmee we te maken hebben. Bij klimaatverandering is de vraag hoeveel warmer onze wereld wordt minstens zo interessant als weten wat de juiste theorie is om de invloed van een hoeveelheid extra CO₂ op de temperatuur van de aarde te bepalen.

'Bij levende systemen gebeuren op het basisniveau vaak simpele dingen die pas op een hoger niveau een betekenis krijgen.'

Ten slotte breekt Mitchell een lans voor het anders omgaan met 'diepe onzekerheid' bij het ondersteunen van beleidsbeslissingen. Vaak worden waarschijnlijkheidsanalyses gebruikt om kosten-batenanaly-

plausibele scenario's. Onderzoekers moeten zich daar dan niet voor generen, maar deze scenario's presenteren als het beste wat de wetenschap kan bieden. Want Mitchell ziet het als een belangrijke taak

Gerrit Burgers is hoofd Weer Onderzoek bij het KNMI. In 2008 was hij een van de opstellers van de outline voor het NWO-onderzoeksprogramma 'Complexity'.

Overige literatuur

- D. van Delft. 'Wij zijn allen stoommachines. De vier ijzeren wetten van het universum', *De Academische Boekengids* 78 (2009): 3-7.



Vrij Nederland schrijft helder, open en betrokken over film, kunst, cultuur, politiek en alles wat het leven de moeite waard maakt. Profiteer nu van ruim 70 procent korting en ontvang 12 weken Vrij Nederland in de bus voor maar 15 euro. Ga nu naar www.vn.nl of bel 0800-0220660. De VN-app voor iPad is voor abonnees gratis tot 2012

Vrij Nederland

Lang leve de inhoud