

Gesimuleerde Wetenschap. Hoe computersimulaties de wetenschap veranderen

Philip Brey

Dit is een pre-print versie van het volgende artikel:

Brey, P.A.E. (1997). Simulaties verdringen de werkelijkheid, *Automatisering Gids* 19: 17.

Het Brookings Instituut, Washington, D.C. De sociale wetenschappers Joshua Epstein en Robert Axtell zijn bezig met een onderzoek naar maatschappelijke patronen van groepsvorming en migratie. De maatschappij die ze hiervoor bestuderen is echter geen werkelijk bestaande maatschappij, maar een kunstmatige, door middel van een computer gesimuleerde maatschappij van enkele honderden met elkaar interagerende individuen. De onderzoekers hebben op het scherm een beeld voor zich dat deze individuen op een terrein localiseert, en kunnen zo hun precieze bewegingen volgen. Op elk moment kunnen ze aan de computer de volledige status opvragen van elk individu, en van verschillende dimensies van de maatschappij in zijn geheel.

Het werk van Epstein en Axtell illustreert een van de manieren waarop de computer actief wordt ingezet bij het verrichten van wetenschappelijk onderzoek. Steeds meer taken in de wetenschap worden gedeeltelijk of geheel overgenomen door computers. Langzaam maar zeker tekenen zich hierbij de contouren af van een revolutie in de manier waarop wetenschap bedreven wordt. De computer is allang niet meer een hulpmiddel dat wordt ingezet bij taken die in principe ook zonder computers verricht kunnen worden, zoals het maken van berekeningen en het beheer van gegevensbestanden. De computer fungeert steeds vaker als centraal medium, dat wordt ingezet bij kerntaken als experimenteel onderzoek en theorievorming.

Een centrale ontwikkeling in deze omslag is het toenemende gebruik van computersimulaties. Computersimulaties worden al veelvuldig toegepast in de technische en natuurwetenschappen, en zijn daar voor een transformatie aan het zorgen van de manier waarop onderzoek wordt verricht. Ook in de

biologische en sociale wetenschappen neemt hun gebruik echter toe. Voor deze wetenschappen zou een verregaande toepassing van computermodellen nog veel revolutionairdere consequenties hebben: de transformatie van deze wetenschappen naar het model van een exacte wetenschap.

De computer in de wetenschap: van rekenmachine tot laboratorium

De computer heeft al vroeg belangrijke toepassingen gekend in de wetenschap. Een belangrijke vroege rol van de computer was die van rekenapparaat. Computers konden in korte tijd complexe berekeningen maken waar wetenschappers dagen of zelfs jaren over zouden doen. De tegenwoordige functies van computers in de wetenschap zijn echter veel diverser. Computers hebben tegenwoordig een essentiële functie in de analyse en interpretatie van gegevens, de opslag en organisatie van wetenschappelijke kennis, en het presenteren van deze kennis in de vorm van bij voorkeur driedimensionale en manipuleerbare grafische representaties. Computernetwerken, met name het Internet, vormen tegenwoordig de belangrijkste informatie- en communicatiestructuur voor wetenschappers, en hebben belangrijke implicaties voor de manier waarop wetenschappelijke kennis zich verspreidt.

Sommige van deze computertoepassingen hebben vooral een efficiëntieverhogende functie. Zij zijn voornamelijk gericht op het versnellen van de uitvoering van taken en het verlichten van wetenschappelijke arbeid. Andere toepassingen, zoals programma's die 'intelligente' data-analyses verzorgen, gaan verder dan dat: Zij spelen een ondersteunende rol in de oordeelvorming en manier van kennisverwerken van wetenschappers, en kunnen op deze manier de ontwikkeling van wetenschappelijke kennis wezenlijk beïnvloeden. Computersimulaties gaan echter nog een stap verder. Zij betekenen een verschuiving in het *voorwerp* van onderzoek: In computersimulaties wordt niet de echte, empirische werkelijkheid onderzocht, maar een gesimuleerde werkelijkheid. In computersimulaties functioneren computers als volledige laboratoria, waarin experimenten worden uitgevoerd, observaties worden gedaan, en hypothesen worden getest.

Wetenschappers denken dat computersimulaties hen iets over de werkelijkheid kunnen leren, omdat ze menen dat computermodellen zo

vormgegeven kunnen worden dat ze corresponderen met een bestaande of mogelijke structuur in de werkelijkheid. Door de structuur in het model onderhevig te laten zijn aan dezelfde wetten die naar veronderstelling gelden in de werkelijkheid, kan men zo voorspellingen doen over de ontwikkeling of samenstelling van systemen (b.v. zonnestelsels, scheikundige mengsels). Op deze manier zijn de laatste decennia vooral in de technische en natuurwetenschappen belangrijke resultaten geboekt.

Het gebruik van computersimulaties in de biologische en sociale wetenschappen ligt echter veel problematischer. In de technische en natuurwetenschappen (uitgezonderd de biologie) kan men veelal terugvallen op fundamentele, formeel-mathematische wetmatigheden die voor de bestudeerde systemen gelden. In grote delen van de biologische en sociale wetenschappen ontbreekt het echter aan fundamentele, formele wetten waarop men zich kan beroepen. Het soort mathematische computermodellen dat wordt gebruikt in de technische en natuurwetenschappen, die meestal gebaseerd zijn op een systeem van partiële differentiaalvergelijkingen, is om deze reden voor deze wetenschapsgebieden vaak niet bruikbaar. In de laatste tien jaar is er echter een nieuw type computermodellen ontwikkeld, die specifiek op deze wetenschapsgebieden zijn toegesneden: modellen gebaseerd op de wetenschap van complexe adaptieve systemen.

De wetenschap van complexe adaptieve systemen

De wetenschap van complexe adaptieve systemen (CAS-en) is nauwelijks meer dan een decennium oud. CAS-onderzoek, waarvan een groot deel is geconcentreerd in het Santa Fé Institute in New Mexico, is discipline-overstijgend onderzoek dat zich bezighoudt met de algemene eigenschappen van complexe adaptieve systemen. Een CAS is een systeem dat bestaat uit een groot aantal los van elkaar opererende, op elkaar inwerkende eenheden, die op basis van hun interacties gezamenlijke gedragspatronen realiseren waardoor het lijkt alsof ze een bepaalde mate van onderlinge organisatie hebben. Met andere woorden, de steeds wisselende interacties tussen deze eenheden geeft aanleiding tot complexe structuren en temporele patronen in de organisatie van deze eenheden. Het zo gevormde systeem maakt een blijvende evolutie door, waarin structuren constant worden gerepliceerd,

maar ook continue aanpassingen plaatsvinden. Het systeem gaat entropie tegen door zichzelf steeds opnieuw te herbouwen, wat gebeurt door materialen uit de omgeving te betrekken, en nieuwe grenzen vast te leggen tussen de omgeving en zichzelf.

De veronderstelling van CAS-onderzoekers is dat veel structuren in de wereld zijn op te vatten als CAS-en. Ecosystemen, bijvoorbeeld, vallen duidelijk onder de definitie van een CAS. Cellen (opgebouwd uit interagerende celorganen en -structuren) zijn ook CAS-en, alsook meercellige organismen, waarvan het functioneren immers afhankelijk is van de onderlinge organisatie van hun cellen. Ook de menselijke hersenen vormen een CAS, te modelleren met behulp van neurale modellen. Sociale en culturele systemen zijn ook allemaal CAS-en: sociale structuren, economische systemen, culturen, religies, en talen zijn allen zelf-regulerende, evoluerende structuren die afhankelijk zijn van de interacties van de eenheden (mensen, organisaties, etc.) waardoor ze worden gedragen.

Uit dit lijstje blijkt dat het vooral biologische en sociaal-culturele verschijnselen zijn die als CAS zijn te analyseren. Mogelijk de enige uitzondering wordt gevormd door bepaalde vormen van autokatalytische chemische reacties. De meeste fysische en chemische systemen hebben echter niet de zelf-organiserende eigenschappen van CAS-en en hebben geen enkele weerstand tegen de wetten van de entropie.

CAS-onderzoek, waarvan de wortels deels in de cybernetica en systeemtheorie liggen, wordt gekenmerkt door een nadruk op formaliseerbaarheid en het zeer intensief gebruik van computersimulaties. Zo zijn in de loop der jaren een groot aantal formele benaderingen en implementatiewijzen ontstaan (b.v. genetische algoritmen/genetisch programmeren, agent-based models, cellular automata, etc.). Mede door de grote doorbraken die hierbij op modelleergebied zijn gerealiseerd, is de toepassing van CAS-onderzoek op specifieke typen CAS-systemen (b.v. ecosystemen, of culturen) tegenwoordig een serieuze optie geworden. Toegepast CAS-onderzoek is reeds in volle gang. In de afgelopen tien jaar hebben deze toepassingen vooral in de sfeer van de biologie gelegen. Maar ook de sociale wetenschappen komen steeds meer in beeld.

Artificial Life: het leven bestudeerd per computer

Een groot deel van het CAS-onderzoek gaat door het leven onder de naam 'Artificial Life' (ook genoemd 'Alife' of 'AL'). Artificial Life, een discipline die in het leven geroepen werd tijdens een congres in 1987 georganiseerd door Alife-goeroe Chris Langton, heeft als doel om kunstmatige (complexe) systemen te ontwikkelen die eigenschappen vertonen die normaliter aan levende systemen worden toegeschreven. Hierbij gaat het om eigenschappen als voortplanting, sexualiteit, co-evolutie, en zwermgedrag. Veel Alife-onderzoek richt zich op computerprogramma's die deze eigenschappen vertonen, maar er wordt bijvoorbeeld ook onderzoek gedaan naar het gedrag van zelfstandig opererende robotische systemen, zoals robot-insekten.

In Alife-programma's worden levende systemen (cellen, of individuele organismen) gecodeerd als afzonderlijke computerprogramma'tjes. Hun gedrag (interacties met elkaar en met hun natuurlijke omgeving) is onderhevig aan regels die in eerste instantie door dit programma worden bepaald. Dergelijke modellen zijn ingezet bij het bestuderen van uiteenlopende verschijnselen zoals celdeling, de evolutie van sexualiteit, het gedrag van zwermen, de ontwikkeling van ecosystemen, en de evolutie van symbiotische relaties tussen diersoorten.

Veel Alife-onderzoekers zien in Alife de belofte van een nieuwe, alomvattende biologie, die de bestaande biologie van het leven op aarde ver zal overstijgen. Zij stellen dat de bestudering van het leven op aarde blikvernauwend is, omdat het zich alleen richt op op koolstof gebaseerde levensvormen die zich hebben ontwikkeld in het toevallige geografische milieu van de planeet aarde. Artificial life biedt de belofte van een universele biologische wetenschap van alle mogelijk bestaande levensvormen.

Alife-onderzoekers benadrukken echter dat het Alife-onderzoek niet alleen bijdraagt aan deze algemene doelstelling, maar ook grote vooruitgang kan boeken in de studie van het leven op aarde. Zij benadrukken dat de bestaande biologie veel fundamentele verschijnselen nog nauwelijks begrijpt, zoals het ontstaan van leven, processen van zelf-organisatie, culturele evolutie, de structuur van ecosystemen, het ontstaan van sexualiteit, en het ontstaan van bewustzijn. Veel van deze zaken worden onvoldoende begrepen omdat men in de biologie onvoldoende inzicht heeft

in het ontstaan van organisatie en complexiteit. Het is precies op dit (brede) terrein dat Alife-onderzoek denkt een bijdrage te kunnen leveren.

Van Artificial Life naar Artificial Societies

De laatste jaren bevindt steeds meer toegepast CAS-onderzoek zich op het terrein van de sociale wetenschappen. Voor een deel bestaat dit onderzoek uit regelrechte extensies van onderzoek in Artificial Life. De overgang van ALife-simulaties naar simulaties van menselijke gemeenschappen lijkt soms dan ook slechts een kleine stap: Men hoeft bij wijze van spreken slechts de dieren in gesimuleerde diergemeenschappen te vervangen door individuen met menselijke eigenschappen, en vervolgens te kijken welke organisatievormen ontstaan. Hier volgt een aantal voorbeelden van recent CAS-gebaseerd onderzoek in de sociale wetenschappen:

- De eerder genoemde wetenschappers Epstein en Axtell presenteren in hun recente boek *Growing Artificial Societies* een integraal model voor de sociale wetenschappen, wat zij het Artificial Society-model noemen. Dit model gaat uit van agent-based modelling, een modelleertechniek ontleend aan Alife waarin met behulp van object-georiënteerde programmeertechnieken een model wordt gebouwd dat bestaat uit een omgeving (vaak een landschap met bestaansbronnen en een concrete topografie) en een verzameling individuen ('agents') die geprogrammeerd zijn volgens een aantal (modificeerbare) gedragsregels. Door het aantal individuen, hun gedragsregels en de structuur van het landschap te variëren kan men zo verschillende organisatiepatronen bestuderen die resulteren uit een beginsituatie waarin de individuen in de omgeving worden 'losgelaten'. Epstein en Axtell hebben op basis van een specifiek model studies gedaan van groepsvorming, migratie, culturele transmissie, verdeling van bezit en inkomen, handel, het verspreiden van ziekten, en oorlogvoering.

- De antropoloog Nicholas Gessler, verbonden aan de Universiteit van Californië in Los Angeles, doet etnografisch onderzoek naar artificiële culturen. In zijn boek *Artificial Culture: Experiments in Synthetic Anthropology*, dat dit jaar bij MIT Press zal verschijnen, bestudeert hij culturele ontwikkeling in virtuele samenlevingen. Deze culturen bestaan uit personen ('agents' die kunnen

denken, handelen en leren) en materiële middelen (artefacten, bouwwerken, natuurlijke hulpbronnen) die in een virtuele omgeving zijn gesitueerd. Gessler bestudeert de culturele ontwikkeling van dergelijke samenlevingen, zoals de vorming van klassen, het ontstaan van taakverdelingen, en het gebruik van artefacten.

- Leigh Tesfatsion, van de Iowa State University, is een econoom die onderzoek doet in Agent-based Computational Economics (ACE). ACE is, zoals hij het omschrijft, de studie van economieën die zijn gemodelleerd als evoluerende systemen van autonome, interagerende 'agents'. Wat hij en andere ACE-onderzoekers proberen te modelleren het ontstaan van schijnbaar spontane regelmatigheden in economische processen, zoals de ongeplande coordinatie van handelsactiviteiten in gedecentraliseerde markteconomieën (de door Adam Smith veronderstelde 'onzichtbare hand'). De door hem ontwikkelde 'trade network game', mede gebaseerd op de speltheorie, simuleert gedecentraliseerde economieën waarin de meerdere generaties van handelaren handelspartners selecteren op basis van de door hen verwachte winstresultaat, en bestudeert hoe op deze manier stabiele handelsstrategieën evolueren.

De pro's en con's van toegepast CAS-onderzoek

CAS-onderzoek in de biologisch en sociale wetenschappen verschilt in twee belangrijke opzichten van regulier onderzoek in deze wetenschappen. Ten eerste is deze benadering synthetisch waar regulier onderzoek analytisch is: inplaats dat men probeert te verklaren hoe organismen, ecosystemen, culturen, e.d. zijn opgebouwd uit kleinere delen, probeert men deze structuren en processen zelf uit kleinere delen na te bouwen ('bottom-up' benadering). Een tweede verschil is dat de CAS-benadering zich niet beperkt tot de biologie of sociale wetenschap van op aarde bestaande levensverschijnselen of maatschappijvormen, maar pretendeert bij te dragen universele wetenschap van het deze zaken, die leidt tot generalisaties en wetmatigheden die gelden voor in principe elke mogelijke levensvorm of maatschappij.

Beide punten geven de CAS-benadering aantrekkingskracht, met name de eerste. De analytische benadering van de biologische en sociale wetenschappen heeft namelijk als nadeel dat het vaak moeilijk is de

onderliggende mechanismen van biologische en maatschappelijke processen bloot te leggen, juist omdat deze processen zo complex zijn. Experimenteel onderzoek is bovendien vaak moeilijk, omdat in regulier onderzoek wetenschappers nu eenmaal niet de macht hebben om zaken als maatschappijen en evolutionaire processen onder gecontroleerde omstandigheden in hun laboratoria te onderzoeken. Wetenschappelijke hypothesen zijn hierdoor moeilijk toetsbaar. De synthetische benadering in CAS-onderzoek maakt experimenteel onderzoek juist goed mogelijk: Zowel de onderzochte verschijnselen als de onderliggende mechanismen die deze verschijnselen genereren zijn volledig kenbaar voor de onderzoeker, en de onderzoeker is goed in staat om sommige variabelen te manipuleren terwijl andere constant wordt gehouden.

De belofte van CAS-onderzoekers dat hun benaderingswijze kan leiden tot revolutionaire vooruitgang in de biologische en sociale wetenschappen lijkt te mooi om waar te zijn. Er moet dan ook gewezen worden op enkele problemen die deze benaderingswijze met zich meebrengt. Ten eerste is de veronderstelling dat biologische en maatschappelijke verschijnselen afdoende verklaard kunnen worden door ze kunstmatig na te bouwen dubieus. CAS-onderzoekers veronderstellen vaak dat het mechanisme volgens welke in hun modellen een bepaald verschijnsel wordt gegenereerd wel hetzelfde zal zijn als de mechanismen die in de werkelijke wereld gelden. Hiervoor bestaat echter geen enkele garantie. Er zijn bijvoorbeeld misschien wel duizenden mogelijke evolutionaire mechanismen volgens welke het ontstaan van biologische soorten verklaard kan worden. CAS-onderzoekers hebben derhalve het probleem dat ze aan moeten kunnen tonen dat de mechanismen in hun modellen ook de mechanismen zijn die in het echt werkzaam zijn.

Een probleem dat hier niet los van staat is dat bestaande CAS-modellen enorme simplificaties van de werkelijkheid zijn. Modellen bevatten meestal slechts enkele tientallen of honderden interagerende eenheden (b.v. cellen of personen), terwijl realistische modellen eerder duizenden of miljoenen eenheden zouden moeten modelleren. De regels volgens welke eenheden interacties plegen zijn bovendien vaak erg eenvoudig, terwijl het toch vaak gaat om eenheden met een dierlijke of menselijke intelligentie. Huidige computers zijn echter niet krachtig genoeg om veel complexere modellen aan te kunnen. Ongetwijfeld zullen meer realistische modellen in de toekomst mogelijk zijn,

maar ook met de huidige toenames in de kracht van computers zal het nog enige tijd duren voordat realistischer modellen mogelijk zijn. Zelfs bij meer realistische CAS-modellen blijft echter de vraag of deze modellen niet te reductionistisch zullen zijn, en of het zelfs principieel mogelijk is complexe biologische en maatschappelijke verschijnselen te verklaren als het produkt van de interacties van zelfstandige, geheel onafhankelijk van elkaar gedefiniëerde eenheden.

Postmoderne Wetenschap?

Het gebruik van computersimulaties in de wetenschap is de laatste decennia enorm toegenomen. Naast hun acceptatie in de natuurwetenschappen en cognitieve wetenschappen zijn ze momenteel ook een flinke opmars aan het maken in de biologische wetenschappen, en lijken de sociale wetenschappen te gaan volgen. Het kenmerk van deze nieuwe wetenschap is dat zij de werkelijkheid niet analyseert maar simuleert.

De filosoof Baudrillard heeft beweerd dat wij tegenwoordig in een postmodern tijdperk leven. Nog niet zo lang geleden leefden wij in het moderne tijdperk, dat onder meer gekenmerkt werd door de nadruk op het materiële, en op het scherpe onderscheid tussen tekens (of simulaties) en de werkelijkheid waar zij naar verwijzen. In postmoderne tijdperk staat materie niet meer centraal, maar draait alles om informatie, en vervaagt het onderscheid tussen teken en werkelijkheid. Deze transformatie naar een postmodern tijdperk is volgens hem mede veroorzaakt door informatisering en de toepassing van cybernetische technologieën.

Baudrillard richt zich in zijn analyses vooral op de hedendaagse massacultuur, maar het lijkt erop dat zijn theorie evengoed van toepassing is op de hier besproken wetenschappelijke benaderingen. Onderzoekers in Alife en artificiële sociale wetenschap beweren vaak dat biologische en maatschappelijke processen in principe onafhankelijk zijn van een materieel medium, en in essentie bestaan uit een formele informatiestructuur. Vervolgens concluderen ze dat de kunstmatige levensvormen die zij bestuderen echt levend zijn, of dat zij echte maatschappijen bestuderen. Eerder al beweerden onderzoekers in de Artificiële Intelligentie hetzelfde over de intelligentie van hun programma's.

Het onderscheid tussen simulatie en werkelijkheid wordt door deze onderzoekers dus opgeheven. Het studiedomein van de wetenschap is voor hen niet langer de materiële werkelijkheid, maar de 'informationele' werkelijkheid: een logische ruimte van formele structuren. Of, en in hoeverre, deze zienswijze gemeengoed zal worden in de wetenschap, zal nog afgewacht moeten worden.