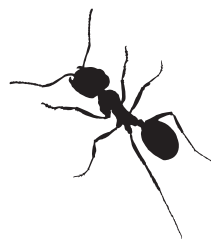




**Len
Fisher**

zwerm intelligentie

**over slimme groepen
en domme massa's**



Zwermintelligentie

**Over slimme groepen
en domme massa's**

Len Fisher

MAVEN
PUBLISHING

Oorspronkelijke titel
*The Perfect Swarm: The Science of Complexity in Everyday
Life*

© 2009 Len Fisher / Basic Books, New York

Nederlandse vertaling
© 2010 Maven Publishing B.V., Amsterdam / Joost Mulder,
Haarlem

www.mavenpublishing.nl

Ontwerp omslag G2K
Boekverzorging Asterisk*, Amsterdam

ISBN 978 94 9057 410 9 / NUR 770

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd
en/of openbaar gemaakt door middel van druk,
fotokopie, microfilm of op welke wijze en/of door welk
ander medium ook, zonder voorafgaande schriftelijke
toestemming van de uitgever.

Voor Wendella, zonder wie ik de vier boeken
die zij inmiddels heeft overleefd niet had overleefd.

INHOUD

Inleiding

9

Hoofdstuk 1

Het ontstaan van zwermintelligentie

21

Hoofdstuk 2

Treksprinkhanen en bijen

43

Hoofdstuk 3

Mierenlogica

63

Hoofdstuk 4

Krachtenspel in de menigte

81

Hoofdstuk 5
Groepsintelligentie: de meerderheid of het gemiddelde?
107

Hoofdstuk 6
Consensus: dwaze consistentie?
129

Hoofdstuk 7
Rages, besmetting en communicatie: de wetenschap van netwerken
163

Hoofdstuk 8
Vuistregels
203

Hoofdstuk 9
Zoeken naar patronen: verbeelding en werkelijkheid
237

Hoofdstuk 10
Simpele regels voor complexe situaties
255

Woord van dank
265

Noten
267

Register
337

INLEIDING

10 Kort nadat de film *Star Wars* voor recordomzetten had gezorgd, zat een groep van 97 sprinkhanen klaar om de film te gaan bekijken. Veel keus hadden ze niet: ze zaten vastgebonden en met hun koppen stevig ingeklemd terwijl onderzoekers de pieken aan elektrische activiteit in hun hersenen volgden waarmee ze reageerden op de vloten ruimteschepen die van beide kanten op hen af kwamen suizen.

De wetenschappers probeerden erachter te komen hoe sprinkhanen er in een dichte zwerm in slagen onderlinge botsingen te voorkomen. Onderzoek naar dit aspect van zwermgedrag heeft waardevolle informatie opgeleverd over menselijk zwermgedrag, variërend van de manier waarop wij onze weg weten te vinden door mensenmassa's tot systemen voor het voorkomen van autobotsingen. Er zijn tal

van andere manieren waarop we lering kunnen trekken uit het gedrag van dieren in groepen zoals sprinkhanen-zwermen, vogelformaties en scholen vissen. Dit boek laat zien hoe we die lessen niet alleen kunnen gebruiken om betere groepsbeslissingen te nemen, maar ook voor betere beslissingen als individu binnen een groep.

De individuele dieren in een zwerm, kudde of school volgen regels die hen in staat stellen optimaal gebruik te maken van de groep. Sommige van deze regels helpen de leden van de groep om bij elkaar te blijven. Andere regels stellen de leden in staat zich te gedragen alsof ze onderdeel zijn van een superorganisme dat zonder individuele leider opereert en waarvan, naarmate de groep zwermintelligentie ontwikkelt en benut bij het nemen van collectieve beslissingen, het geheel groter wordt dan de som der delen.

De moderne complexiteitswetenschap heeft aangetoond dat collectief gedrag in groepen dieren (met name van insecten zoals sprinkhanen, bijen en mieren) voortkomt uit een verzameling uiterst simpele regels voor de interactie tussen individuen en hun directe burens. Hij heeft ook laten zien dat veel van de complexe patronen in de menselijke samenleving het resultaat zijn van soortgelijke eenvoudige regels voor de sociale interactie tussen individuen. Mijn uiteindelijke doel met dit boek is te onderzoeken hoe dit proces verloopt en, nog belangrijker, eenvoudige regels te vinden die ons door de mist van complexiteit kunnen leiden naar onze levens maar al te vaak in gehuld lijken te zijn.

Het proces dat maakt dat eenvoudige regels uiteindelijk tot complexe patronen leiden wordt 'zelforganisatie' genoemd. In de natuur doet dit fenomeen zich voor als

atomen en moleculen spontaan samenkomen en kristallen vormen en die kristallen zich vervolgens combineren tot, om maar iets te noemen, de ingenieuze patronen van zeeschelpen. Het doet zich voor als de wind over het zand van de woestijn blaast en ingewikkelde duinformaties creëert. Het doet zich gedurende onze eigen lichamelijke ontwikkeling voor zodra individuele cellen bij elkaar komen en structuren vormen zoals een hart en een lever, en patronen zoals een gezicht. Het doet zich ook voor zodra wij mensen samenkomen en met elkaar de complexe sociale patronen van families, steden en samenlevingen vormen.

Een centrale instantie die toezicht houdt op het proces is hierbij overbodig. De enige vereiste is een geëigende verzameling eenvoudige lokale regels. Losse zandkorrels voegen zich samen tot duinen onder invloed van de combinatie van zwaartekracht, windkracht en onderlinge wrijving tussen zandkorrels. Atomen en moleculen ondergaan de aantrekkings- en afstotingskrachten van nabijgelegen atomen en moleculen, krachten die op zichzelf voldoende zijn om tot een verstrekkende ordening te leiden die zich in alle richtingen over een afstand van miljarden atoomdiameters kan voortzetten.

Onze samenleving bestaat eveneens uit miljarden individuen en onze onderlinge aantrekkings- en afstotingskrachten kunnen op soortgelijke wijze tot sociale structuren leiden. Deze structuren zijn echter bij lange na niet zo regelmatig als die van atomen in een kristal. Om de schilderachtige maar enigszins misleidende zinsnede van de complexiteitswetenschapper te gebruiken: ze bevinden zich op de rand van chaos.

De uitdrukking kan verkeerd worden begrepen, aangezien het woord ‘rand’ suggereert dat onze sociale structuren permanent gevaar lopen in anarchie te vervallen. Wat het in feite betekent is dat ze qua organisatiegraad ergens tussen volmaakte orde en totale chaos in liggen.

Het valt niet mee om totale chaos te bereiken, al vindt mijn eega dat de ongeordende stapels papier op mijn bureau er aardig dicht bij in de buurt komen. Mijn tegenwerping is dat, ook al ben ik de enige die in staat is hem waar te nemen, er achter die chaos wel degelijk ordening schuilt.

Achter de meeste vormen van chaos gaat ordening schuil. We hebben het dan over dynamische ordening, een fenomeen dat je kunt waarnemen door simpelweg wat koude melk in een dampende kop zwarte koffie te gieten. Bovenin verschijnen patronen die verraden wat er zich onder het oppervlak afspeelt, waar de vermenging van de hete en koude vloeistof een verzameling draaikolkjes oplevert die zichzelf in korte tijd ordenen tot een opmerkelijk regelmatig patroon van wat bekendstaat als Rayleigh-Bénard-cellen. Je kunt ze tegenkomen in een flinterdunne vloeistoflaag op een plat bord, maar ook in de kilometers dikke laag van de aardatmosfeer.

13

Systemen die zich op de rand van chaos bevinden, waaronder groepen dieren en menselijke samenlevingen, kennen eveneens een dynamische ordening, die echter een stuk langer stand houdt dan de draaikolkjes in een kop koffie. De ordening is het resultaat van regels voor de interactie tussen individuen die uiteindelijk grootschalige dynamische interactiepatronen opleveren. De resulterende

verzameling patronen is kenmerkend voor de samenleving als geheel, en niet voor de individuele leden.

Deze patronen kunnen een uiteenlopend scala aan tijdschalen bestrijken. Sommige, zoals de patronen van steden, kunnen zeer lang bestaan. Andere, zoals die van een bewegende mensenmassa, kunnen net zo vluchtig zijn als de wolken aan een winderige hemel. Weer andere, zoals die van menselijke relaties, liggen ergens tussen die twee in.

In een systeem dat zich op de rand van chaos bevindt zijn twee soorten dynamische patronen mogelijk. In het ene slingert het systeem eindeloos heen en weer tussen verschillende posities, zoals wel eens gebeurt bij huiselijke ruzies die eindeloos door kunnen gaan zonder tot een oplossing te komen. In het andere, veel productievare, patroon past het systeem zich aan aan veranderende omstandigheden, zoals de vorm van een school vissen bij het naderen van een belager.

Als de individuen in een groep in staat zijn collectief te reageren op veranderende omstandigheden, wordt de groep een complex adaptief systeem. De regels die aan dat soort systemen ten grondslag liggen en hun gedrag sturen zijn van niet te onderschatten belang, niet alleen voor onderzoekers van de menselijke samenleving, maar ook voor onderzoekers van de natuur als geheel.

Succesvolle ecosystemen zijn complexe adaptieve systemen, evenals succesvolle steden en samenlevingen. Volgens het Gaia-concept van wetenschapper James Lovelock is de aarde als geheel een complex adaptief systeem. Een zeer goed denkbare langetermijnaanpassing, een die ons allemaal zou moeten interesseren, is dat de aarde zich uit

zelfbescherming misschien wel van de mens als soort zal ontdoen. Of dat gaat gebeuren of niet zou wel eens kunnen neerkomen op de vraag of we er op tijd in zullen slagen de regels van de complexiteit van het systeem aarde te ontdekken en of we dan wijs genoeg zullen zijn om ons aan die regels aan te passen en te conformeren.

Om een complex adaptief systeem te kunnen laten evolveren en groeien, moeten de interacties tussen de individuele leden aan bepaalde eisen voldoen. In plaats van simpelweg additief, zoals bij het aantal teamleden dat in een touwtrekwedstrijd aan het touw hangt, dienen de interacties niet-lineair te zijn, wat inhoudt dat een door een individu verrichte handeling een onevenredig sterke reactie oproept bij andere individuen of bij de groep als geheel. Eén enkele persoon die aan het eind van een concert begint te klappen, bijvoorbeeld, kan meerdere mensen ertoe aanzetten dat ook te doen, die op hun beurt weer enkele anderen prikkelen, tot al snel het hele publiek zit te applaudisseren.

15

Collectief klappen kan zich soms synchroniseren, wat een eigenschap is van het publiek als geheel, en niet van welke individuele toeschouwer ook. Dergelijke emergente (opduikende) eigenschappen dienen zich in complexe adaptieve systemen aan zodra er tegelijkertijd sprake is van meerdere soorten niet-lineaire actie.

Een van de belangrijkste emergente eigenschappen die een groep kan hebben is zwermintelligentie, die een groep in staat stelt problemen aan te pakken en op te lossen op een manier waartoe de individuele leden niet in staat zijn. In dit boek onderzoek ik de eenvoudige regels die in de natuur aan zwermintelligentie ten grondslag liggen. Ik stel

de vraag aan de orde of we zwermintelligentie, en de regels die eraan ten grondslag liggen (of andere, even simpele regels), kunnen gebruiken als hulpmiddel om onze weg te vinden door de complexiteiten van het leven.

Onze ontdekkingsreis begint bij het dierenrijk en verloopt in negen stappen. In de eerste drie stappen behandelen we de evolutie van zwermintelligentie in de natuurlijke wereld en de lering die we kunnen trekken uit de onderliggende regels. De volgende vier stappen richten zich op het ontwikkelen van groepsintelligentie in de menselijke samenleving en de toepassing ervan bij het oplossen van complexe problemen. In de laatste twee stappen gaan we dieper in op het fenomeen complexiteit zelf en leggen we nieuwe en simpele regels bloot die we kunnen gebruiken om de best mogelijke beslissingen te nemen op momenten dat de complexiteit ons in zijn web gevangen lijkt te houden.

16

Hoofdstuk 1 geeft een overzicht van zwermintelligentie: Wat is het? Hoe ontstaat hij uit niet-lineaire interacties? Welke soorten dieren maken er gebruik van? Welke voordelen biedt zwermintelligentie de individuen binnen een groep en de groep als geheel?

In de daaropvolgende twee hoofdstukken behandelen we de regels die sprinkhanen en bijen volgen als ze in zwermen vliegen, alsmede de laag-bij-de-grondse logica der mieren. Deze drie soorten insecten gebruiken de basisregels van complexe adaptieve systemen op zeer verschillende manieren om gestalte te geven aan zwermintelligentie. Van elk van deze manieren kunnen we als mensen iets leren.

De botsingvermijdingsstrategieën van sprinkhanen hebben implicaties voor bestuurders van voertuigen en voor mensen die zich in menigten bevinden. Bijen gebruiken ‘onzichtbare leiders’ om de bewegingen van de zwerm te sturen. Wij kunnen hetzelfde doen en eveneens van zulke leiders profiteren als we ons op onbekend terrein bevinden. Mieren gebruiken een gespecialiseerde vorm van groepslogica die hen in staat stelt de kortste weg te vinden en looproutes te optimaliseren. Wij kunnen tijdens wandelingen of autotochten hun voorbeeld volgen. Het aantal manieren waarop hun wijze van probleemoplossen inmiddels in andere situaties wordt toegepast zal je wellicht verbazen.

Na de hoofdstukken over insectenlogica besteed ik aandacht aan individueel gedrag in mensenmenigten en beschrijf ik hoe recent onderzoek naar de complexe dynamiek van mensenmenigten optimale strategieën heeft blootgelegd om onze weg door dat soort mensenmassa’s te vinden en het er in gevaarlijke massasituaties zo goed mogelijk af te brengen.

17

In de twee volgende hoofdstukken richt ik me op het groepsgewijs nemen van beslissingen. Allereerst stel ik de vraag of we een gemiddelde koers moeten volgen, eentje die met ieders mening evenveel rekening houdt, of dat we de koers moeten volgen die door de meerderheid wordt erkend. In het tweede hoofdstuk laat ik zien hoe we groepsintelligentie kunnen gebruiken om tot de best mogelijk consensus te komen en hoe we onderweg de valkuilen van groepsdenken het beste kunnen omzeilen.

Een van de manieren waarop groepsintelligentie kan

worden gerealiseerd is via netwerken. In hoofdstuk 7 onderzoek ik verschillende netwerkmethodes, waaronder de methodes die tot de befaamde zes niveaus van scheiding leiden. Ik laat zien hoe nieuwe inzichten doeltreffendere netwerk- en communicatiestrategieën hebben opgeleverd en ons vermogen om de verspreiding van ziekten via het menselijk netwerk te voorkomen hebben vergroot.

Het voorlaatste hoofdstuk is gewijd aan de manieren waarop we eenvoudige regels kunnen gebruiken om, als we met complexe problemen worden geconfronteerd, tot de beste individuele beslissingen te komen. Sommige van deze succesvolle benaderingen zijn echt heel simpel en leiden tot verrassende conclusies ten aanzien van de hoeveelheid en het soort informatie dat we nodig hebben om tot de beste beslissingen te kunnen komen.

- 18 Als laatste onderzoek ik in hoofdstuk 9 nog een andere manier om tot beslissingen te komen, namelijk door op zoek te gaan naar patronen binnen de complexiteit. Soms kunnen deze patronen ons in de juiste richting leiden, maar zoals de wetenschap laat zien is de samenleving als geheel veelal groter dan de som der delen en zullen we ons er bewust van moeten zijn dat er momenten kunnen zijn waarop de complexiteit van het geheel de eenvoud die erin verborgen ligt aan het oog onttrekt. Eenvoud is prima, maar de complexiteit regeert. Afgesproken?

Noot bij de Noten

In de loop van het door mij verrichte onderzoek voor dit boek ben ik op tal van fascinerende anekdotes, verwijzingen en interessante punten gestuit die zich niet goed lieten

inpassen in de hoofdttekst. Ik heb ze samengebracht in een verzameling eindnoten, die bedoeld is om naar believen te worden geraadpleegd en genoten en die heel goed los van de hoofdttekst kunnen worden gelezen. Meerdere lezers van mijn eerdere boeken, die op dezelfde manier zijn opgebouwd, hebben me laten weten dat de noten het eerste zijn wat ze lezen! Als je van een onderwerp in de hoofdttekst meer wilt weten, is de kans groot dat de noten je met gedetailleerdere informatie verder op weg helpen.

Sommige van de noten wijzen je de weg naar de onderliggende wetenschappelijke literatuur (doorgaans toegankelijk via websites zoals Google Scholar). Ik heb mijn best gedaan artikelen te selecteren die niet alleen baanbrekend zijn, maar ook gemakkelijk leesbaar.

Veel plezier!

EEN

HET ONTSTAAN VAN ZWERM-INTELLIGENTIE

- 22 Het gedrag van dieren in een zwerm werd vroeger als een bijna magisch iets beschouwd. Er waren zelfs wetenschappers die meenden dat zwermen insecten, scholen vissen en vogelformaties hun schitterend gecoördineerde bewegingen te danken hadden aan een vorm van buitenzintuiglijke waarneming. Een alternatieve verklaring ging uit van de ontwikkeling van een soort groepsbewustzijn waarvoor de dieren hun individualiteit opgaven en dat hen tot marionetten maakte.

Gewapend met kennis van de complexiteitswetenschap, hebben diergedragdeskundigen inmiddels aangetoond dat we ook zonder dat soort vergezochte verklaringen het ontstaan van zwermgedrag kunnen verklaren. Het komt op natuurlijke wijze voort uit simpele regels voor de interactie tussen de naburige leden van een groep en doet zich bij-

voorbeeld voor tijdens de wave zoals toeschouwers in een voetbalstadion die met elkaar creëren. Terwijl de wave er voor een toevallig passerend Marsmannetje mogelijk als een ingewikkelde logistieke oefening uitziet, is het dynamische patroon ervan in werkelijkheid het resultaat van één simpele regel: sta op en steek je handen in de lucht (en laat ze vervolgens weer zakken) zodra je je buurman of -vrouw dat ziet doen.

Voor zo'n wave is een snelle informatieoverdracht tussen individuen vereist, wat meteen ook een sleutelkenmerk is van zwermgedrag. In de menselijke zwerm kan die overdracht zich manifesteren in de vorm van roddelen: buren kletsen met buren, waarna er langs dezelfde route aanvullende informatie terugkomt, totdat iedereen weet wat er gaande is en op basis van die informatie kan handelen. Mijn vrouw en ik kwamen eens, op uitnodiging van vrienden, aan op een plattelandsbraderie. Bij de ingang werden we begroet door een volslagen vreemde die één blik op ons wierp en zei: 'Jullie vrienden zitten in de bierproeftent.' Terwijl de vrouw onze vrienden niet eens had gezien, had ze via de tamtam niet alleen gehoord waar ze zich bevonden, maar ook dat ze mensen verwachtten die aan ons signalement voldeden.

23

Zwermgedrag wordt zwermintelligentie zodra een groep erin slaagt het te gebruiken om gezamenlijk een probleem op te lossen op een manier waartoe de groepsleden los van elkaar niet in staat zijn. Bijen gebruiken het om nieuwe plekken te vinden om te nestelen, terwijl mieren het gebruiken om de kortste route naar een voedselbron te vinden. Het speelt ook een sleutelrol, zij het een onverwachte,

in veel aspecten van onze eigen samenleving, van de werking van het internet tot aan de manier waarop onze steden functioneren.

Inmiddels zijn er mensen die zwermintelligentie op verrassende en innovatieve manieren benutten. Er worden bedrijven opgezet die met behulp van zwermintelligentie worden bestuurd. Computerprogrammeurs gebruiken het als onderdeel van een radicale benadering van probleemoplossen. Er is zelfs een jaarlijks evenement, Swarmfest, waar wetenschappers elkaar ontmoeten om met elkaar van gedachten te wisselen over nieuwe toepassingen van zwermintelligentie.

24 Groepen die gebruikmaken van zwermintelligentie kunnen het zonder leider en zonder centrale planning stellen. Hoe slagen ze er desondanks in hun samenhang te bewaren en beslissingen te nemen die zo te zien rationeel zijn? Hoe vertalen individuele interacties zich in dergelijke complexe gedragspatronen? Willen we onze eigen individuele interacties zo goed mogelijk kunnen benutten, dan zullen we het antwoord op deze vragen moeten zien te vinden. Die antwoorden zijn afkomstig uit drie bronnen: de fysieke wereld der dieren, de denkbeeldige wereld der wetenschap en de virtuele wereld van de computer. Hieronder volgt in het kort de achtergrond voor elk van de drie.

Leren van het koninkrijk der dieren

Dieren gebruiken zwermintelligentie bij hun jacht op voedsel, het vinden van schuilplaatsen en het uit de weg gaan van belagers. De wetenschappelijke studie van hun gedrag,

de ethologie, heeft de simpele regels blootgelegd die dieren gebruiken om zwermintelligentie voort te brengen. Het heeft de betrokken wetenschappers bij tijd en wijle ook in even ongebruikelijke als netelige situaties doen belanden.

De Duitse etholoog Martin Lindauer kwam halverwege de jaren '50 in een wel heel bizarre situatie terecht toen hij erachter probeerde te komen hoe zwermen honingbijen hun weg vinden naar nieuwe plekken om te nestelen. Werkzaam in het door de oorlog gehavende München, had hij er een gewoonte van gemaakt om onder bijenzwermen mee te rennen, waarbij hij, mogelijk om duidelijk te maken dat hier een bonafide wetenschapper aan het werk was, stevast een witte labjas droeg. Ongelukkigerwijs had zijn jas veel weg van het verplichte uniform van de patiënten in een nabijgelegen inrichting voor gevaarlijk geestelijk gestoorden. Op een dag zetten bewakers van het ziekenhuis, die hem aanzagen voor een ontsnapte patiënt, de achtervolging in. Gelukkig was hij de bewakers te snel af, wat niet alleen aantoonde hoe fit hij was, maar ook hoe snel bijenzwermen kunnen vliegen.

25

We hebben veel te danken aan Lindauer en andere wetenschappers die zich in het belang van de wetenschap aan gevaar hebben blootgesteld. Toen twee Braziliaanse wetenschappers besloten om scholen piranha's te gaan volgen door er recht boven te snorkelen deden ze luchtig over het gevaar dat de vissen hen zouden aanvallen, waar ze waarschijnlijk gelijk in hadden. Minder gefundeerd was de manier waarop ze het risico wegwuifden dat ze zouden worden aangevallen door in de omgeving jagende kaaimannen. Met typisch wetenschappelijke luchtigheid klaagden ze er

in hun verslag slechts over dat de kaaïmannen hun nachtelijke observaties verstoorden door met hun staarten te slaan en het water te vertroebelen.

De Brazilianen waren niet de eersten die al snorkelend scholen vissen volgden. Die eer komt vermoedelijk toe aan de Griekse filosoof Aristoteles, waarvan sommige historici geloven dat hij een gezichtsmasker opzette en zijn bebaarde gezicht in het water van de Egeïsche Zee dompelde om waar te kunnen nemen dat ‘de zeebaars (*Dicentrarchus labrax*) en de harder samen opzwemmen, ondanks de onderlinge vijandigheid van deze wezens’.

26 Aristoteles riskeerde niet meer dan een natte baard. Een wetenschapper onder wiens leiding ik ooit de ecologie van koraalriffen in Australië's Groot Barrièrerif bestudeerde nam aanzienlijk meer risico toen hij een, naar verluidt onschuldige, Australische toonhaai plaagde door hem een por te geven met zijn zwemvlies. Hij legde ons uit dat de haai zwakke kaken en kleine, stompe tanden had. De haai bewees op beide punten zijn ongelijk door dwars door zijn zwemvlies heen te bijten en onwrikbaar vast te houden. Het water was ruim 1,80 meter diep, terwijl de wetenschapper niet verder kwam dan 1,78 meter. De enige manier waarop hij aan de verdrinkingsdood kon ontkomen was door te bukken, zijn zwemvlies los te maken en het bij de haai achter te laten.

Hoewel al deze wetenschappers nieuwe feiten over de door hen bestudeerde dieren ontdekten, was bioloog Brian Partridge van de Universiteit van Miami de eerste wetenschapper die ons inzicht in de manier waarop groepen dieren soms als één groot superdier kunnen bewegen, handelen

en besluiten nemen, echt een stap verder bracht. De diersoort waar hij zijn oog op had laten vallen was de koolvis.

De koolvis staat ook wel bekend onder de naam pollak en is sinds de achteruitgang van de kabeljauw- en schelvisstand steeds vaker terug te vinden op ons westerse menu. Er zijn twee soorten: de Alaska koolvis (*Theraga chalcogrammais*), die wel de ‘grootste nog resterende bron van eetbare vis ter wereld’ wordt genoemd, en de Atlantische koolvis (*Pollachius virens*). Beide kunnen een lengte bereiken van iets meer dan 90 centimeter en een gewicht van iets boven de 20 kilo.

Partridge bestudeerde de Atlantische koolvis, die net als veel andere vissoorten schoolgedrag vertoont. Partridge realiseerde zich dat hij, om te kunnen doorgronden hoe de school bij elkaar bleef en als één geheel kon bewegen, elke individuele vis zou moeten kunnen herkennen en volgen.

27

Dat eerste was eenvoudig: hij voorzag elke vis simpelweg van een rugmerk (met behulp van een vriesijzer, in plaats van een gewoon brandijzer). Het volgen van de vis zou echter een stuk minder makkelijk worden. Voor dit doel liet hij scholen van twintig tot dertig koolvissen rondjes zwemmen in een donutvormig bassin met een doorsnede van 10 meter, dat stond opgesteld op het terrein van de Universiteit van Aberdeen (Schotland). Terwijl de vissen rondzwommen, bewoog de experimentator op een boven het bassin gemonteerde stellage met hen mee en volgde van daar af de beweging van de school, ondertussen als een paardensportverslaggever lopend commentaar gevend op de individuele prestaties van de koolvissen. Aangezien de school een zwemsnelheid had van ongeveer 30 centime-

ter per seconde, werd de experimentator, met zijn hoofd omlaag, met een frequentie van ongeveer één omwenteling per minuut rondgedraaid. Dat lijkt niet echt spectaculair, maar toen ik dit nadeed in een draaimolen op een kinderspeelplaats bleek het een duizelingwekkende ervaring.

Duizeligheid was echter wel het minste waar de onderzoeker zich druk over hoefde te maken. Nadat de experimenten waren afgerond en de vissen vrijgelaten (of opgegeten, zijn artikel vermeldt niet wat hun lot was), zetten Partridge en zijn assistenten zich aan de taak om op meer dan 12.000 filmbeeldjes nauwgezet de relatieve positie van elke vis te bepalen. Toen ze hiermee klaar waren, ontdekten ze de sleutelregels die de school vissen in staat stelden zich als één geheel voort te bewegen. Het waren er slechts twee en ze werden door elke vis opgevolgd: volg de vis voor je (als die er is)* en zwem even snel als de vis naast je.

Van deze twee simpele regels, op diverse manieren verwoord, weten we inmiddels dat ze aan allerlei complexe groepsbewegingen ten grondslag liggen, van de schitterend gecoördineerde flitsbewegingen als gevolg van veranderingen van vorm of richting bij scholen vissen tot de bewegingen van vogelformaties, zwermen insecten en mensenmassa's. Maar hoe komt deze complexiteit nu eigenlijk tot stand? Welke processen spelen hierbij een rol? Om het antwoord te kunnen vinden op deze vragen, moeten we ons wenden tot een andere bron, de wereld van de natuurwetenschap.

* Als er geen vis voor je zwemt, dan is natuurlijk alleen de tweede regel van toepassing!

Leren van de wetenschap

Mijn eerste kennismaking met de toepassing van wetenschap op complexiteitsvraagstukken was begin jaren '70, tijdens een robbertje bridge. Tegenover me zat Robert (inmiddels Lord) May, die in een op de hoek van de tafel liggend notitieboekje voortdurend allerlei krabbels en teken-tjes zette waar ik niets van begreep. Ik had geen idee dat hij op dat moment geschiedenis aan het schrijven was.

Robert was geïntrigeerd door het gedrag van een uiterst simpele vergelijking die bekendstaat als de 'logistische vergelijking' (*logistic difference equation*), en die door wiskundigen wordt gebruikt om de groei van dierenpopulaties te beschrijven. Het was een volstrekt respectabele vergelijking, die ook volstrekt respectabele antwoorden opleverde. Hij voorspelde bijvoorbeeld dat populaties in eerste instantie exponentieel zullen groeien, maar dat, zodra voedsel, ruimte of andere hulpbronnen schaarser worden, de groei-curve zal afvlakken op een niveau dat hun leefomgeving in stand kan houden.

29

Robert was echter op een paradox gestuit. Bij bepaalde niveaus van populatiegroei sloeg de vergelijking op hol. In plaats van geleidelijke veranderingen te voorspellen, voorspelde hij cyclische of chaotische overgangen tussen explosieve groei en ineenstorting, wat aangaf dat populaties ogenschijnlijk zouden kunnen floreren, om vervolgens plotseling ineen te storten. Dat de vergelijking deze resultaten opleverde, kwam doordat hij elementen van positieve en negatieve terugkoppeling (feedback) bevatte, elementen waarvan we tegenwoordig weten dat ze een sleutelrol spe-

len in het ontstaan van allerlei vormen van complexiteit. Tot de voorbeelden behoren drastische populatieschommelingen in de natuur, al even dramatische schommelingen op de aandelenmarkt en het soort stabiele patronen dat een rol speelt in zwermin intelligentie.

Positieve terugkoppeling is een cyclisch proces dat onder meer verantwoordelijk is voor het gillende geluid dat er tijdens een concert uit de geluidsinstallatie komt als de versterking te hard staat. Het uit de luidsprekers komende geluid wordt opgepikt door de microfoon, die het aan de luidsprekers teruggeeft via een versterker, die het versterkt alvorens het weer naar de luidsprekers terug te sturen, met als resultaat een vicieuze cirkel die het systeem uiteindelijk zodanig overbelast dat het luidruchtig protesteert. R.V. Jones, expert op het gebied van wetenschappelijke methoden voor inlichtingendiensten, nam tijdens de Tweede Wereldoorlog op een afgelegen vliegveldje een prachtig voorbeeld waar. Aan weerszijden van de landingsbaan stonden een microfoon en een luidspreker opgesteld en toevallig lachte er iemand in de buurt van de microfoon. De omroepinstallatie balanceerde op het randje van positieve feedback, en nadat de persoon in kwestie was weggelopen werd het gelach geleidelijk aan versterkt, wat Jones tot de suggestie bracht dat een mens overbodig was geworden nu hier een machine stond die zelfstandig kon lachen.

De kredietcrisis die zich in 2008 begon te ontrollen biedt een minder humoristisch voorbeeld van de effecten van positieve terugkoppeling, die er in dit geval toe leidde dat een gebrek aan vertrouwen in financiële instellingen

werd versterkt en het wereldwijde financiële systeem aan de rand van ineenstorting werd gebracht. Veel individuele financiële instellingen zijn al bezweken onder de door positieve terugkoppeling veroorzaakte druk, die zich manifesteert in de vorm van een stormloop op deze instellingen. Een voorbeeld is de ondergang van de financiële instelling Washington Mutual, op 25 september 2008. Gedurende een periode van tien dagen gingen steeds meer beleggers, toen ze erachter kwamen dat anderen hun geld aan het opnemen waren, in allerijl eveneens hun geld terughalen. Uiteindelijk liep het teruggehaalde bedrag op tot 16,7 miljard dollar.

De inwerking van positieve terugkoppeling op een kleine, toevallige fluctuatie kan er ook toe leiden dat een ogenschijnlijk onbetekenende beginsituatie achteraf het startpunt blijkt te zijn geweest van sterke voorkeuren of modes. Stel bijvoorbeeld dat de meeste van jouw vrienden ofwel een Ford of een Toyota hebben en jij probeert te bepalen welk merk je zal kiezen als het tijd is voor een nieuw auto. Je doet rondvraag en stomtoevallig rijden de eerste drie mensen die je spreekt naar volle tevredenheid in een Ford. En dus koop jij ook een Ford.

31

Jouw aanschaf van een Ford houdt in dat de groep Ford-eigenaren met één persoon is uitgebreid en de kans dat de volgende die zijn oor te luisteren legt Fordbezitters tegenkomt, in plaats van Toyotabezitters, licht is gestegen. Als die persoon eveneens een Ford aanschaf, is de groep Fordbezitters met twee mensen uitgebreid. Het ‘Ford-effect’ versterkt zichzelf en uiteindelijk rijdt het overgrote deel van de groep in een Ford. (Het zou het ‘Toyota-effect’ heb-

ben geheten als jij in het begin verschillende mensen had gesproken die een Toyota hadden.)

Het patroon waarbij iedereen eigenaar is van een Ford (of een Toyota) is het resultaat van de toepassing van een simpele lokale regel (kies het merk auto dat de eerste drie mensen die je tegenkomt hebben en waar ze tevreden over zijn), in combinatie met de inwerking van positieve terugkoppeling op een toevallige fluctuatie (de eerste drie hadden toevallig hetzelfde merk auto).

32 Positieve feedback is niet de enige manier waarop dingen op hol kunnen slaan. Dergelijke effecten kunnen ook voortkomen uit een kettingreactie. Een voorbeeld hiervan zijn de gebeurtenissen die James Thurber beschrijft in ‘The Day the Dam Broke’, dat deel uitmaakt van zijn autobiografie. In eerste instantie in gang gezet door de aanblik van niet meer dan één rennende persoon, sloeg uiteindelijk de voltallige bevolking van de oostkant van de stad Columbus, Ohio op de vlucht voor een niet-bestaande vloedgolf, ondanks geruststellende mededelingen dat er geen reden was voor paniek. Thurber en zijn familieleden bevonden zich in de rennende menigte. ‘De eerste 800 meter,’ schrijft Thurber, ‘werden we door vrijwel iedereen in de stad voorbijgerend.’ Eén in paniek geraakte burger meende achter zich zelfs het geluid te horen van ‘snelstromend water’ dat dichterbij kwam, wat bij nader inzien het geluid van rolschaatsen bleek te zijn.

De paniek ontstond doordat de aanblik van één rennende persoon voor verschillende anderen aanleiding was om ook te gaan rennen, hun aanblik weer enkele anderen tot rennen aanzette, enzovoort. Het proces ging door totdat

iedereen aan het rennen was. Het is hetzelfde proces dat optreedt in een atoombom, waarin bij het uiteenvallen van een atoomkern neutronen vrijkomen met voldoende energie om meerdere nabijgelegen kernen te splijten, die bij hun uiteenvallen op hun beurt voldoende neutronen produceren om verschillende andere kernen te splijten. Het zich voortzettende cascadeproces leidt tot een snelle, exponentiële groei van het aantal neutronen en de hoeveelheid vrijkomende energie, uitmondend in een reusachtige explosie.

In kerncentrales wordt deze kettingreactie in de hand gehouden door cadmiumstaven in het uiteenvallende materiaal te dompelen. De staven absorberen voldoende neutronen om de kettingreactie af te remmen en de energie op een beheerste manier te laten vrijkomen. Een van de belangwekkende ontdekkingen die de complexiteitswetenschap heeft opgeleverd is dat in veel maatschappelijke situaties een soortgelijk stabiliserend effect tot stand kan worden gebracht door negatieve terugkoppeling te introduceren als tegenwicht voor de destabiliserende effecten van kettingreacties en positieve terugkoppeling.* Het resultaat is een complex dynamisch patroon dat zijn eigen inherente stabiliteit heeft, maar ook de mogelijkheid van evolutie en groei in zich draagt.

33

* Om verwarring te voorkomen, dient hier te worden opgemerkt dat natuurwetenschappers de termen positieve en negatieve terugkoppeling op een iets andere manier gebruiken dan psychologen. Voor een psycholoog is negatieve feedback iets destructiefs en destabiliserends, terwijl positieve terugkoppeling goed en wenselijk is. Een natuurwetenschapper ziet het doorgaans andersom.

Negatieve terugkoppeling oefent zijn stabiliserende invloed uit doordat hij de status-quo probeert te bewaren. Een simpel voorbeeld is de toerentalregelaar van een motor, die ervoor zorgt dat, naarmate de motor sneller gaat draaien, de brandstoftoevoer steeds verder wordt afgeknepen, zodat de motor nooit op hol kan slaan.

Negatieve terugkoppeling wordt vaak gebruikt om fouten te 'corrigeren'. Zodra er een fout dreigt binnen te sluipen, zet de afwijking van de status-quo een terugkoppelingsproces in gang om de fout te herstellen. Als je autorijdt, bijvoorbeeld, en iets naar rechts begint uit te wijken, passen je hersenen automatisch negatieve terugkoppeling toe om jou ertoe te bewegen het stuur iets naar links te draaien om je weer op koers te brengen. Positieve terugkoppeling, die kleine effecten steeds verder versterkt, zou jou het stuur naar rechts hebben laten draaien en je nog verder van de ideale lijn hebben gebracht.

In de economie gaat Adam Smiths concept van de onzichtbare hand, dat stelt dat de markt zelfregulerend is en na een verstoring altijd naar een evenwichtstoestand zal terugkeren, uit van het idee dat het instituut markt over ingebouwde negatieve terugkoppeling beschikt. Zoals we verderop zullen zien, erkent de moderne complexiteits-theorie dat dit in de praktijk bij lange na niet het geval is, en dat ons complexe economische systeem wordt geregeerd door een verfijnde balans tussen positieve en negatieve terugkoppeling, met bij tijd en wijle een kettingreactie.

Het uiteindelijke evenwicht wordt bepaald door de regels voor de interactie tussen individuen (de technische term hiervoor is 'gedragsalgoritmen'). Twee van de kern-

problemen bij het doorgronden van het ontstaan van collectieve eigenschappen zoals zwermintelligentie, zijn het blootleggen van de interactiepatronen die individuele dieren (waaronder wijzelf) volgen, en vervolgens ontdekken hoe de informatie-uitwisseling tussen dieren in zijn werk gaat. Een groot deel van dit boek is gewijd aan het eerste probleem en aan de vraag hoe we deze patronen in ons voordeel kunnen laten werken.

Om een groep over collectief aanpassingsvermogen te kunnen laten beschikken (d.w.z. het vermogen van de groep om als één geheel op veranderende omstandigheden te kunnen laten reageren), zijn niet-lineaire regels alleen doorgaans niet voldoende. De complexiteitstheoretici John Miller en Scott Page geven een lijst met in totaal acht criteria voor collectief aanpassingsvermogen, die losjes maar respectvol gebaseerd is op het achtvoudige pad van het boeddhisme:

35

Juiste zienswijze De individuen in een groep (door complexiteitswetenschappers ‘agents’ of actoren genoemd) moeten in staat zijn informatie te ontvangen en te interpreteren die afkomstig is van andere individuen in de groep en de wereld in het algemeen.

Juiste intentie De actoren moeten een of ander doel hebben dat ze willen bereiken. Vissen kunnen bijvoorbeeld willen vermijden dat ze worden opgegeten, terwijl mensen mogelijk collectief in actie willen komen om een politieke verandering te bewerkstelligen.

Juist spreken Actoren moeten in staat zijn om informatie over te dragen en te ontvangen. Spraak in de gangbare zin des woords is hiervoor niet vereist. De individuele cellen van de slijmschimmel *Dictyostelium discoideum*, bijvoorbeeld, communiceren via chemische boodschappen, terwijl de neuronen in onze hersenen dat via elektrische impulsen doen.

Juist handelen Actoren moeten op de een of andere manier in staat zijn de handelingen van naburige actoren te beïnvloeden.

36 **Juiste afrekening** Actoren moeten op de een of andere manier beloond worden voor hun handelingen binnen de groep, zoals bijvoorbeeld een salaris voor een uitgeoefende taak of de dreiging van een straf (bijvoorbeeld ontslag) als de taak niet wordt uitgevoerd.

Juiste inspanning Actoren hebben strategieën nodig die ze kunnen gebruiken terwijl ze op de handelingen van anderen anticiperen en reageren.

Juiste opmerkzaamheid Er zijn tal van soorten en niveaus van rationaliteit. Onze taak als actoren in een complexe samenleving is van elke soort het juiste niveau te kiezen en te gebruiken.

Juiste concentratie Om te kunnen begrijpen hoe complexiteit ontstaat, moeten we soms terugkeren naar de oude wetenschappelijke aanpak waarbij je op één of twee

belangrijke processen concentreert en de overige tijdelijk negeert.

Al deze criteria komen op de hierna volgende pagina's aan de orde, zij het soms in een heel andere samenhang. Juiste opmerkzaamheid, bijvoorbeeld, behelst de mate van detail die we nodig hebben om goede individuele beslissingen te kunnen nemen en tevens de manieren van denken die we moeten omarmen om als groep tot consensus te kunnen komen.

Virtuele werelden

Om te kunnen begrijpen hoe deze criteria onze gedragskeuzes in complexe situaties beïnvloeden, zullen we in veel gevallen onze toevlucht moeten nemen tot computermodel-
len. Zonder dat soort simulaties kan het voorspellen van de consequenties van die keuzes vrijwel onmogelijk zijn, zowel om praktische als ethische redenen.

37

Eén praktische reden is dat de menselijke geest simpelweg niet in staat is alle variaties en variabiliteit te bevatten die inherent zijn aan complexe adaptieve systemen. Dit verklaart waarom de wetenschap in het verleden vrijwel uitsluitend vooruitgang heeft geboekt door met sterke simplificaties te werken die ons in staat stellen de essentie van een probleem bloot te leggen. Zelfs als we het hebben over de bewegingen die de zon, de aarde en de maan ten opzichte van elkaar maken, kunnen we de baan die elk tweetal om elkaar beschrijft slechts berekenen door de effecten van het derde hemellichaam

te negeren. Een exacte berekening van de drie tezamen (ook wel bekend als het ‘drielielamenprobleem’) gaat onze analytische vermogens te boven, waardoor we zelfs voor een zo goed mogelijke benadering al zijn aangewezen op computersimulaties.

De logistische vergelijking

Hoewel de onderstaande vergelijking op het eerste gezicht ongelooflijk simpel lijkt, heeft ze waarschijnlijk meer wiskundigen tot wanhoop gedreven dan welke andere vergelijking in de geschiedenis ook.

Hij werd voor het eerst toegepast op populatiegroei. Als een populatie van p individuen onbeperkt kan groeien, en dat met een constante snelheid r doet, kunnen we simpelweg schrijven:

$$p_{\text{huidig}} = r \times p_{\text{vorig}}$$

Als de populatie bijvoorbeeld met 3 procent per jaar toenam, en de populatie elk jaar op dezelfde datum werd gemeten, zou de waarde van r 1,03 zijn.

Dit wordt exponentiële groei genoemd en het is volstrekt duidelijk dat onze planeet die niet eeuwig in stand kan houden. Wat voor aanpassingen we ook doen, er moet een bovengrens zijn. Laten we de grootste populatie die de aarde in stand zou kunnen houden K noemen en het slimme idee van de Belgische wiskundige Pierre Verhulst overnemen, die in 1883 met een simpele vergelijking kwam om de manier te beschrijven waarop de

Interacties binnen de samenleving zijn nog complexer, en pas sinds de opkomst van krachtige computers zijn we in staat modellen door te laten rekenen die laten zien hoe uit eenvoud complexiteit kan ontstaan. Dit soort modellen wordt inmiddels gebruikt om inzicht te krijgen in het

populatiegroei wel moet afremmen als hij de bovengrens nadert en zelfs negatief moet worden als hij die grens doorbreekt.

Verhulsts vergelijking, de logistische vergelijking, luidt:

$$p_{\text{huidig}} = r \times p_{\text{vorig}} \left((K - p_{\text{vorig}}) / K \right)$$

Deze simpel ogende vergelijking (merk op dat hij niet-lineair is, aangezien p_{vorig} met zichzelf wordt vermenigvuldigd) heeft een aantal bepaald opmerkelijke inzichten opgeleverd. Als je echt een hekel hebt aan algebra, sla dan de twee volgende paragrafen over, maar lees wel de daaropvolgende alinea's.

Op het eerste gezicht ziet de vergelijking er heel keurig uit. Als populaties ver van hun bovengrens verwijderd zijn, is p_{vorig} veel kleiner dan K en vereenvoudigt de vergelijking zich tot de vergelijking voor exponentiële groei. Naarmate populaties hun bovengrens naderen, vlakkt de groei af doordat $(K - p_{\text{vorig}})$ steeds dichterbij nul komt te liggen.

Deze functie geeft een keurige beschrijving van de groei van bacteriën in een petrischaal en algen in een vijver (mits er geen tekort aan voedsel of licht ontstaat). Als je een grafiek tekent van het populatietotaal als

gedrag van menigten, netwerken en andere aspecten van onze complexe samenleving. (Met name bij onderzoek naar gedrag van menigten zijn experimenten op ethische gronden veelal uitgesloten, zeker als een experiment zou betekenen dat je individuen in gevaarlijke situaties brengt.)

functie van de tijd, komt die eruit te zien als een klassieke S-curve, met exponentiële groei aan het begin en, gesteld dat de groeisnelheid niet te hoog is, na verloop van tijd een asymptotisch plateau.

Alles blijft normaal totdat we een verdrievoudiging van de groeisnelheid tegenkomen ($r = 3$) en zich vreemde dingen beginnen voor te doen. De soepele bevolkingsgroeicurve valt uiteen in heen en weer gaande bewegingen tussen twee waarden die overeenkomen met plotselinge bloei en neergang. Tegen de tijd dat de groeisnelheid de waarde 3,4495 bereikt, springt de curve heen en weer tussen vier waarden. Als de groeisnelheid 3,596 bereikt, zijn er zestien toestanden waartussen het bevolkingsaantal in hoog tempo heen en weer springt. Iets daarboven ontstaat totale chaos.

De wiskunde van bloei en neergang biedt een accurate beschrijving van tal van gebeurtenissen die zich in de werkelijke wereld voordoen. Helaas maakt dit ze niet altijd simpeler te voorspellen (zoals de geschiedenis van de kredietcrisis van 2008 laat zien), deels als gevolg van het feit dat het model altijd een vereenvoudiging is van de werkelijkheid, maar ook doordat het gedrag van het systeem heel gevoelig kan zijn voor de precieze omstandigheden.

De modellen komen aardig overeen met die van spellen als *Tomb Raider*, waarin virtuele individuen specifieke gedragsregels krijgen opgelegd. In de wereld der complexiteitswetenschap is echter geen sprake van een externe speler die bepaalt wat er vervolgens gebeurt. In plaats daarvan worden de virtuele individuen, slechts gewapend met regels voor hun interactie, losgelaten in de virtuele wereld en kijkt de maker toe om te zien wat er gebeurt.

De regels zouden bijvoorbeeld veronderstellingen kunnen zijn over de manier waarop mensen in een menigte op elkaar reageren, waarbij de uitkomst het gedrag is van de menigte als de individuen zich aan deze regels houden. Door de regels te verfijnen kan de maker met redelijke voorstellen komen voor de productiefste manier waarop individuen zich in menigten gedragen, en ook met suggesties voor de beste inrichting van omgevingen waar massa's kunnen samenkomen, zoals de straten van steden, stadions en nachtclubs.

41

Een andere toepassing van computerprogramma's is het nabootsen van de manier waarop sociale dieren (met name insecten) zwermintelligentie gebruiken voor het oplossen van problemen. Een zwerm virtuele individuen wordt losgelaten in de kunstmatige computeromgeving, maar ditmaal is de omgeving zo ontworpen dat hij een afspiegeling is van het op te lossen probleem. De individuen zouden bijvoorbeeld als taak kunnen krijgen de snelste routes te vinden door een netwerk dat het stratenpatroon van een stad of de structuur van een telecommunicatienetwerk imiteert. Verbazingwekkend genoeg zijn de oplossingen waarmee de zwerm komt vaak beter dan oplossingen die met de meest

geavanceerde wiskunde zijn geproduceerd.

Al deze toepassingen van computerprogramma's, wetenschappelijke regels en lessen uit het dierenrijk komen op de volgende pagina's aan de orde. We beginnen met de lessen die we kunnen leren van treksprinkhanen, bijen en mieren. Elk van deze dieren gebruikt weer een iets andere vorm van zwermintelligentie en elk van hun benaderingen heeft ons weer iets anders te zeggen over groepsgewijs probleemoplossen binnen onze eigen wereld.

Moet je bij gevaar de groep volgen of juist niet?

**Wat is de makkelijkste manier
om een hype te starten?**

**Hoe kun je een groep mensen ergens naartoe leiden,
ook zonder dat ze het doorhebben?**

**Welke vuistregel helpt je het beste koopje
te vinden op de rommelmarkt?**

**En hoe kun je in één oogopslag zien
of er met gegevens is geknoeid?**

Het antwoord op dit soort vragen kan gevonden worden door gebruik te maken van zwermintelligentie, het proces waarmee ook bijen, mieren en sprinkhanen de meest ingewikkelde uitdagingen oplossen. **Len Fisher**, auteur van de bestsellers

'Rock, Paper, Scissors' en 'How to Dunk a Donut', laat aan de hand van heldere inzichten en humorvolle anekdotes zien hoe zwermgedrag precies werkt, welke regels hiervoor gelden en hoe je deze kennis kunt toepassen in het dagelijks leven.

**'Fisher springt met souplesse van sprinkhanen naar voetgangers
naar computer-algoritmes naar beurskoersen.'**
PSYCHOLOGY TODAY

**'een compact boek [...] over een gigantisch onderwerp.
Zwermintelligentie levert een waardevolle bijdrage.'**
NATURE

MAVEN
PUBLISHING
mavenpublishing.nl



Zwermwet #10:
**Kies tijdens het autorijden altijd voor de route
met zoveel mogelijk afslagen naar rechts.**