

## Onderzoek van Zelforganisatie als Onderzoek van Complexiteit: enige (Methodo)logische aantekeningen

Cor van Dijkum,  
Vakgroep Methodenleer en statistiek  
Faculteit Sociale Wetenschappen  
Universiteit van Utrecht  
email: c.vandijkum@fsw.ruu.nl

### Inleiding

In de geschiedenis van de natuur- en menswetenschappen zijn er altijd onderzoekers geweest die trachten over de grenzen van hun eigen discipline heen te kijken, zich inleefden in de denkwijze van onderzoekers uit een andere disciplines, om samen verder te komen dan elke discipline afzonderlijk. Er zijn mooie voorbeelden bekend van het soort wetenschappelijke kennis dat dergelijk horizonverruiming oplevert en het lijkt er tegenwoordig zelfs op dat dergelijke ondernemingen onontbeerlijk voor de moderne wetenschapsbeoefening. In dit artikel ga ik in op de wijze waarop sociale wetenschappers trachten over de grenzen van hun eigen discipline heen te kijken, zich begeven in de fascinerende gedachtenwereld van de cybernetica en de systeemtheorie, om zo het sturingsvraagstuk van sociale systemen op een interdisciplinaire wijze aan te pakken. De naam voor dat vakgebied dat zo wordt ontsloten is de socio-cybernetica.

Er is veel door socio-cybernetici gepubliceerd dat de moeite waard is. In dit artikel concentreer ik mij op uiteenzettingen die de afgelopen jaren plaats hebben gevonden over het vraagstuk van de (zelf)organisatie en (zelf)sturing van sociale systemen. De lezer zal merken dat ik mij op dit frontgebied van de socio-cybernetica kritisch op stel, niet om te laten zien wat er allemaal fout gaat, maar om een weg te wijzen waarmee het onderzoek van zelforganisatie met meer succes kan worden aangepakt. Ik doe namelijk het voorstel het onderzoek naar zelforganisatie te transformeren naar onderzoek van complexiteit. Zo kan aangesloten worden bij het onderzoeksprogramma in de natuurwetenschappen naar complexiteit.

In deze uiteenzetting zal ik om meer interdisciplinariteit vragen dan gebruikelijk is in socio-cybernetische kringen. De globale omschrijving van het begrip complexiteit gebruik ik als startpunt voor een uiteenzetting van wiskundige, filosofische, en wetenschapstheoretische aard. Zo leg ik de basis leg voor de stelling dat onderzoek van zelforganisatie kan worden uitgevoerd als onderzoek van complexiteit.

### Een globale omschrijving van complexiteit: een begin

De vraag wat complexiteit inhoudt kan om te beginnen eenvoudig worden beantwoord met behulp van een woordenboek. In het Prisma Woordenboek (Weijnen 1974) vindt men dat complex betekent "een samengesteld geheel". Dat is de omschrijving die evident is en waarmee iedere taalgebruiker min of meer uit de voeten kan. Ook onderzoekers zullen vanuit hun taalgevoel en gezond verstand snel stellen dat een complex geheel een ingewikkeld geheel is, wat zich daardoor wat minder gemakkelijk op een eenvoudige wijze laat onderzoeken. Methodologen, zoals ik, maken zich dan druk om de vraag hoe dat minder eenvoudige er uit ziet en welke onderzoeksmethoden adequaat zijn om complexiteit als "samengesteld geheel" tot zijn recht te laten komen. Onderzoekers die hopen dat het minder eenvoudige toch eenvoudig is, stellen dat er meerdere variabelen zijn en dat het vooral de kunst is de samenhang tussen deze variabelen op het spoor te komen, bijvoorbeeld door multivariate analyse te gebruiken. De statistiek geeft dan de mogelijkheid de onzekerheid en het toeval uit te drukken die de onderzoeker ondervindt in zijn poging zo de complexiteit tot uitdrukking te brengen.

Maar er komt ook een discussie naar voren die historisch gesproken vanuit de systeemtheorie is aangezwengeld. Het gaat om de discussie wat een samengesteld geheel is. Wordt met de gangbare methoden en technieken dat geheel uitgedrukt? En is het geheel eigenlijk niet "meer dan de som der delen"? Op die vraag gaan moderne methodologen in door te verwijzen naar kwalitatieve methoden, als bijvoorbeeld probleemanalyse, participerende

observatie, inductieve theorievorming, en kwantitatieve technieken, als bijvoorbeeld multivariate analyse, lisrel en multi-level analyse. Veel vragen zijn dan echter nog niet beantwoord en onderzoekers hebben aan het onderzoek van complexiteit nog steeds een hele opgave.

De omschrijving wordt zeker minder eenvoudig, om niet te zeggen paradoxaal, als men kijkt naar het moderne complexiteitsonderzoek in de natuurwetenschappen. Dat wordt duidelijk bij beschouwing van de gangbare definities in dat onderzoek van complexiteit. Neem bijvoorbeeld de definitie van David Griffeth.

*A complex system is an evolution generated by simple mathematical rules or physical principles that exhibits complicated, unpredictable behavior*  
(Statistical Science, Volume 7, no. 1, 1992, p. 104)

Het gaat om een systeem dat wordt voorgesteld als een ontwikkeling. Het is blijkbaar belangrijk in deze visie aan te geven dat een complex systeem niet eenvoudig kan worden voorgesteld als een statische verzameling van samenhangende variabelen. Ook de samenhang ontwikkelt zich en is niet te zien als een constante. Zo wordt tegemoet gekomen aan het idee van systeemtheoretici dat het geheel meer is als de som der delen. En zo wordt ook de pas afgesneden voor onderzoekers die graag zouden willen dat hun factoranalyse of andere bijzonder ingewikkelde multivariate (desnoods niet-lineaire) analyse dergelijke complexiteit afdoende kan uitdrukken.

Er is nog meer aan de hand. Een complexe systeem kan worden voortgebracht door eenvoudige mathematische regels die uitgedrukt kunnen worden in een eenvoudig algoritme maar desondanks leiden tot onvoorspelbare uitkomsten. Hoe is dat nu mogelijk? Want houdt juist een algoritme niet in dat iets 100% controleerbaar is, dat herhaling van de berekening steeds leidt tot dezelfde uitkomst<sup>1</sup>, en de resultaten dus 100 % voorspelbaar (moeten) zijn? Wordt dan zelfs mijn zakrekenmachine op die manier niet tot een onbetrouwbaar instrument? Moet ik dan concluderen dat het niet ligt aan de fabrikant dat de uitkomsten verschillen maar aan het algoritme? Het wordt tijd voor voorbeelden.

### Simpele regels leiden tot onvoorspelbare uitkomsten:

Laten wij beginnen met eenvoudige wiskundige regels ofwel een simpel algoritme waarmee de bevolkingsgroei kan worden uitgerekend. Dat kan uitgerekend worden als: Bevolking (in jaar  $n+1$ ) = Bevolking (in jaar  $n$ ) + geboorten - sterften = Bevolking (in jaar  $n$ ) \* (geboortepercentage - sterftepercentage). Drukt dat men uit als een differentie-vergelijking per jaar ( $\Delta t$ ), dan wordt het:

$$b_{n+1} = b_n * (1 - a)$$

$$\Delta b / \Delta t = b_n * a$$

Waarbij  $a$  = geboortepercentage-sterftepercentage en  $b$  uiteraard de bevolking voorstelt. Men kan daar een differentiaalvergelijking van maken door  $\Delta t \rightarrow 0$ . De analytische te bepalen oplossing voor deze differentiaalvergelijking is:

$$b = e^{t * (1 - a)} * b(\text{in beginjaar})$$

Tot zover is er nog niets aan de hand. De uitkomst van dit algoritme voor het bereken van de bevolkingsgroei is analytisch te bepalen en perfect te voorspellen. Maar stel dat wij het iets minder simpel maken zoals de demograaf Verhulst (1840) dat deed. Hij redeneerde over de mogelijkheid dat het groeipercentage (geboortepercentage-sterftepercentage) werd beperkt door de schaarsheid aan bestaansmiddelen, oftewel dat het groeipercentage afhangt van de bevolkingsgrootte. Stelt men daarbij de maximale bevolkingsgrootte op 1 (dus  $b(\text{maximaal})=1$ ) dan kan men dat op de meest simpele manier uitdrukken als:

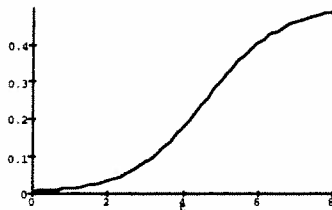
$$Db/Dt = b * (1 - b) * r$$

<sup>1</sup>Dezelde rekenmachine zal steeds dezelfde chaotische uitkomsten produceren, maar afhankelijk van de precisie van de hard- en software kunnen de uitkomsten verschillen.

Is deze vergelijking analytisch oplosbaar? Wie er de tekstboeken (Cullen 1996 b.v.) op naleest zal de oplossing kunnen terugvinden als:

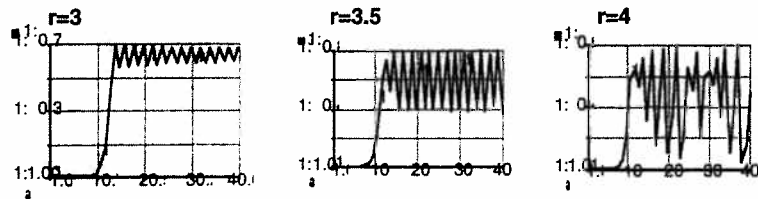
$$\frac{b_0}{b_0 + (1 - b_0) * e^{-rt}}$$

Als men een dergelijke functie plot ( $0 < b_0 < 1$ ) krijgt men de volgende grafiek:



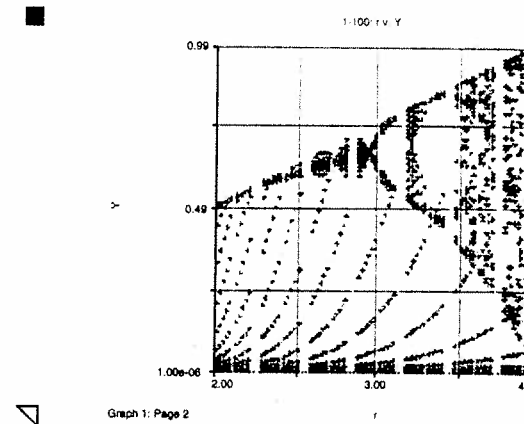
Figuur 1: grafiek van geremde groei

Het is een functie die bekend is als de logistische groeicurve en betekent voor biologen, epidemiologen, economen, psychologen en sociologen een mooie mogelijkheid de groei die geremd wordt door beperkende factoren ordentelijk en voorspelbaar te beschrijven. Maar is de differentievergelijking of de daaruit af te leiden differentiaalvergelijking altijd zo ordentelijk te bepalen? Daarop moet het antwoord ontkennend luiden. En dat is het begin van een onderzoeksprogramma in de wiskunde naar onvoorspelbaarheid en complexiteit. Omdat de weg tot een analytische oplossing voor dit soort vergelijkingen nogal moeilijk begaanbaar en zelfs soms principieel onmogelijk hebben wiskundigen het nuttig gevonden de oplossingsstrategie te zoeken via de weg van de numerieke wiskunde en als daarbij de computer wordt ingeschakeld (hetgeen in de moderne wiskunde al eigenlijk onontbeerlijk is) via computersimulatie. Stel dat men daarbij met verschillende waarden van



Figuur 2, 3 en 4: uitkomsten voor de logistische differentiaalvergelijking bij verschillende a.

r gaat werken. Er is dan uit de grafieken af te leiden hoe regelmatig de uitkomsten van de differentiaalvergelijkingen zijn (zie figuren 2,3 en 4). Het is duidelijk dat voor  $r = 3$  er niet een uitkomst is, maar blijkbaar 2 waarden mogelijk zijn. Dat is nog te volgen en zou in termen van voorspelbaarheid betekenen dat afwisselend de ene en daarna de andere waarde voor komt. Bij  $r = 3.5$  wordt het iets ingewikkelder. Maar ook daar zou men kunnen volhouden dat er een aantal mogelijke waarden zijn en dat die elkaar afwisselen. Maar bij  $r = 3.9$  wordt het principieler. Het is dan namelijk niet mogelijk te zeggen dat er een overzienbaar aantal waarden de uitkomst zijn van de differentiaalvergelijking. Er zijn blijkbaar een willekeurig aantal waarden mogelijk, het aantal dat verschilt is willekeurig groot. Deze verrassende uitkomsten van het algoritme is ook nog op een andere manier uit te drukken. Men kan namelijk een plot maken waarbij de uitkomsten voor variërende r worden aangegeven. Het resultaat daarvan ziet men in figuur 5.



Figuur 5: de logistische functie voor verschillende r.

Uit deze grafiek maar uiteraard vooral op de daarop volgende exacte redeneringen blijkt dat er geen eenduidige uitkomst is van de logistische functie. In bepaalde gebieden is er geen eenduidige uitkomst, c.q. voorspelling mogelijk van die uitkomst. Oftewel:

- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| $1 < r \leq 3$              | één curve                |
| $3 < r \leq 3.449499$       | heen en weer springend   |
| $3.449499 < r \leq 3.54090$ | viercyclus               |
| $3.54090 < r \leq 3.564407$ | achtcyclus               |
| $r > 3.6692016$             | chaos plus periodiciteit |

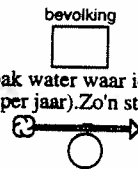
Vooraf bij de waarde  $r > 3.6692016$  wordt de uitkomst onoverzichtelijk. Er zijn dan tussen bepaalde waarden een willekeurig groot aantal uitkomsten mogelijk, of als men dat anders wil zeggen een oneindig aantal uitkomsten mogelijk. Dat houdt in dat er in die zin geen voorspelling meer mogelijk is. Afhankelijk van de nauwkeurigheid van de computer en de te gebruiken software kan men op elke mogelijke waarde tussen twee al reeds gevonden waarden terecht komen. Zoals de definitie van David Griffeath laat zien kan dit resultaat worden begrepen in het kader van de complexiteitstheorie.

**Software en hardware als hulpmiddel**

Met bovengenoemde differentiaalvergelijkingen kan men eigenlijk alleen maar werken als men de computer gebruikt. Programmeertalen als Basic, Pascal, C, Simula, Dynamo (specifiek toegespitst op differentie-vergelijkingen) en meer op wiskundige formules gerichte software zoals Maple, Mathematica, ODE maken het wiskundigen mogelijk hun onderzoek van niet analytisch oplosbare differentiaalvergelijkingen met succes aan te pakken. Wiskundig minder onderlegde onderzoekers kunnen inmiddels gebruik maken van software die veel minder wiskundige kennis veronderstelt. Onderzoekers van het MIT zoals Forrester, Meadows en Richardson hebben deze software ontwikkeld op basis van de simulatie programmeertaal Dynamo voor hun interdisciplinaire aanpak van sociale problemen. Met behulp daarvan (b.v. Stella of Powersim) is een volgende stap in ons onderzoek van zelforganisatie ook voor minder wiskundige onderlegde leken gemakkelijk te volgen.

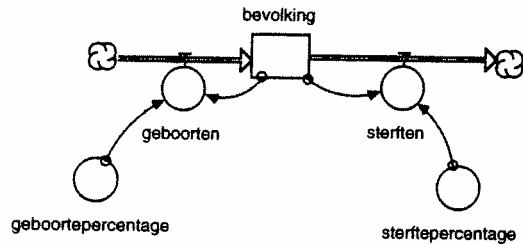
Ter voorbereiding van die stap. Hoe wordt met behulp van Stella de eerder behandelde differentiaalvergelijking die slaat op bevolkingsgroei aangepakt? Allereerst kan men in Stella werken met grafische symbolen die een toestand voorstelt werken. De omvang van een

bevolking in een bepaald jaar is zo'n toestand. Dat wordt dan voorgesteld door het volgende symbool:



Men kan zich dat voorstellen als een bak water waar iets instroomt (aantal geboorten per jaar) en iets uitstroomt (aantal sterfgevallen per jaar). Zo'n stroom wordt voorgesteld door:

Verder zijn er nog wat symbolen die (hulp)variabelen voorstellen en symbolen die de afhankelijkheid van de ene variabele van de andere variabele voorstellen. Vervolgens brengt men de verbale redeneringen die men hanteert als men het over bevolkingsgroei heeft in kaart. Allereerst met een verbale beschrijving. Een bevolking groeit in omvang, of neemt af, door geboorten en sterften. Het aantal kinderen dat geboren wordt is evenredig met de omvang van de bevolking en het geboortepercentage. Evenzo is het aantal mensen dat sterft afhankelijk van het sterftepercentage en de omvang van de bevolking. In Stella bouwt men dan het volgende diagram:

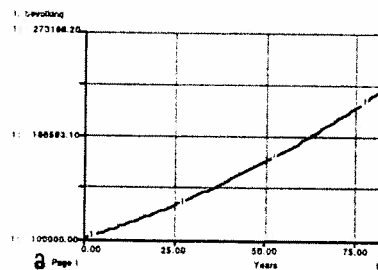


Figuur 6: Bevolkingsgroei in Stella

De bijbehorende differentiaalvergelijkingen kan men ook afleiden. Stella geeft ze echter kado:

$bevolking(t) = bevolking(t - dt) + (geboorten - sterften) * dt$   
 INIT bevolking = 100000  
 INFLOWS:  
 geboorten = geboortepercentage\*bevolking  
 OUTFLOWS:  
 sterften = sterftepercentage\*bevolking  
 geboortepercentage = 0.03  
 sterftepercentage = 0.02

Stella geeft de oplossing, c.q. de output van dit systeem van vergelijkingen grafisch weer:



Figuur 7 Bevolkingsgroei in een grafiek

Duidelijk te zien is dat de oplossing van deze lineaire differentiaalvergelijking een niet lineaire functie van de tijd is.

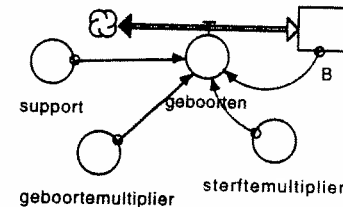
### Niet-lineaire differentiaalvergelijkingen

De volgende stap in ons onderzoek van zelforganisatie is de simulatie van de logistische vergelijkingen. Hierbij hangt de groei (geboorten-sterften) af van de bevolkingsomvang (B), bijvoorbeeld omdat men beredeneert dat het milieu maar tot een bepaalde grens een populatie kan ondersteunen. Houdt dat simpel en stel dat er een maximum omvang (support) is die het milieu kan ondersteunen, zodat men tenslotte kan schrijven voor tijdstip  $\Delta t$  :

$$\Delta B = \text{geboortemultiplier} * B * (\text{support} - B) - B * \text{sterftemultiplier}$$

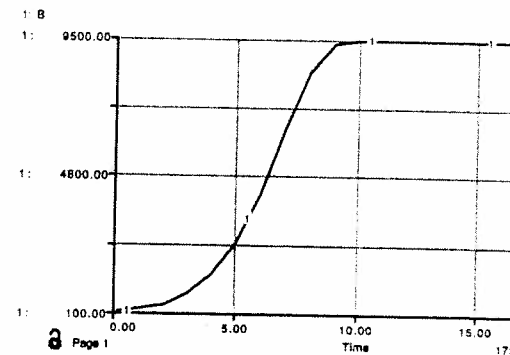
Een dergelijke redenering kan men makkelijk in Stella kwijt, omdat immers:

$$\Delta B / \Delta t = \text{geboortemultiplier} * B * (\text{support} - B) - B * \text{sterftemultiplier}$$



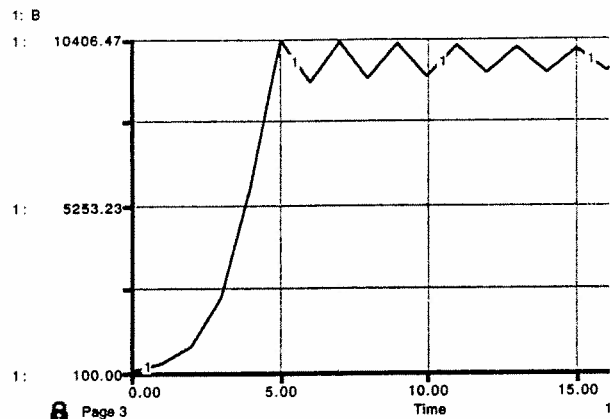
Figuur 8: Geremde groei in Stella

Men vult nu in: sterftemultiplier=0.05; geboortemultiplier=0.0001; beginwaarde B=100; support=10000. De volgende grafiek geeft het bekende resultaat van de verzadigde groei:



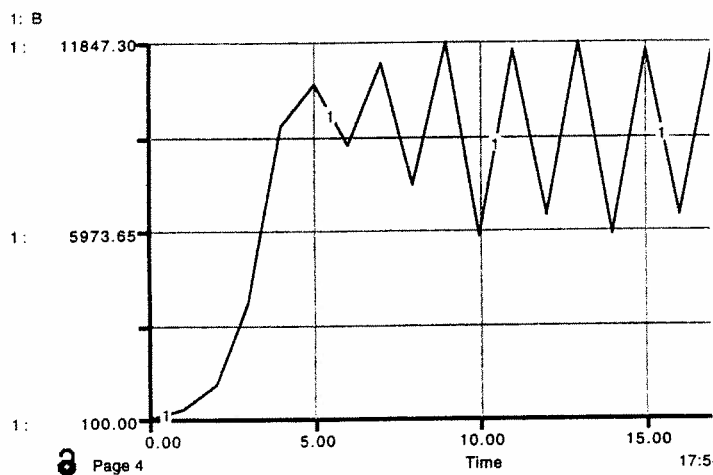
Figuur 9: Geremde groei in een grafiek

Maar wat gebeurt er wanneer men de geboortemultiplier vergroot? Bijvoorbeeld: geboortemultiplier = 0.0002.



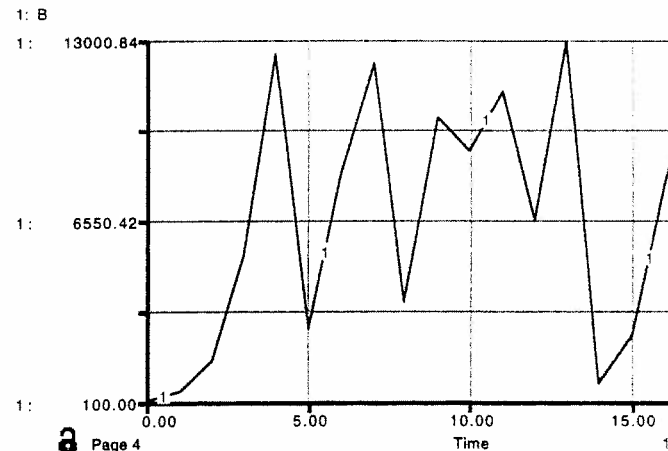
Figuur 10: Geremde groei in oscillatie-een twee periode

De uitkomst wordt minder regelmatig. Het lijkt erop dat er twee mogelijke uitkomsten zijn. Wij experimenteren verder. Nu: geboortemultiplier = 0.00025.



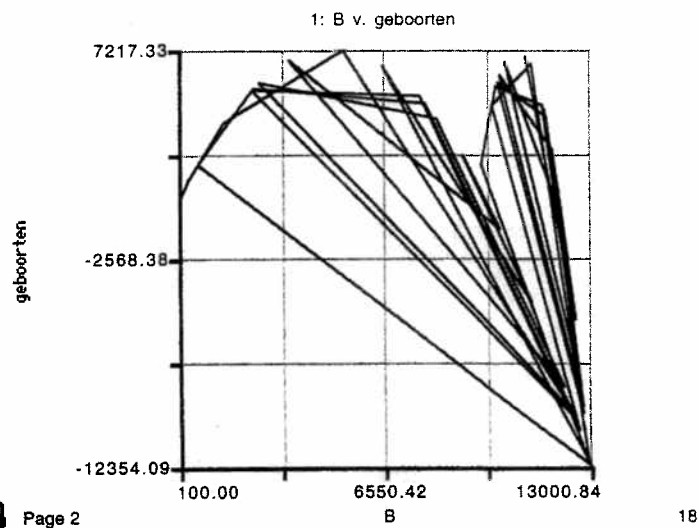
Figuur 11: Geremde groei in een vier periode ?

De onregelmatigheid wordt nog groter. Het lijkt er op dat er 4 mogelijke waarden zijn. Wij gaan verder. Wat gebeurt er bij: geboortemultiplier = 0.0003?



Figuur 12: Geremde groei in oscillatie: periodes?

Op de uitkomst valt nog weinig peil te trekken. Het lijkt erop dat de uitkomst tamelijk willekeurig wordt. Om daar een ander zicht op te krijgen kan men een zogenaamd faseplaatje bekijken. B wordt tegen zijn differentiaal (geboorten) afgezet.



Figuur 13: Fase diagram geremde groei

Hier is ook duidelijk dat de waarden nogal lukraak variëren. Het is leerzaam dit soort processen ook zelf stap voor stap te berekenen, bijvoorbeeld met hulp van een spreadsheet, maar

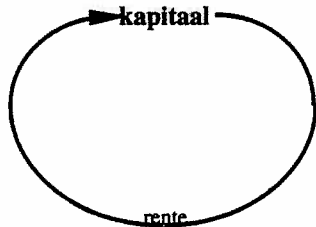
misschien ook om het zelf te programmeren (zie voor beiden: Dijkum 1993). Daarbij kan men de logistische vergelijking vereenvoudigen door de grootte van de populatie te standaardiseren tussen 0 en 1. Men houdt dan de volgende vergelijking over:

$$dB/dt = B*(1-B)*a$$

Om een goed zicht te krijgen op wat er eigenlijk aan de hand is kan men het eerder getoonde bifurcatiediagram (figuur 5) bekijken.

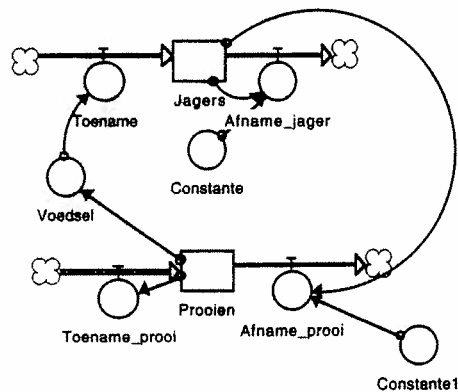
**Een model van zelforganisatie.**

Deze oefeningen in niet-lineaire modellen zijn bedoeld als opstap voor een model van zelforganisatie. Wij volgen daarbij Prigogine (1977,1980). Laat ons in eerste instantie bekijken welke begrippen hij gebruikt om de weg naar het begrip zelforganisatie te effenen. Allereerst het begrip *Autokatalyse*. Men kan dat begrip goed illustreren met het voorbeeld van de kapitaalgroei. Het verband tussen kapitaal en rente kan men zien als een oorzaak-gevolg terugkoppeling op de variabele kapitaal. Dat is verbeeld in het onderstaande diagram:



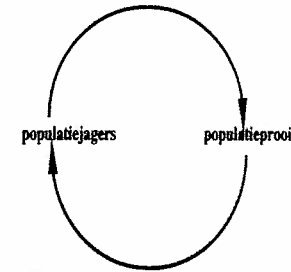
Figuur 14 Autokatalyse van kapitaal en rente

Autokatalyse slaat dus op *recursieve causaliteit* met een positieve terugkoppeling. Het Stelladiagram wat daarbij hoort bevat één toestandsvariabele en één instroom. *Autoinhibitie* slaat op recursieve causaliteit met een negatieve terugkoppeling. Bij *kruiskatalyse*, beïnvloedt de ene variabele de andere variabele, en omgekeerd. Daarbij hoort een Stella-diagram met twee toestandsvariabelen, met in- en uitstromen. Een voorbeeld is het prooi-jager model van Lotka-Volterra.



Figuur 15 Kruiskatalyse van jager en prooi

De *kruiskatalyse* tussen de populatie van jagers en prooien kan men in het volgende oorzaak-gevolg diagram verbeeld zien:

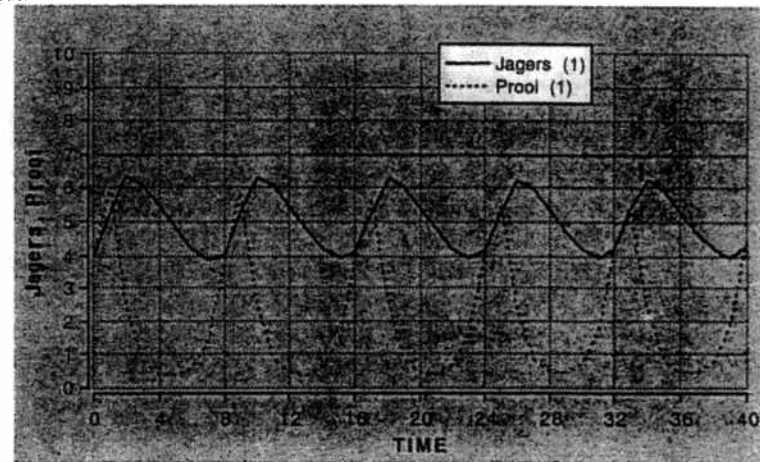


Figuur 16 Causaliteit kruiskatalyse

Deze recursieve oorzaak-gevolg relatie gaat, zoals Stella laat zien, gepaard met twee lineaire differentiaalvergelijkingen die aan elkaar zijn gekoppeld. Een voorbeeld van zo'n systeem is:

```
Jagers(t) = Jagers(t - dt) + (GroeiJagers) * dt
GroeiJagers = Jagers*GroeiPercentageJagers+(Jagers*Prooi*8/100)
Prooi(t) = Prooi(t - dt) + (GroeiProoi) * dt
GroeiProoi = GroeiPercentageProoi *Prooi-(Jagers*Prooi*9/10)
GroeiPercentageJagers = -0.16
GroeiPercentageProoi = 4.5
INIT Prooi = 4
INIT Jagers = 4
```

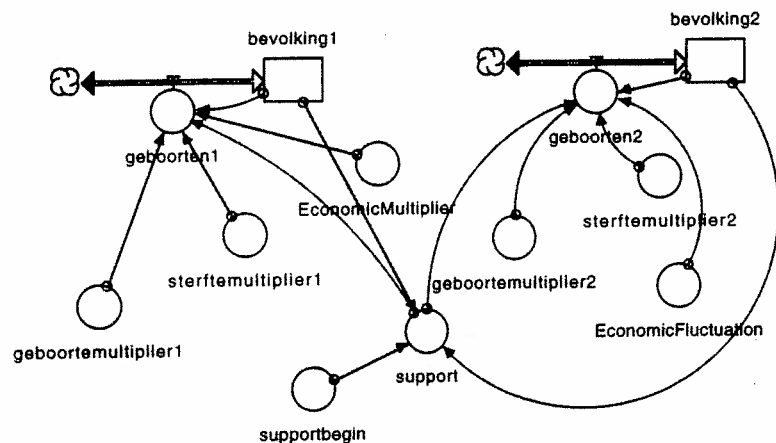
Dit vergelijkingensysteem staat bekend als het Lotka-Volterra model. Het gaat om een niet lineaire differentiaalvergelijkingen die niet uit te drukken zijn in elementaire functies zoals e-machten en sinusfuncties waarmee (homogene) lineaire differentiaalvergelijkingen op te lossen zijn. Numerieke benadering van de oplossing leidt tot de volgende grafisch af te beelden output:



Figuur 17 Grafiek Lotka-Volterra model

Met deze kruiscatalyse zit men nog niet in een traject van zelforganisatie. Daarvoor is meer nodig, bijvoorbeeld dat men het systeem uit evenwicht brengt door de introductie van niet-lineaire verstoringen. Pas in dit soort situaties kan het systeem zo instabiel worden dat er een lawine van mogelijke oplossingen optreedt. Dan is het begrip *bifurcatie* van toepassing. Die situatie is eerder geïllustreerd met de logistische curve.

Met behulp van de zo omschreven begrippen kunnen wij naar het volgende experiment kijken. Wij gaan uit van twee populaties die beiden gebruik moeten maken van de hulpmiddelen van een ondersteunend milieu. De geboortemultiplier van de eerste populatie is hoger dan van de tweede populatie, zodat verwacht kan worden dat de eerste populatie domineert. Daarnaast gaan de populaties echter verschillend om met het milieu. De eerste populatie is wat dat betreft stabiel en spreekt het milieu steeds met dezelfde efficiëntie aan. De tweede populatie experimenteert meer, zij varieert in haar efficiëntieaanspraak op het milieu. Daarvoor wordt een randomvariatie geïntroduceerd. Een dergelijke situatie kan men in het volgende Stellamodel programmeren.



Figuur 18 Bevolkingsgroei bij schaarse middelen en onderlinge concurrentie

Nu wordt het experiment dat men de eerste populatie een zodanig hoog geboortemultiplier geeft dat zij in een instabiel en chaotisch gebied terechtkomt. De vergelijkingen en de invulling van parameters zou dan kunnen zijn:

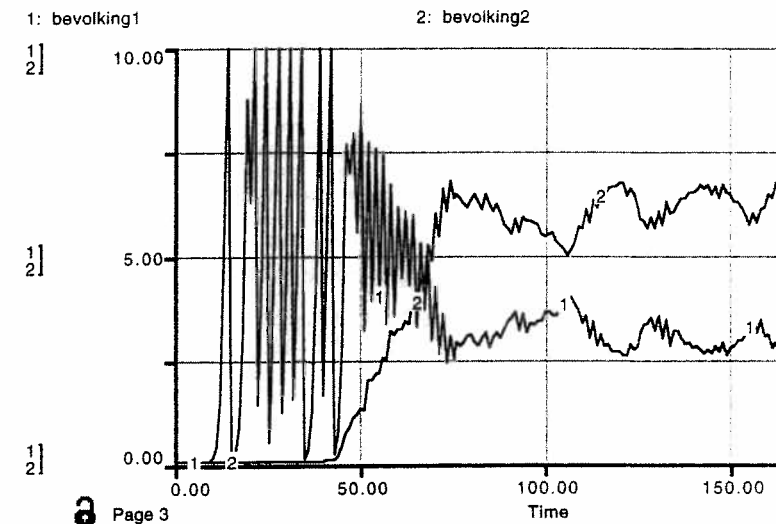
```

bevolking1(t) = bevolking1(t - dt) + (geboorten1) * dt
INIT bevolking1 = 0.0000001
INFLOWS:
geboorten1 = geboortemultiplier1*bevolking1*(EconomicMultiplier*support-bevolking1)-
bevolking1*sterfitemultiplier1
bevolking2(t) = bevolking2(t - dt) + (geboorten2) * dt
INIT bevolking2 = 0.00000001
INFLOWS:
geboorten2 = geboortemultiplier2*bevolking2*(EconomicFluctuation*support-bevolking2)-
bevolking2*sterfitemultiplier2
EconomicFluctuation = RANDOM(2,15)
EconomicMultiplier = 4
geboortemultiplier1 = 0.075
geboortemultiplier2 = 0.010
sterfitemultiplier1 = 0.005
    
```

```

sterfitemultiplier2 = 0.005
support = (supportbegin-bevolking2-bevolking1)
supportbegin = 10
    
```

De vraag is nu wat er gebeurt in dit model met de gegeven waarden van parameters. Het antwoord vindt men in de volgende grafiek:



Figuur 19 Het ontstaan van ecologische nissen door zelforganisatie

Prigogine beschrijft dit als een vorm van zelforganisatie. Door *autokatalyse* neemt de bevolking1 eerst zeer snel toe, zij raakt echter vervolgens door te sterke groei uit evenwicht waardoor *kleine fluctuaties grote gevolgen* hebben en komt in een *chaotisch gebied* van *bifurcaties* terecht waarbij de autokatalyse omslaat in *autoinhibitie*. De tweede populatie kan door middel van haar *randomexperimenten* profiteren van de verminderde aanspraak op het milieu door de eerste populatie. Deze vorm van *kruiscatalyse* zorgt er uiteindelijk voor dat de tweede populatie, die volgens haar geboortemultiplier achterbleef bij de eerste populatie, langzaam maar zeker de eerste populatie kan inhalen en zelfs kan overvleugelen. Prigogine praat over dit proces in termen van het bezetten van *ecologische nissen*. Dat zou de manier zijn waarmee in de biologie zelforganisatie werkt.

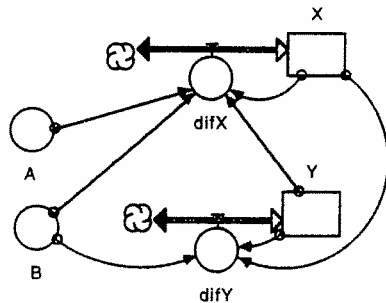
Diverse modellen van zelforganisatie:

Modellen van Prigogine

Het is niet het enige model dat Prigogine geeft voor zelforganisatie. Voor de chemie geeft Prigogine het voorbeeld van de Brusselator, een systeem van differentiaalvergelijkingen dat een chemische reactie beschrijft in niet-lineaire termen.

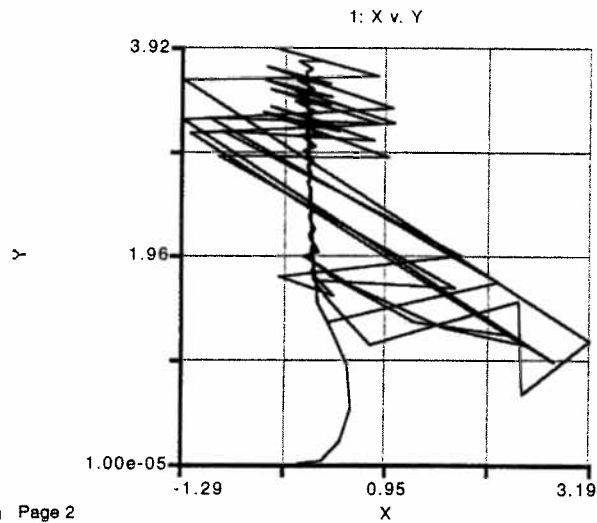
$$\begin{aligned}
 dX/dt &= A + X^2Y - BX - X \\
 dY/dt &= BX - X^2Y
 \end{aligned}$$

Het is duidelijk dat ook dit systeem in Stella te programmeren, bijvoorbeeld in het volgende diagram:



Figuur 20: Een Stella diagram van de Brusselator

Experimenten met dit soort modellen kan als resultaat het volgende faseplaatje geven. Het proces is chaotisch geworden. Kleine fluctuaties krijgen grote gevolgen.



Page 2

Figuur 21: Het fase diagram van de Brusselator

Verder experimenterend met en redenerend over dit soort modellen bracht Prigogine op het volgende resultaat. Het systeem kon door kleine fluctuaties en grote gevolgen uit evenwicht worden gebracht, waarbij tenslotte het proces van bifurcatie het systeem in een nieuw evenwicht kon brengen. Er waren echter verschillende nieuwe evenwichten mogelijk die allemaal gelijkwaardig waren. Maar eenmaal een bepaald pad van bifurcaties ingezet, werd het proces *onomkeerbaar* en werd de symmetrie tussen deze mogelijke nieuwe evenwichten verbroken. Prigogine schrijft hierover als het verbreken van symmetrie door kritische fluctuaties c.q. *dissipatieve structuren*.

Voorbeelden van processen waarbij orde uit chaos ontstaat bij systemen die ver uit evenwicht zijn geraakt zijn er vele. Prigogine verwijst, naast de eerder beschreven modellen, bijvoorbeeld naar: *modificaties van het prooi-roofdiermodel van Lotka-Volterra*; naar het spel van auto- en kruiscatalyse dat de chemicus *Eigen* beschreef in termen van *hypercycli*; het *model van een stedelijke evolutie* zoals dat door Allen is beschreven (een uitbreiding van het besproken model waarin twee populaties aanspraak maken op dezelfde hulpmiddelen van het milieu); het *catastrophe model van Thom*,<sup>1</sup> en uiteraard op *vele modellen van chemische reacties*.

#### Andere modellen.

De chaostheorie geeft in principe een hele verzameling van niet-lineaire modellen die bouwstenen kunnen leveren voor modellen van zelforganisatie. Daarbij is het uiteraard de vraag van welke definitie van zelforganisatie men uitgaat en welke modellen dan geëigend zijn. Gaat men uit van het idee dat *zelforganisatie een proces is van de ontwikkeling van een systeem waarvoor geen expliciete regels zijn te geven voor de wijze waarop zich dat proces ontwikkelt, terwijl het toch gaat om proces dat als eigen voor het systeem is te zien*, dan opent zich de hele reeks van modellen die in de chaostheorie zijn beschreven. Wij kunnen opnoemen: (1) de geremde groei vergelijkingen van Verhulst; (2) de vergelijkingen van Lorenz voor de ontwikkeling van het weer; (3) de vergelijkingen van Langevin waarin de Brownse beweging als omgevingsfluctuatie werd geanalyseerd; (4) de vergelijkingen van Fokker-Planck voor de stochastiek van systemen uit evenwicht; (5) en ga zo maar door, zodat eigenlijk alle niet lineaire modellen in aanmerking komen. In dit perspectief is de omschrijving van zelforganisatie niet gedemarceerd ten opzichte van de beschrijving van de dynamiek van niet-lineaire systemen.

Voor wat betreft de toepassing van de chaostheorie in de sociale wetenschappen, komt men feitelijk alle genoemde modellen tegen. Ik noem wat voorbeelden:

#### 1) De geremde groei vergelijkingen van Verhulst:

Men vindt die vergelijkingen terug bij de beschrijving van: demografische processen (Oskamp 1992); de verspreiding van ziekten (Metz 1990, Lauwerier 1980, De Tombe 1992); sprongen in leerprocessen (Geert 1991, Kunnen 1993).

#### 2) De vergelijkingen van Lorenz:

Voor de beschrijving van het verloop van de mening over kernenergie werden deze vergelijkingen in 1989 door Troitsch gebruikt.

#### 3) De vergelijkingen van Langevin:

Door Troitsch werd ook gebruik gemaakt van deze vergelijkingen.

#### 4) De vergelijkingen van Fokker-Planck:

Werden door Weidlich en Haag geïntroduceerd en gebruikt voor het beschrijven van de ontwikkeling van meningen (zie ook: Lam 1992).

#### 5) En ga zo maar door:

Andere soorten niet-lineaire differentiaalvergelijkingen doken op in diverse onderzoeken. Been (1992) gebruikte voor de beschrijving van leesstoornissen een vergelijking waarin de niet-lineairiteit werd vertegenwoordigd door de introductie van een cosinus en een inverse exponentiële functie. Hommes (1992) gebruikte voor zijn beschrijving van de niet lineaire dynamiek van de markt van vraag en aanbod een tangensfunctie. Eger en Weise (1990) introduceerde in hun beschrijving van soorten van evenwicht, onder druk van conformiteit, bij meningsvorming in hun differentiaalvergelijkingen een vierde machts potentiaalfunctie. De Japanner Ohnishi (1992) maakt in zijn beschrijving van de ontwikkeling van de meningsvorming over het gebruik van kernenergie duidelijk dat cellulaire automaten een alternatief vergelijkingssysteem vormen die uiteindelijk een niet-lineaire dynamiek te zien geven<sup>2</sup>. En zo zijn er nog veel meer voorbeelden te geven waaruit blijkt dat pionierende sociale wetenschappers gebruik maken van veel soorten niet lineaire functies.

<sup>1</sup>Als beschrijving van de instabiliteit van oplossingen van een niet lineaire differentiaalvergelijking in een bepaald punt. Dit soort beschrijvingen is door Zeeman overgenomen bij zijn catastrophetheorie.

<sup>2</sup>Wiskundig valt te bewijzen dat cellulaire automaten een vergelijkingensysteem produceren dat equivalent is met een systeem van niet-lineaire differentiaalvergelijkingen

Dat ondersteunt het idee dat de exploratie van het begrip zelforganisatie zich beweegt op het terrein van de chaostheorie. Daarnaast valt op dat onderzoekers in het gebruik van de boven omschreven modellen zelf ook vaak de term zelforganisatie gebruiken.

Dat geldt zeker voor de school van Haken (1977), die het begrip synergie gebruiken om zelforganisatie te beschrijven. Synergie slaat immers op het proces dat kleine verstoringen elkaar al resonierend versterken tot een nieuw patroon dat anders nooit was ontstaan. *In het algemeen gesteld is synergisme het ontstaan van macro-effecten binnen een complex systeem door de samenwerking van interacterende subsystemen, zonder dat er sprake is van centrale leiding.* (zie Lam 1992, blz. 103). Duidelijk wordt ook gesteld dat recursieve causaliteit de motor is van het proces van zelforganisatie. Maar het begrip synergie is nauwelijks meer gedemarceerd ten opzichte van de verschijnselen die de chaostheorie beschrijft dan de eerder gegeven omschrijving van het begrip zelforganisatie. Modellen van synergie zijn vanuit deze constatering modellen van zelforganisatie. Modellen van synergie en zelforganisatie zijn volgens deze visie te simuleren door middel van een computer.

Niet alle beschreven auteurs gebruiken op die manier het begrip zelforganisatie en/of synergie. Een aantal auteurs gebruiken het begrip zelforganisatie en/of synergie in hun beschrijving van chaosmodellen zelfs helemaal niet. Daar blijft het antwoord op de vraag of zelforganisatie te simuleren is door middel van niet-lineaire modellen in het luchtledige hangen.

#### Van onderzoek naar zelforganisatie naar onderzoek van complexiteit

De voorafgaande beschrijvingen en betogen leiden vanzelf tot de vraag:

*Wat is zelforganisatie meer dan een niet-lineair dynamisch proces zoals dat op een computer kan worden gesimuleerd?*

Het antwoord dat Prigogine gaf vult *het meer* in in termen van autocatalyse, autoinhibitie, kruiscatalyse en bifurcatie, maar is nog steeds met behulp van de wiskundige begrippen uit de chaostheorie gesteld. Daarop wordt overigens vanuit het begrippenkader van de *thermodynamica* een bepaald perspectief gezet, namelijk de logica van de *onomkeerbaarheid* van die dynamische processen, zodat zij een éénmalig karakter krijgen. Het antwoord van de groep rondom de fysicus Haken is daarmee vergelijkbaar, alhoewel daarbij minder als bij Prigogine nog wordt gezocht naar een nieuwe logica. Haken stelt volgens sommigen te makkelijk dat de parameters van het macro-niveau de parameters van het mikro-niveau dwingen tot bepaalde waarden (zie bijvoorbeeld: Meijer 1993, Hofinger 1993).

In deze antwoorden van natuurwetenschappers die verwijzen naar de theorie van dynamische systemen wordt de definitie "*wanneer in een systeem van entiteiten een patroon ontstaat dat niet wordt gegenereerd door expliciete instructies of regels, dan wordt dit patroon toegeschreven aan een proces van zelforganisatie*" (Ruhland 1993) uitdrukkelijk meegenomen. Het is juist de essentie van computersimulatie dat het experimentele wiskunde betreft voor onderzoek van algorithmen die uitkomsten genereren die niet analytisch kunnen worden beschreven. In de chaostheorie wordt de term deterministische chaos gebruikt om uit te drukken dat een exact bepaald algoritme desondanks onbepaalde uitkomsten genereert. Het is de *paradox* van het zo ingevoerde perspectief op deterministische processen dat die onbepaaldheid pas duidelijk wordt als men het simulatieonderzoek doet. De computer moet ingeschakeld worden om te weten waar de computer niet ingeschakeld kan worden. Pas op zo'n moment kan een menselijk *subject* een *interpretatiekader* inbrengen voor die onbepaaldheid. Een interpretatiekader dat het subject echter in een zodanige taal moet stellen dat hij daarover kan communiceren met andere menselijke subjecten. Voor wiskundigen is het duidelijk dat die taal de wiskunde is. Die bezit blijkbaar naast algorithmische elementen ook *niet-algorithmische* elementen, bijvoorbeeld in de omschrijving van oneindige verzamelingen (zie: Penrose 1989). Het is geruststellend dat sommige wiskundigen daarbij menen dat één en ander uiteindelijk uitgelegd moet kunnen worden in de *natuurlijke taal*. Redeneringen over tellen en rekenen, waarmee de Grieken nog moeite hadden, zijn een integraal onderdeel geworden van de natuurlijke taal. Het is gedemonstreerd dat de uitleg van de essentie van

differentiaalvergelijkingen ook in de natuurlijke taal is te geven. Voorstelbaar is dan misschien dat het begrip oneindig, of liever het begrip van het fenomeen dat sommige zaken niet zijn af te tellen (overaftelbaar zijn), zoals dat een kenmerkend element vormt van de chaostheorie, uiteindelijk op een navolgbare wijze uitgedrukt kan worden in de natuurlijke taal. Misschien, als die is uitgebreid met nieuwe woorden, begrippen en redeneringen.

In deze visie is het onderzoek naar zelforganisatie van sociale wetenschappers in ieder geval interdisciplinair en vooral een onderzoek naar nieuwe begrippen en redeneringen. Dat lijkt mij verfrissend in een situatie waarin, naar mijn mening, de ontwikkeling van de sociale wetenschappen wordt geblokkeerd door misverstanden, zoals bijvoorbeeld: het idee dat de wiskunde niet experimenteel zou zijn (Swanborn 1987), terwijl de wiskunde dat wel degelijk kan zijn (Von Neuman 1947, Lauwerier 1980); of het idee dat differentiaalvergelijkingen veel moeilijker zijn te begrijpen dan redeneringen over correlatie, factoranalyse, e.d.; of het idee dat er alleen maar falsificatie mogelijk is; of het dogma dat causaliteit niet als symmetrisch proces is te analyseren; of de oneigenlijke tegenstelling tussen kwantitatief en het kwalitatief onderzoek; etcetera, etcetera.

Wat mij betreft kunnen bijna alle essentiële vragen van de sociocybernetica, of het nu om de cybernetica van de eerste of de tweede orde gaat, geherformuleerd worden in de vraagstukken van de wetenschap van de complexiteit zoals dat gepioneerd wordt door Prigogine (1977), Haken (1993) en Casti (1994). Een essentiële vraag is uiteraard welke aspecten van het menselijk denken kan worden gerealiseerd door middel van computer algorithmen. Er zijn nogal wat auteurs die zich beroepen op Gödel of aan Turing bij het idee dat het menselijk denken te (re)produceren is door een computer. Casti (1994) laat zich wat dat betreft minder gemakkelijk spannen voor het karretje van de artificiële intelligentie. Hij geeft op de oude vraag op welke wijze de menselijke geest kennis vindt en waarheid aan het licht brengt (b.v. Popper 1934) een intrigerend antwoord. Waarheid kan worden gezien als een attractor in het chaotisch proces van het verzamelen en laten accumuleren van kennis. Of sterker: zonder chaos is er geen waarheid. In deze visie op complexiteit komt de waarnemer weer terug en treedt de waarnemer zelfs op in de definitie.

*How many inequivalent descriptions of N can our observer generate? The complexity of a system N as seen by an observer is directly proportional to the number of such descriptions* (Casti 1994)

En zo brengt de wetenschap van de complexiteit ons weer terug een aantal bekende discussies van de sociocybernetica, maar dan naar mijn overtuiging in een taal geformuleerd waarin een aantal problemen beter kunnen worden aangepakt.

#### Literatuur

- Bateson G., Steps to an ecology of mind, Ballantine, New York 1972.  
 Been P., De dynamica van dyslexie, in: Dijkum C. van, Tombe D. (red), Gamma-chaos: onzekerheid en orde in de menswetenschappen, Aramith Uitgevers, Bloemendaal 1992.  
 Broer H.W., Verhulst F. (red), Dynamische systemen en Chaos, Epsilon, Utrecht 1990.  
 Chatterjee S., Yilmaz R.M., Chaos, fractals and statistics, in: Stochastic Science, Vol. 7, nr. 1, 1992  
 Chomsky N., Three models for description of language, in: Luce R.D. (red), Readings in Mathematical Psychology, Wiley & Sons, New York 1965.  
 Cullen M.R., Zill D.G. (1996). Differential Equations with Boundary-Value Problems. Pacific Grove, California: Brooks/Cole Publishing Company.  
 DeTombe D. (1994). Defining complex interdisciplinary societal problems. Amsterdam: Thesis Publishers.  
 DeTombe D.J., & Dijkum C. van (Eds.) (1996). Analyzing Complex Societal Problems: a Methodological Approach. München: Rainier Hampp Verlag.  
 Dilthey W., Einleitung in die Geisteswissenschaften, Gesammelte Schriften 1, Berlin 1923 (oorspronkelijk 1883).



- Dijkum C. van, Spelen met Onderzoek, Boom, Meppel 1988.
- Dijkum C. van, Towards a new methodology: from Popper to Social Cybernetics, in: Mutual Uses of Cybernetics and Science, special issue of Systemica, Vol. 8, Glanville R., Zeeuw G. de (ed), Thesis Publishers, Amsterdam, 1991a.
- Dijkum C. van, Wallner F. (ed), Constructive Realism in Discussion, Sokrates Science Publiiser, Amsterdam 1991b.
- Dijkum C. van, Tombe D., Gamma-chaos: onzekerheid en orde in de menswetenschappen, Aramith Uitgevers, Bloemendaal 1992.
- Dijkum C. van, Orde in chaos, in: Blaise 24, jaargang 6, maart 1993a.
- Dijkum C. van (1993b). De chaostheorie in de menswetenschappen. In: Wijsgerig perspectief op maatschappij en wetenschap, jg. 34, nr. 3.
- Eger Th., Weise P., Normen als gesellschaftliche Ordner, in: Ökonomie und Gesellschaft, Jahrbuch 8, Frankfurt 1990.
- Foerster H. von, Principles of Self-Organization, in: Probst G.J.B. (red), Selforganization and Management of Social Systems, Springer, Heidelberg 1984.
- Geert P. van, A dynamic systems model of cognitive and language growth, in: Psychological review 98 (1), 1991.
- Gödel K., Über formal unentscheidbare Sätzen der Principia Mathematica und verwandter Systeme, Monatshefte für Mathematik und Physik 38, 1931.
- Grasman J., Fractale structuren in de dynamica van systemen, in: Broer H.W., Verhulst F. (red), Dynamische systemen en Chaos, Epsilon, Utrecht 1990.
- Groot A.D., Algemene Methodologie, Mouton, Den Haag 1961.
- Groot A.D., Medendorp F.L., Term, begrip, theorie: inleiding tot signifiante begripsanalyse, Boom, Meppel 1986.
- Haken H. (ed), Springer Series in Synergetics, meer dan 50 delen, Springer, Berlijn 1977-1993.
- Hofinger C., Seminararbeit zur thema selbstorganisations-modelle, Institut für Höhere Studien, Wien februari 1993.
- Hofstädter D., Metamagische thema's, Uitgeverij Contact, Amsterdam 1988.
- Hommes C., Chaotisch prijgedrag in een eenvoudig economisch model, in: Wetenschappelijk tijdschrift voor informatica en modelbouw, nr1, SISWO 1992.
- Holzkamp K., Kritische Psychologie, Fischer, Frankfurt 1972.
- Kunnen S., Voordracht voor de SISWO-werkgroep zelforganisatie, Amsterdam 1993.
- Lam N., Synergisme, of hoe de structuur verrijst uit de chaos, in: Dijkum C. van, Tombe D. (red), Gamma-chaos: onzekerheid en orde in de menswetenschappen, Aramith Uitgevers, Bloemendaal 1992.
- Laplace P.S., Essai philosophique des probabilités, in: Théorie analytique des probabilités, Paris (1812,1814).
- Lauwerier H., Modellen met microcomputer, Epsilon, Utrecht 1980.
- Löfgren L., The Nondetachability of Language and Linguistic Realism, in: Dijkum C. van, Wallner F. (ed), Constructive Realism in Discussion, Sokrates Science Publiiser, Amsterdam 1991.
- Maturana H.R., Varela F.J., Uribe, R., Autopoiesis: The Organization of Living Systems, It's Characterization and a Model, Biosystems, nr. 5, 1974.
- Meijer O.G., Bongaardt R., Systeemtheorie Bewegingswetenschappen, in: Wetenschappelijk tijdschrift voor informatica en modelbouw, nr2, SISWO 1992.
- Von Neuman J. von, The Mathematician, in: Heywood R.B. (ed), The works of mind, University of Chicago Press, Chicago 1947.
- Ohnishi T., A cellular automation model for the change of public attitude regarding nuclear energy, CRC Research Institute, Nakase 1992.
- Penrose R., The emperor's new mind, Vintage, London 1989.
- Poincaré H., Science et méthode, Paris 1908.
- Popper K.R., The logic of scientific discovery, Hutchinson and Co, London 1959 (Oorspronkelijke Duitse uitgave : Springer, Wenen 1934).
- Popper K.R., The Open Universe. An Argument for Indeterminism. From the Postscript to the Logic of Scientific Discovery, Totowa 1982.
- Prigogine, Self-organization in Nonequilibrium systems, Wiley, New York 1977.
- Prigogine, From being to becoming, Freeman, San Francisco 1980.

- Ruhland R., Dynamische systemen en transitie: nieuwe benaderingen in de ontwikkelingspsychologie, Discussiestuk, Groningen 1993.
- Stegmüller W, Historische, psychologische und rationale Erklärung, Studienausgabe, Teil 3, Springer Verlag, Heidelberg 1969.
- Struik D.J., Geschiedenis van de wiskunde, Spectrum, Utrecht 1965.
- Swanborn P.G., Methoden van sociaal-wetenschappelijk onderzoek, Boom, Meppel 1987.
- Tennekes H., De vlinder van Lorenz, Aramith Uitgevers, Bloemendaal 1990.
- Thom R., Structural stability and morphogenesis, Reading, Massachusetts 1975.
- Troitzsch K. G., Chaotisch Verhalten in einem Sozialsystem, in: Campbel A.B. (Hg), Dissipatieve structuren in integrierten system, Baden Baden 1987.
- Turing A.M. (1936), On computable numbers with an application to the entscheidungsproblem, in: Proceedings London Mathematical Society, ser. 2, vol. 42.
- Verhulst F. (1990), De historische route naar Chaos, in: Tennekes H. (red), De vlinder van Lorenz, Bloemendaal 1990.
- Verhulst F. (1994). Metaphors for Psychoanalysis. In: Nonlinear Science Today, Vol. 4, No. 1.
- Weidlich W., Haag G., Quantatieve Sociology, Springer, Berlijn 1983.
- Weijnen A., Nederlands Woordenboek, Utrecht: Het Spectrum.
- Wieland-Burston J., Chaos and order in the world of the psyche, Routledge, London 1992.
- Zeeuw G. de, Is chaos te zien?, in: Dijkum C. van, Tombe D., Gamma-chaos: onzekerheid en orde in de menswetenschappen, Aramith Uitgevers, Bloemendaal 1992.