

# Complexiteit en economie

Cees Diks

*De economie vertoont geregeld fenomenen, zoals bubbles en crashes, die niet goed beschreven worden door de traditionele economische modellen. Door beperkingen van traditionele economische modellen, nieuwe inzichten in de economische dynamica en toenemende beschikbaarheid van rekenkracht, vindt er momenteel een paradigmaverandering plaats, waarin meer en meer wetenschappers de economie als een complex adaptief systeem gaan beschouwen. In dit artikel ga ik dieper in op de achterliggende redenen hiervoor, en op de consequenties voor de technieken die worden gebruikt voor de analyse van economische en financiële data en economisch beleid.*

## 1 Inleiding <sup>1</sup>

De economie is een fascinerend dynamisch systeem. De recente financiële crisis en de wereldwijde gevolgen ervan, die nu nog altijd voelbaar zijn, kunnen niemand ontgaan zijn. Wat minstens even intrigerend is, is dat de traditionele economische theorie eigenlijk verrassend weinig inzicht biedt in de oorzaken van zo'n belangrijk fenomeen als financiële crises. Dit terwijl crises historisch gezien geregeld voorkomen, en door vrijwel alle economen, beleidsmakers en toezichhouders als schadelijk en daarmee onwenselijk worden beschouwd. Traditionele marktmodellen zijn gebaseerd op evenwicht tussen vraag en aanbod en een hoge mate van rationaliteit van marktparticipanten. Deze aanpak lijkt weliswaar goed te werken in economisch rustig vaarwater, maar juist wanneer we de modellen het hardst nodig hebben – in tijden van crisis – laten ze het vaak jammerlijk afweten.

In dit artikel zal ik betogen dat dit komt doordat de economie een complex adaptief systeem is. Complexe systemen kunnen een rijk scala aan dynamisch gedrag vertonen, dat niet door de traditionele economische modellen kan worden geproduceerd, en waarop de traditionele lineaire data-analysetechnieken niet toegespitst zijn. In complexe systemen, zoals de economie en financiële markten, speelt niet-lineaire dynamica juist een dominante rol. Om financiële data zoals aandelenprijzen goed te kunnen analyseren, hebben we dan ook nieuwe data-

---

<sup>1</sup> Dit is een bewerking van de oratie van Cees Diks, uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Data-analyse en Economische Statistiek van de Universiteit van Amsterdam op 13 december 2012.

analysetechnieken nodig die recht doen aan het feit dat de waarnemingen afkomstig zijn van een complex systeem.

Ook van de kant van beleidsmakers en toezichhouders is er sinds de financiële crisis een toenemende vraag naar een nieuwe aanpak, die een betere context moet bieden om crises te voorkomen, of op z'n minst beter te kunnen zien aankomen. De voormalige president van de Europese Centrale Bank, Jean-Claude Trichet, sprak in 2010 de woorden (vertaald in het Nederlands): "Geconfronteerd met de crisis voelden we ons door de conventionele beleidsinstrumenten in de steek gelaten." De recente financieel-economische crisis heeft ons allen bij elkaar onvoorstelbaar veel geld gekost. Een schatting van het Internationale Monetaire Fonds kwam uit op een astronomisch bedrag dat neerkomt op 1500 Euro per persoon op aarde, inclusief kinderen (Conway 2009). Als we dit soort kosten in de toekomst ook maar met een fractie zouden kunnen inperken, dan is er veel gewonnen.

Ik zal in mijn betoog overigens niet stellen dat met het besef dat de economie een complex adaptief systeem is, ook direct alle wetenschappelijke en beleidsvraagstukken zijn beantwoord. Integendeel, ik denk dat we aan de wieg staan van een paradigmaverschuiving in de economie, en hoewel mijn verwachting is dat dit zal leiden tot nieuwe, bruikbare, inzichten in de economie, is er nog veel werk te verrichten. Ook verwacht ik dat we, zoals bij weersvoorspellingen, tegen fundamentele beperkingen zullen aanlopen van bijvoorbeeld langetermijnvoorspellingen van de economie. Juist om deze beperkingen, maar ook de mogelijkheden, in kaart te brengen dienen we de wetenschappelijke en beleidsconsequenties van de economie als complex systeem serieus te nemen en nader te onderzoeken.

## 2 De economie als complex systeem

**Figuur 1** Satellietfoto van tropische storm 'Fran', september 1996



Het woord complex wordt vaak gebruikt als synoniem voor gecompliceerd, hoewel er belangrijke verschillen zijn. Een complex systeem is samengesteld uit vele delen die interactie met elkaar hebben, maar het systeem als geheel heeft één of meer eigenschappen die niet direct volgen uit het gedrag van de individuele delen. Een voorbeeld van een complex systeem is een tropische storm, met een spiraalstructuur die alleen te zien is als je de storm op globale schaal bekijkt. Op moleculaire schaal is de storm irrelevant, en gedragen de lucht- en watermoleculen zich volgens dezelfde natuurwetten als altijd. Dit voorbeeld laat zien dat eenvoudige natuurwetten voor moleculen op microscopische schaal kunnen leiden tot een nieuw fenomeen op globale schaal, namelijk een tropische storm. Op soortgelijke wijze kan het individuele gedrag van termieten leiden tot het gezamenlijk bouwen van een kathedraal zonder dat daarbij een ontwerp vooraf nodig is.

**Figuur 2** Termietenheuvel (links) en Sagrada Famiglia, Barcelona (rechts).



Is het mogelijk dat iets dergelijks ook opgaat voor de economie? Kan het zo zijn dat ons individuele gedrag en dat van anderen, zoals handelaren op de beurs, en banken, uiteindelijk leidt tot macro-economische fenomenen als een financiële crisis? Meer en meer wetenschappers uit verschillende vakgebieden denken dat het antwoord op die vraag ‘ja’ is (Ball 2012). Gegeven de titel van deze voordracht zal het niet verbazen dat ik mezelf ook tot die groep onderzoekers reken.

In feite is de financiële wereld al zo complex dat bepaalde fenomenen niet goed begrepen worden. Om een voorbeeld te noemen: in de ‘zogenaamde ‘flash crash’ van 6 mei 2010 verloor de Dow Jones index meer dan 1000 punten (zo'n 9 procent) binnen enkele minuten, om daarna snel weer op te veren. Ongetwijfeld speelt de handel via computers een grote rol bij dit soort fenomenen. Er treedt als het ware een domino- of cascade-effect op, versneld door het grotendeels automatiseren van de handel (VPRO 2010).

Vaak bestuderen we de economie (of een deel ervan) aan de hand van waargenomen economische en financiële tijdreeksen. Een tijdreeks is een reeks waarnemingen van een variabele over de tijd op regelmatige intervallen, bijvoorbeeld de prijs van een aandeel of een beursindex aan het eind van iedere handelsdag. In veel takken van wetenschap wordt gebruik gemaakt van lineaire tijdreeksanalyse. Economie is hierop geen uitzondering. In een lineair model heeft een oorzaak altijd een gevolg dat evenredig is met de grootte van de oorzaak. Verder mogen de effecten van meerdere oorzaken gewoon bij elkaar opgeteld worden. Dat zijn plezierige eigenschappen die de analyse van het model vergemakkelijken, maar het is goed om te beseffen dat dergelijke regels in het dagelijks leven niet altijd opgaan. Als u bijvoorbeeld een trein moet halen en u bent een minuut te laat, dan zijn de gevolgen voor de tijd waarop u op uw bestemming aankomt veel groter dan wanneer u een minuut te vroeg bent.

### 3 Traditionele economische theorie

In de traditionele economische theorie worden marktdeelnemers voorgesteld door een representatieve agent met rationele verwachtingen. Dit houdt in dat wordt aangenomen dat marktdeelnemers op ieder moment kunnen uitrekenen wat voor hen de optimale keuzes zijn. Wat is eigenlijk de achtergrond hiervan?

Economen als de 18e-eeuwse Schot Adam Smith (1723-1790) vroegen zich af hoe menselijk handelen marktuitskomsten beïnvloedt, en hoe marktuitskomsten op hun beurt de verwachtingen van mensen, en daarmee hun handelen, beïnvloeden (Smith 1776). De Franse econoom Léon Walras (1834-1910) bestudeerde in de 19e eeuw gretig alle wiskunde- en natuurkundeboeken van die tijd, in zijn pogingen om dit te modelleren. Rond die tijd was er binnen de natuurkunde een prachtige nieuwe theorie ontwikkeld; de thermodynamica van veeldeeltjessystemen. Binnen deze theorie stond het concept van thermodynamisch evenwicht centraal. Natuurwetten, als de gaswet, die eerder al proefondervindelijk waren vastgesteld, konden met dit evenwichtskoncept nu ook theoretisch worden afgeleid.

Walras (1874) zag kans om het concept van thermodynamisch evenwicht zodanig aan te passen dat een economische evenwichtstheorie ontstond. Walras ging daarmee wel stilzwijgend van een descriptieve vraag, over hoe mensen zich gedragen en daarmee hun omgeving vormgeven, naar een normatieve vraag, over hoe mensen zich zouden moeten gedragen opdat hun effecten op de omgeving consis-

tent zijn met hun gedrag. Of deze normatieve theorie ook een goede beschrijvende theorie was, viel nog te bezien. Daar lijkt het echter niet op.

Wat voor problemen heeft de rationele representatieve agent benadering dan? Om te beginnen worden er sterke aannamen gemaakt over de alwetendheid en rekencapaciteiten van individuen. Een belangrijkere tekortkoming is dat de theorie in strijd is met de empirische feiten. Zo blijken prijzen van beurskoersen en marktindices historisch gezien vaak ver af te liggen van hun theoretische evenwichtswaarde. Een factor twee te hoog of te laag is geen uitzondering, zoals blijkt uit een bekend artikel van Shiller (1981). Ook komen *bubbles* en *crashes* veel voor. Tijdens de recente financiële crisis werden prijsbewegingen die volgens de modellen eens in de duizend jaar kunnen voorkomen soms meerdere malen binnen één week waargenomen. Helaas ontkennen sommige toonaangevende economen nog altijd dat er iets mis is met de traditionele economische theorie. Zo verklaarde Nobelprijswinnaar Robert Lucas dat de financiële crisis niet in strijd is met de theorie, omdat de theorie nu eenmaal stelt dat dergelijke gebeurtenissen niet te voorspellen zijn.

#### **4 Paradigmaverschuiving**

Ik houd het erop dat de traditionele economische theorie een aantal serieuze beperkingen heeft, en dat de theorie van complexe systemen perspectief biedt om de modellen te verbeteren. Recentelijk is er veel vooruitgang geboekt op het gebied van de analyse van dynamische systemen en de theorie van complexe systemen, en is de rekenkracht van computers snel toegenomen. Deze ontwikkelingen hebben het onderzoek van complexe systemen in een stroomversnelling gebracht.

In plaats van het bestuderen van evenwichtsgedrag, richt complexiteitsonderzoek zich juist op buiten-evenwicht fenomenen. Complexiteitstheorie laat bijvoorbeeld toe dat er in de economie endogene fluctuaties optreden, die niet per se gedreven worden door invloeden van buitenaf. Tegelijkertijd is de structuur van de economie voortdurend onderhevig aan veranderingen. Het is een zogenaamd complex adaptief systeem. Dit zien we terug in de evolutie van financiële netwerken, waarin verbindingen worden aangegaan en weer verbroken.

#### **5 Heterogene-agentenmodellen**

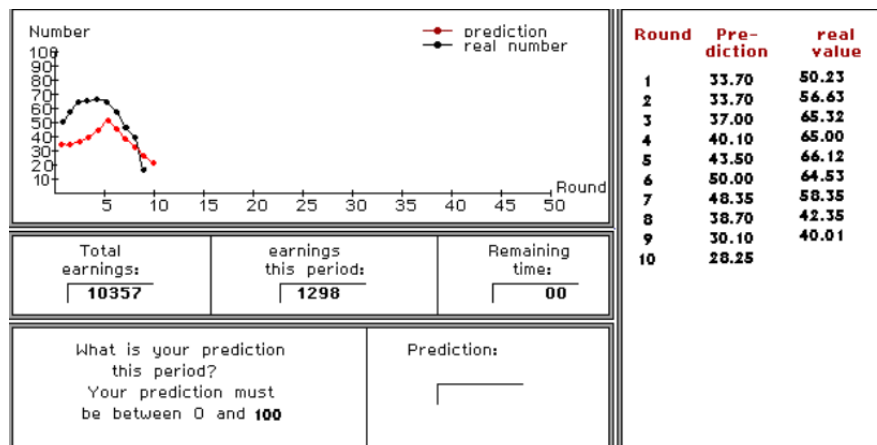
Terwijl het evenwichtdenken de economische theorie de afgelopen 150 jaar heeft gedomineerd, hield een aantal economen de oorspronkelijke vraag naar de terugkoppeling tussen menselijk gedrag en markttuitkomsten wel in het oog. Zo beargumenteerde Keynes (1936) al dat marktsentimenten en marktpsychologie een belangrijke rol spelen op de beurs. Simon (1957) benadrukte dat mensen slechts beperkte kennis en rekencapaciteit hebben, en in gedragsstudies vonden Tversky en Kahneman (1974) dat mensen zich niet altijd rationeel gedragen.

Onder de aanname dat individuen niet perfect rationeel zijn, kunnen heel andere scenario's dan stabiele evenwichten optreden, waaronder grillig gedrag van prijzen, zeepbellen en beurspaniek. Dit is een van de centrale ideeën geweest die Cars Hommes motiveerde om in 1998 het Center for Nonlinear Dynamics in Economics and Finance (CeNDEF) op te richten. Bij deze onderzoeksgroep, waar ik met plezier deel van uitmaak, wordt al bijna 15 jaar gewerkt aan modellen van (delen van) de economie waarin marktparticipanten, aangeduid als agenten, begrensd rationeel zijn. Een uitdaging bij modellen met begrensd rationeel gedrag is dat er vele verschillende vuistregels te bedenken zijn die agenten zouden kunnen gebruiken. Welke van deze vuistregels moeten we dan opnemen in onze modellen? Dit probleem staat bekend als de 'wildernis van begrensde rationaliteit'. Hoe kunnen we deze wildernis temmen? We kunnen bijvoorbeeld kijken hoe mensen in de praktijk in een marktomgeving informatie verwerken en omzetten in verwachtingen en handelen.

## 6 Experimenten

Het laboratorium biedt de mogelijkheid om experimenten uit te voeren met deelnemers (meestal studenten) in een gecontroleerde marktomgeving. Aan de deelnemers wordt verteld dat ze consultant zijn van een bedrijf, en prijzen moeten voorspellen. Als alle marktdeelnemers een voorspelling hebben gedaan, laten we de computer de gerealiseerde prijs uitrekenen. Die prijs zien de marktdeelnemers dan weer, en er wordt om een volgende voorspelling gevraagd, etc. Figuur 3 toont het beeldscherm dat de deelnemers voor zich hebben.

**Figuur 3** Voorbeeld scherm experiment



De belangrijkste conclusie uit deze experimenten is dat mensen begrensd rationeel zijn bij het vormen van hun verwachtingen. Dit houdt in dat zij niet volledig ratio-

neel zijn, maar ‘eenvoudige’ vuistregels gebruiken voor het maken van voorspellingen. Zo volgen ze bijvoorbeeld trends, of passen hun verwachtingen aan als ze systematisch te hoog of te laag zitten. Verder valt op dat niet iedereen dezelfde vuistregel gebruikt, maar dat er juist diversiteit is. Ten slotte zien we dat vuistregels die in het recente verleden meer succes hadden meer volgers krijgen.

William Brock en Cars Hommes (1997, 1998) hebben laten zien dat economische modellen waarin we dergelijke begrensd rationele heterogene agenten veronderstellen grillige prijsdynamica kunnen vertonen. Recentelijk is er ook aandacht voor netwerken van dergelijke heterogene agenten (Schweitzer et al. 2009). In deze netwerken treedt complex gedrag op. De dynamica kan lange tijd stabiel zijn, maar onder invloed van langzaam veranderende externe factoren, of intern opbouwende spanningen, kan het stabiele gedrag plotseling omslaan in instabiel gedrag.

## 7 Niet-lineaire tijdreeksanalyse

Wat betekent het idee dat de economie een complex systeem is voor de analyse van economische en financiële tijdreeksen? Complexe systemen kunnen een breed scala aan dynamisch gedrag vertonen. De terugkoppelingen in complexe systemen zijn veelal sterk niet-lineair, en kunnen in de loop van de tijd veranderen.

Dit laatste kan al direct voor problemen zorgen, omdat een veel gemaakte aanname binnen de tijdreeksanalyse is dat waargenomen tijdreeksen stationair zijn, wat wil zeggen dat het proces niet verandert tijdens de periode waarover we het waarnemen. Dit kan een redelijke aanname zijn, zolang die periode niet te lang is. Ervan uitgaande dat we tijdreeksen tot onze beschikking hebben die als stationair kunnen worden beschouwd, is het vervolgens van belang om rekening te houden met het niet-lineaire karakter van de terugkoppelingen. Dit is het domein van de niet-lineaire tijdreeksanalyse.

Helaas wordt niet-lineaire tijdreeksanalyse nogal eens verward met chaos. Chaostheorie heeft een wat negatieve reputatie onder economen, wellicht omdat de mogelijke rol van chaos in de economie in het verleden nogal eens te veel is benadrukt. In de exacte wetenschappen speelt chaostheorie een veel prominentere rol dan in de economie. In de economie is die rol bescheiden en bestaat die er voornamelijk uit te laten zien dat een eenvoudig deterministisch dynamisch systeem grillig gedrag kan vertonen. Daarnaast speelt chaostheorie ook nog een rol in de niet-lineaire tijdreeksanalyse, omdat sommige van de technieken die daarin ontwikkeld zijn ook gebruikt kunnen worden om niet-lineaire tijdreeksprocessen te begrijpen en te bestuderen.

De wiskundige Henri Poincaré (1898) ontdekte al meer dan 100 jaar geleden dat een niet-lineair deterministisch dynamisch systeem grillig gedrag kan vertonen, toen hij het probleem bestudeerde van drie hemellichamen die om elkaar heen bewegen onder invloed van de zwaartekracht. In dergelijke systemen is er sprake van zogenaamde gevoelige afhankelijkheid van beginvoorwaarden. Een klein verschil in de positie of snelheid van een van de hemellichamen zal in zo'n systeem op de

korte termijn weinig gevolgen hebben, maar doordat kleine verschillen exponentieel groeien in de tijd, nemen ze na verloop van tijd macroscopische schalen aan. Deterministische systemen met gevoelige afhankelijkheid van beginvoorwaarden worden chaotisch genoemd. De bijbehorende tijdreeksen zien er vaak grillig en onvoorspelbaar uit, en worden eveneens chaotisch genoemd. Op korte termijn zijn chaotische tijdreeksen goed te voorspellen, maar op de langere termijn zijn er fundamentele beperkingen aan de voorspelbaarheid.

**Reconstructiestelling.** De echte doorbraak van het onderzoek naar chaotische tijdreeksen heeft na de ontdekking van Poincaré lang op zich laten wachten. Het ontbrak hem onder andere aan de computers die we nu tot onze beschikking hebben. De meteoroloog Edward Lorenz (1963) zag in zijn computersimulaties van een eenvoudig model voor het weer gevoelige afhankelijkheid van beginvoorwaarden. Hij bedacht hiervoor de term *vlindereffect*, omdat de vleugelslag van een vlinder uiteindelijk kan leiden tot een orkaan aan de andere kant van de aarde.

Een essentiële bijdrage aan de tijdreeksanalyse is geleverd door Floris Takens begin jaren 80. Zijn reconstructiestelling (Takens 1981) is van onmisbare waarde als we aan de hand van één enkele tijdreeks een analyse van een deterministisch dynamisch systeem willen uitvoeren. De Takens-reconstructie levert namelijk op basis van een enkele waargenomen tijdreeks een natuurgetrouwe kopie van het oorspronkelijke dynamische systeem, en maakt het mogelijk om de dynamica statistisch te bestuderen.

## 8 Correlatie-integralen

Op basis van de Takens-reconstructie werden er met name binnen de exacte wetenschappen technieken ontwikkeld om te bepalen of een waargenomen tijdreeks afkomstig is van een chaotisch dynamisch systeem dan wel een stochastisch systeem, waarin ruis domineert. Deze technieken zijn gebaseerd op zogenaamde correlatie-integralen, die ons vertellen hoe vaak eenzelfde, of zeer gelijkend, patroon van een gegeven lengte voorkomt in een tijdreeks. Grassberger en Procaccia (1983) hebben laten zien dat de correlatie-integralen van deterministische tijdreeksen worden gekarakteriseerd door twee getallen. De correlatie-dimensie zegt iets over het minimale aantal variabelen dat nodig is om het dynamische systeem te modelleren, en de correlatie-entropie over de kortetermijnvoorspelbaarheid van het systeem. Als de correlatie-dimensie laag is en de correlatie-entropie positief, spreken we van laag-dimensionale chaos.

**Chaos in de economie?** Zo'n 20 jaar geleden waren er economen die deze techniek gebruikten om erachter te komen of de waargenomen grillige fluctuaties in economische en financiële tijdreeksen mogelijk laag-dimensionaal chaotisch waren.

Tot veler verrassing leken de eerste resultaten er inderdaad op te wijzen dat de correlatie-integralen van financiële tijdreeksen zich gedroegen zoals de theorie



voorspelde voor laag-dimensionaal chaotische tijdreeksen, zij het verontreinigd met wat ruis. Het leek er dus op dat financiële tijdreeksen laag-dimensionaal chaotisch waren. Inmiddels weten we dat schijn kan bedriegen. Bij veel financiële tijdreeksen fluctueert de variantie (en dus de amplitude) van rendementen over de tijd, een effect dat volatiliteitsclustering wordt genoemd. Men kan laten zien dat volatiliteitsclustering kan leiden tot lage waarden van de correlatie-dimensie en de correlatie-entropie.

Tijdreeksen van complexe systemen zijn overigens zelden perfect laagdimensionaal chaotisch of pure ruis. Ze zitten qua complexiteit ergens tussen deze twee extremen in.

**BDS-toets.** Brock, Dechert, Scheinkman en LeBaron (1996) stelden zich een bescheidener doel dan het meten van de correlatie-dimensie en -entropie en vroegen zich af of er in financiële tijdreeksen voldoende statistisch bewijs te vinden is om de nulhypothese te verwerpen dat rendementen uit pure ruis bestaan. Zij stelden een toets voor van deze hypothese op basis van correlatie-integralen. Een verwerping van de nulhypothese impliceert dan niet dat er sprake is van chaos, maar slechts dat er enige vorm van onderlinge afhankelijkheid is tussen de waarden in de tijdreeks. Met behulp van de BDS toets blijkt dat financiële rendementen, hoewel ze niet laag-dimensionaal chaotisch zijn, wel degelijk onderlinge niet-lineaire afhankelijkheden hebben. Dit is deels een gevolg van de eerder genoemde volatiliteitsclustering, maar zelfs na rekening te houden met volatiliteitsclustering is er vaak nog niet-lineaire afhankelijkheid te vinden in rendementen.

**Dichtheidsvoorspellers evalueren.** In de praktijk heeft een onderzoeker vaak de keuze tussen verschillende concurrerende modellen voor financiële tijdreeksen. De vraag welk van deze kandidaat modellen de data het beste beschrijft komt dan ook geregeld naar voren. Om deze vraag te beantwoorden kan men de modellen op een standaard manier statistisch met elkaar vergelijken, bijvoorbeeld op basis van informatiecriteria of *out-of-sample* voorspelkwaliteit, maar een nadeel van deze standaardprocedures is dat alle waarnemingen dan even zwaar meewegen bij de evaluatie van de modellen. Bij financieel risicomanagement is het juist vooral van belang dat de gebruikte modellen de kans op weinig voorkomende, extreme, gebeurtenissen goed kunnen voorspellen. In het bijzonder moeten de modellen de kansen op grote verliezen zo goed mogelijk inschatten. Dit betekent dat een model vooral goed moet werken in de linkerstaart van de verdeling van toekomstige rendementen. Enkele oudere methoden om de kwaliteit van modellen in de linkerstaart van de verdeling te beoordelen bleken onder bepaalde, ook in de praktijk voorkomende, omstandigheden systematisch het verkeerde model te prefereren. Dick van Dijk, Valentyn Panchenko en ik hebben een bijdrage geleverd aan de oplossing van dit probleem door een methode te ontwikkelen met behulp waarvan modellen eerlijk met elkaar vergeleken kunnen worden, terwijl de nadruk ligt op extreme gebeurtenissen (Diks, Panchenko en Van Dijk 2011).

**Niet-parametrische technieken.** Als de exacte vorm van de niet-lineaire dynamica onbekend is, valt er veel voor te zeggen om met zogenaamde niet-parametrische modellen te werken. Bij niet-parametrische statistiek worden er minimale aannamen gemaakt over het proces dat is waargenomen. Je laat de data als het ware voor zich spreken. Niet-parametrische methoden vereisen over het algemeen wel meer waarnemingen, maar vaak zien we dat als een kleine prijs voor de extra flexibiliteit die wordt geboden.

**Granger causaliteit.** Als voorbeeld zal ik ingaan op een niet-parametrische toets op Granger-causaliteit die we hebben ontwikkeld om koppelingen in financiële markten te analyseren (Diks en Panchenko, 2006). Dit zal ik doen aan de hand van een toepassing op olieprijsen (Bekiros en Diks, 2008).

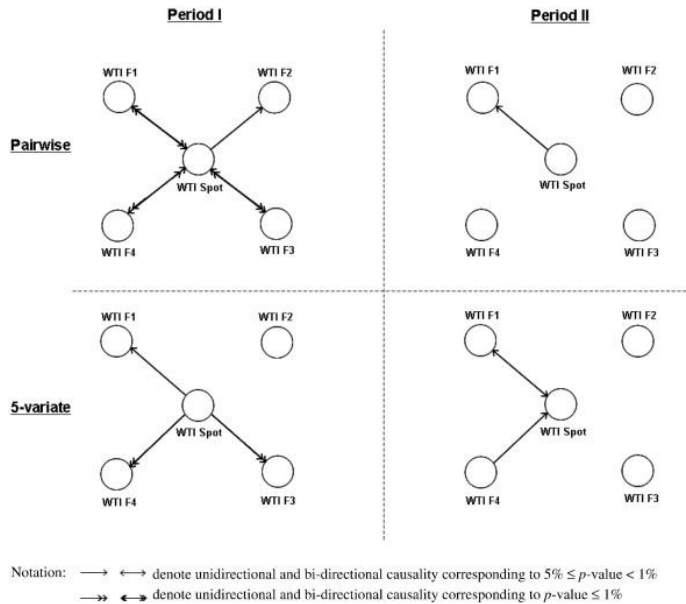
In de oliehandel kan men handelen in olie zelf, de zogenaamde spot-markt, of in *futures*. Een future is het recht om op een bepaald moment in de toekomst een bepaalde hoeveelheid ruwe olie geleverd te krijgen. Een typische vraag die economen zich stellen is of de prijzen van futures de spotprijzen beïnvloeden, of omgekeerd? Welke prijs is ‘leidend’, de olieprijs of de futureprijs? Volgens de traditionele economische theorie zouden de prijzen gelijk op moeten gaan, omdat zowel de olieprijs als de futureprijs op hetzelfde onderliggende goed gebaseerd zijn. In aanwezigheid van marktwrijvingen zijn er echter argumenten aan te voeren voor alternatieve scenario's. Futures zijn bijvoorbeeld gemakkelijker te verhandelen dan olie zelf, omdat de fysieke levering geen rol speelt zolang de future maar op tijd wordt doorverkocht. Dit suggereert dat futures aantrekkelijker zijn voor speculanten en hedgers, en daarom meer verhandeld worden waardoor ze sneller op nieuws zullen reageren.

De standaardtoets voor het beantwoorden van dit soort vragen naar onderliggende dynamische afhankelijkheid is de Granger-causaliteitstoets, genoemd naar Clive Granger die, onder andere voor zijn werk op dit gebied, de Nobelprijs heeft gekregen (Granger 1969). Gewoonlijk wordt Granger-causaliteit getoetst op basis van een lineair model voor de variabelen, in dit geval de olie- en futureprijzen. Een groot nadeel van een dergelijke modelmatige aanpak is echter dat we geen garantie hebben dat het gebruikte lineaire model goed gespecificeerd is. Als de waarnemingen in werkelijkheid door een niet-lineair proces zijn gegenereerd, dan kan dit tot gevolg hebben dat de standaard Granger-causaliteitstoets tot de verkeerde conclusies komt.

Om die reden hebben we een niet-parametrische Granger-causaliteitstoets ontwikkeld, die niet afhangt van de aanname van een specifiek model. De toetsresultaten kunnen compact grafisch worden weergegeven in een netwerk, waarin de pijlen aangeven hoe sterk de statistisch gevonden afhankelijkheden zijn. Hierbij is al gecompenseerd voor mogelijke volatiliteitseffecten. De enkele pijlen stellen statistisch significante relaties voor, en de dubbele pijlen sterk significante. Figuur 4 toont de resultaten voor perioden van voor en na oktober 1999. Deze opsplitsing correspondeert grofweg met de reductie van de OPEC reservecapaciteit en de toename van de benzine import in de VS, die beide in 1999 plaatsvonden. Uit de re-

sultaten blijkt dat het aantal significante niet-lineaire afhankelijkheden is afgenomen in de tweede periode ten opzichte van de eerste. Dit suggereert dat de oliemarkt in de loop der jaren minder voorspelbaar is geworden.

**Figuur 4** Resultaten Granger causaliteitstoets voor olie spot- en futuresmarkten.



Een bekend probleem bij het toetsen op Granger-causaliteit is dat er soms een schijnbare koppeling kan worden waargenomen tussen twee variabelen als er in werkelijkheid niet twee, maar drie of meer variabelen op elkaar inwerken. Om een voorbeeld te noemen, als we de afhankelijkheid tussen de prijzen van twee graan-soorten beschouwen, dan kan het zo zijn dat ze elkaar lijken te beïnvloeden, terwijl ze in feite beide bepaald worden door het weer. Droogte in het middenwesten van de VS zal leiden tot magere oogsten en dus hogere prijzen. Je zou om die reden rekening willen houden met het weer bij het bestuderen van de sterkte van de dynamische relaties tussen de graanprijzen. Binnen de klasse van lineaire modellen is dit gemakkelijk te realiseren, maar het blijkt een stuk lastiger te zijn in deze niet-parametrische context. Aan dit probleem werk ik momenteel met promovendus Marcin Wolski en met postdoc Angeliki Papan.

## 9 Schatten van economische modellen

Tot nu toe hebben we vooral gekeken naar de beschrijvende tijdreeksanalyse. We hebben het gehad over het kiezen tussen verschillende modellen voor rendementen en of we al dan niet een hypothese van Granger-causaliteit konden verwerpen. Dit is wat je noemt fenomenologie. Hoewel deze aanpak kan leiden tot een goede be-

schrijving van de fenomenen die we waarnemen, biedt het weinig tot geen inzicht in de onderliggende mechanismen die de tijdreeksen tot stand brengen. Vandaar dat we toch eigenlijk liever in staat zijn om de tijdreeksmodellen die we gebruiken af te leiden uit economische dynamische modellen, zoals bijvoorbeeld heterogene-agentenmodellen.

**Schatten van heterogene-agentenmodellen.** Er verschijnen in de economische literatuur veel theoretische artikelen over heterogene-agentenmodellen. Aanvankelijk richtten die artikelen zich op het reproduceren van de belangrijkste kenmerken van financiële tijdreeksen. De literatuur kent inmiddels meerdere heterogene-agentenmodellen die deze kenmerken kunnen reproduceren en toch behoorlijk verschillen van opzet. De vraag dringt zich dan op welk van deze modellen het meest geschikt is om bijvoorbeeld de effecten van beleid mee te analyseren.

Om dergelijke vragen te beantwoorden zullen nieuwe statistische methoden ontwikkeld moeten worden om de parameters van deze modellen te schatten, zodat de modellen vervolgens gebruikt kunnen worden om bijvoorbeeld voorspellingen te doen of scenario-analyses uit te voeren. Dit schatten van heterogene-agentenmodellen staat nog in de kinderschoenen, maar er zijn al wel wat eerste resultaten beschikbaar. Twee daarvan wil ik hier kort bespreken.

**Kuddegedrag.** Roy van der Weide en ik hebben met een eenvoudig heterogene-agentenmodel een aantal veel gebruikte econometrische tijdreeksmodellen kunnen afleiden. Ons model richt zich op de effecten van kuddegedrag op prijsdynamica in een wisselkoersenmarkt.

Mensen vertonen kuddegedrag, ook op de financiële beurzen. Een professionele handelaar in obligaties vertrouwde me toe dat zijn standaardstrategie ‘go with the flow’ is. Dat is een begrijpelijke strategie. Als je de mensen om je heen snel rijk ziet worden door massaal in een nieuw financieel product te stappen, dan zul je daar ook een graantje van willen meepikken. Sterker nog, handelaren worden doorgaans beoordeeld op basis van hoe goed ze het relatief doen ten opzichte van hun concurrenten. Als de concurrentie massaal in de rommelhypotheken stapt, dan kun je maar beter meedoen. Je loopt dan weliswaar het risico dat je verlies lijdt, maar datzelfde verlies lijdt de concurrentie ook, dus daar word je niet op afgerekend.

Roy van der Weide en ik hebben de gevolgen van dergelijk kuddegedrag bestudeerd in een heterogene-agentenmodel (Diks en Van der Weide 2005). Dit heterogene-agentenmodel leidt tot tijdreeksmodellen die veel gebruikt worden in de econometrie, zogenaamde *auto-regressieve moving average* (ARMA) modellen, met als prettige bijkomstigheid dat de coëfficiënten van die modellen nu kunnen worden geïnterpreteerd in termen van het gedrag van de agenten.

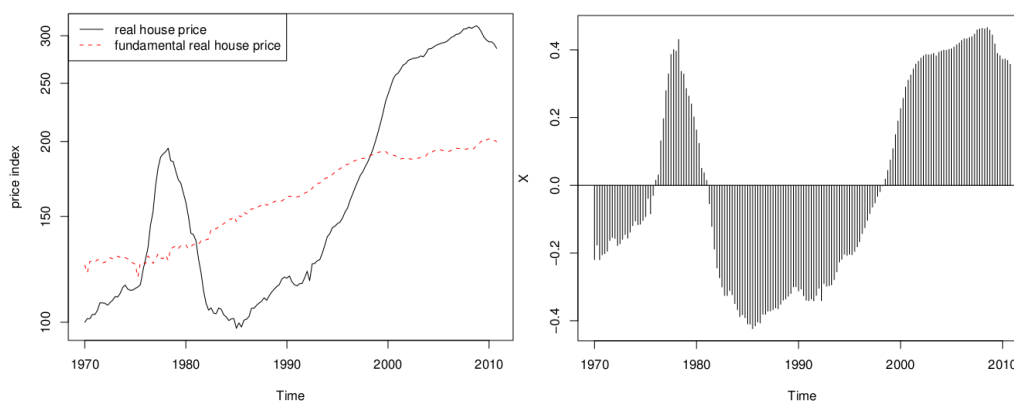
We zien in het model dat kuddegedrag leidt tot grotere afwijkingen van de marktprijs van de fundamentele prijs, dat wil zeggen, de prijs volgens de traditionele economische theorie. Als we ook veronderstellen dat niet alle agenten elke periode hun strategie evalueren, maar dat slechts een fractie van de agenten dat doet,

dan treedt er in het model ook volatiliteitsclustering op. Het verder uitbreiden van het model door te veronderstellen dat agenten verschillende maten van geheugen hebben, leidt tot prijzen met zogeheten ‘long memory’, een veel beschreven karakteristiek van financiële tijdreeksen. Bovendien voorspelt ons gedragsmodel een aantal relaties tussen de modelparameters, die we empirisch aan de hand van waargenomen wisselkoersen hebben kunnen verifiëren.

## 10 Heterogene-agentenmodel voor de huizenmarkt

Een tweede voorbeeld van een heterogene-agentenmodel dat we, samen met collega's van de Nederlandsche bank, geschat hebben, is een model voor de huizenmarkt (Bolt et al. 2011). De reden om ons te richten op de huizenmarkt is dat die markt historisch gezien vaak een leidende indicator voor crises is gebleken. In het model spelen twee soorten verwachtingen een rol: een deel van de agenten volgt de traditionele economische theorie die voorspelt dat prijzen richting de fundamentele prijs zullen bewegen, terwijl de overige agenten juist trendvolgers zijn en verwachten dat de prijs zich verder van de fundamentele prijs af zal bewegen. In het model maken de marktparticipanten een keuze tussen deze twee verwachtingsregels, en wordt toegestaan dat ze hun keuze door de tijd heen aanpassen. De voorspelregel die in het recente verleden het best gewerkt heeft levert meer nieuwe volgers op. Als veel mensen verwachten dat de prijzen zullen stijgen dan zal dat tot een hogere vraag leiden, waardoor prijzen ook inderdaad stijgen. Als prijzen daarna minder snel stijgen dan verwacht, zullen mensen weer teruggrijpen naar de fundamentele regel. Deze terugkoppeling leidt tot complexe, niet-lineaire prijsdynamica.

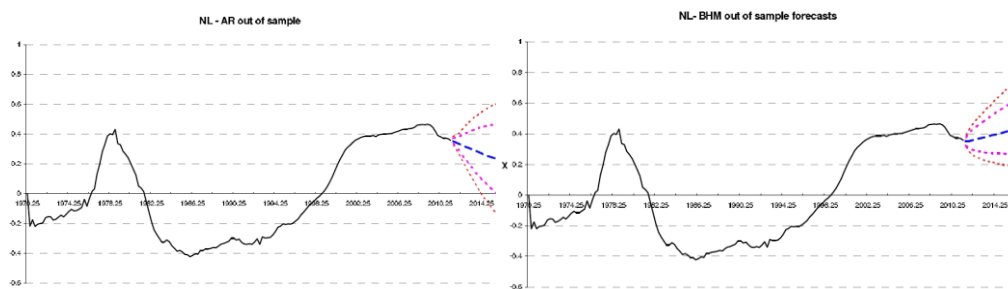
**Figuur 5** Prijs index en geschatte fundamentele waarde (links) en hun relatieve verschil (rechts).



Figuur 5 laat de huizenprijsindex zien in Nederland over de afgelopen 40 jaar. De rode onderbroken lijn in het linkerpaneel toont de fundamentele, intrinsieke prijs, bepaald aan de hand van huurprijzen, terwijl de zwarte lijn de gerealiseerde prijs

weergeeft. Het rechterpaneel toont nogmaals de prijs, maar nu in relatieve afwijking van de fundamentele prijs. Te zien valt dat, hoewel de huizenprijzen behoorlijk zijn gedaald in de laatste paar jaar, het huidige prijsniveau nog altijd zo'n 30% te hoog is ten opzichte van de historische verhouding tussen huur- en koopprijzen. Dat is slecht nieuws voor huizenbezitters zou u denken. Tenminste, als u verwacht dat de prijs terug zal gaan naar de traditionele evenwichtswaarde.

**Figuur 6** Voorspellingen gebaseerd op een lineair model (links) en het heterogene-agentenmodel (rechts).



De voorspellingen van het heterogene-agentenmodel verschillen echter fundamenteel van die van de traditionele modellen. Figuur 6 toont zogenaamde ‘fan charts’ gebaseerd op zowel een traditioneel lineair model als ons model van de Nederlandse huizenmarkt. De waaiers tonen de voorspelde waarden met voorspellingsintervallen met een betrouwbaarheid van 70 en 90 procent, respectievelijk. In ons heterogene-agentmodel, Figuur 6 rechts, is het traditionele evenwicht instabiel. Daarentegen heeft ons model twee stabiele evenwichten aan weerszijden van de fundamentele prijs. Terwijl de traditionele lineaire modellen een teruggang naar de fundamentele prijs voorspellen (Figuur 6 links), is volgens het heterogene-agentmodel de kans groter dat de prijzen juist verder af van het traditionele evenwicht bewegen.

Hoewel het model zeer gestileerd is, illustreert het toch dat een heterogene-agentenmodel kwalitatief heel andere voorspellingen kan geven dan een traditioneel rationele-agentenmodel. Als de voorspellingen van het in onze ogen realistischere heterogene-agentenmodel inderdaad zo fundamenteel anders zijn dan die van een traditioneel marktmodel, dan zal dat ook gevolgen hebben voor beleidsmaatregelen.

## 11 Toekomstig onderzoek

Tot slot wil ik kort ingaan op onze toekomstige onderzoeksagenda. Momenteel lopen er meerdere onderzoeksprojecten bij de CeNDEF-groep, die nauw aansluiten bij hetgeen ik zojuist gepresenteerd heb. In een Europees project, genaamd ‘CRISIS’ (<http://www.crisis-economics.eu/>), werken we aan het modelleren van de

recente financieel-economische crisis in Europa. Binnen het NWO Complexiteitsprogramma (<http://www.nwo.nl/complexity>) werken we samen met de Nederlandse bank aan nieuwe economisch dynamische modellen. Binnen dit onderzoek wordt aandacht besteed aan aspecten als vertrouwen en het opbouwen van spanningen in de economie. Voor de langere termijn zijn er nog vele andere facetten van ons onderzoek die aandacht behoeven. Ik noem hier slechts een aantal van de in mijn ogen belangrijkste focuspunten.

**Tijdreeksanalyse.** Naast het aanpassen van economische modellen dwingt de crisis ons tot het opnieuw doordenken van empirische onderzoeksvragen (zie bijvoorbeeld Diks 2012). De meeste geavanceerde econometrische en statistische technieken zijn ontwikkeld gedurende de relatief kalme periode tussen eind jaren 80 en 2007. Door de financiële crisis zijn er data vrijgekomen die ons dwingen om de aannamen die ten grondslag liggen aan deze technieken te heroverwegen. Zoals eerder opgemerkt is het bijvoorbeeld gebruikelijk in de tijdreeksanalyse om aan te nemen dat een waargenomen tijdreeksproces stationair is. Hoe realistisch is dit in het licht van de recente crisis en van wat onze heterogene-agentenmodellen ons vertellen over de grilligheid van economische fluctuaties? Het is essentieel om de aandacht te verschuiven van het bestuderen van stationaire tijdreeksen naar het ontwikkelen van nieuwe methoden voor het analyseren van niet-stationaire tijdreeksen afkomstig van complexe systemen.

**Confronteren van modellen met de data.** Het toetsen van theoretische modellen aan empirische waarnemingen is een belangrijke pijler van wetenschappelijk onderzoek. In andere wetenschapsgebieden, waaronder natuurkunde, scheikunde en biologie, is dat de aan de orde van de dag. Het vakgebied economie lijkt daarin nog altijd achter te lopen. Het is van belang om die achterstand zo snel mogelijk weg te werken. Er is steeds betere technologie voorhanden om data te vergaren over menselijk handelen in marktsituaties, en daar moeten we dankbaar gebruik van maken. Om een voorbeeld te noemen: binnen het Europese CRISIS-project gaan we een online game opzetten, waarin financiële crises kunnen worden nagespeeld. Naar verwachting zal dit een schat aan data opleveren over het handelen van de spelers, die bijvoorbeeld als centrale bankiers optreden in tijden van crisis.

**Rekenintensieve schattingsmethoden.** Modellen worden steeds complexer, en daarmee ook het schatten van modelparameters. Tegenwoordig worden vaak rekenintensieve technieken, zoals Markov Chain Monte Carlo-methoden, gebruikt voor het schatten van parameters. Een groot nadeel van deze methoden is dat ze vaak langzaam de parameter ruimte verkennen. Met onder anderen Jasper Vrugt en Cajo ter.

Braak en mensen van het Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem Dynamica (IBED, <http://ibed.uva.nl>), onder wie Willem Bouten en Koos Verstraten, werk ik aan technieken om deze methoden dusdanig aan te passen dat ze veel efficiënter worden in het verkennen van de parameter ruimte. Een van onze recente methoden,

het zogenaamde DREAM-algoritme, maakt gebruik van meerdere Markov-ketens, die met elkaar communiceren en zo de efficiëntie van het algoritme verhogen. Hiervoor blijkt veel vraag te bestaan vanuit verschillende wetenschappelijke disciplines. Ook binnen de econometrie en wiskundige economie zijn er voor deze nieuwe methoden talloze toepassingen te vinden, bijvoorbeeld voor het schatten van parameters in heterogene-agentenmodellen.

**Early-warning signals.** Complexe systemen hebben vaak meerdere evenwichten. Onder invloed van langzaam variërende externe omstandigheden, kan het voorkomen dat een evenwicht een kantelpunt bereikt waar het overgaat van stabiel naar instabiel. Als dat gebeurt, kan het systeem plots zeer snel naar een nieuw evenwicht overgaan. Dit wordt een kritische transitie genoemd. De Wageningse onderzoeker Marten Scheffer en zijn collega's hebben laten zien dat de statistische eigenschappen van tijdreeksen anders worden bij het naderen van een kantelpunt (Scheffer et al. 2012). In het bijzonder nemen de autocorrelatie en de variantie toe nabij een kantelpunt. Dit biedt de mogelijkheid om uit tijdreeksen zogenaamde 'Early Warning Signals' te halen, die je vertellen dat het systeem een kantelpunt nadert. Als een crisis een kritische transitie is, dan betekent dit dat we een crisis wellicht al kunnen zien aankomen aan de hand van veranderende statistische eigenschappen van prijsfluctuaties. Dit is een mogelijkheid die we momenteel zowel theoretisch als aan de hand van tijdreeksen onderzoeken. Hieraan zal ik de komende jaren met Juanxi Wang en andere CeNDEF-onderzoekers werken.

Deze onderzoeksonderwerpen zijn actueler en urgenter dan ooit, en ik ben zeer gemotiveerd om daar mijn bijdragen aan te leveren.

#### Auteur

Cees Diks (e-mail: [C.G.H.Diks@uva.nl](mailto:C.G.H.Diks@uva.nl)) is hoogleraar Data-analyse en Economische Statistiek aan de Universiteit van Amsterdam. Hij is gespecialiseerd in niet-lineaire economische dynamica en het ontwikkelen van nieuwe statistische technieken binnen de niet-lineaire tijdreeksanalyse.

#### Literatuur

- Ball, P., 2012., *Why Society is a Complex Matter*, Springer, Berlin.
- Bekiros, S., en C.G.H. Diks, 2008, The relationship between crude oil spot and futures prices: cointegration, linear and nonlinear causality, *Energy Economics*, vol. 30(5): 2673-85.
- Bolt, W., M. Demertzis, C.G.H. Diks en M.J. van der Leij, 2011, Complex methods in economics: An example of behavioral heterogeneity in house prices, DNB Working Paper 329, De Nederlandsche Bank.



- Brock, W.A., W.D. Dechert, J.A. Scheinkman en B. LeBaron, 1996, A test for independence based on the correlation dimension, *Econometric Reviews*, vol. 15(3): 197-235.
- Brock, W., en C. Hommes, 1997, Rational route to randomness, *Econometrica*, vol. 65(5): 1059-95.
- Brock, W., en C. Hommes, 1998, Heterogeneous beliefs and routes to chaos in a simple asset pricing model, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 22(8-9): 1235-74.
- Conway, E., 2009, IMF puts total cost of crisis at £7.1 trillion, *The Telegraph*, 8 augustus 2009.  
(<http://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/banksandfinance/5995810/IMF-puts-total-cost-of-crisis-at-7.1-trillion.html>)
- Diks, C., 2012, What can we learn from the crisis?, AENORM 75.  
([http://www.aenorm.nl/files/nlaenorm2012/file/article\\_pdfs/wpn2a\\_preface.pdf](http://www.aenorm.nl/files/nlaenorm2012/file/article_pdfs/wpn2a_preface.pdf))
- Diks, C.G.H., V. Panchenko en D.J. van Dijk, 2011, Likelihood-based scoring rules for comparing density forecasts in tails, *Journal of Econometrics*, vol. 163(2): 215-30.
- Diks, C., en V. Panchenko, 2006, A new statistic and practical guidelines for nonparametric Granger causality testing, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 30(9-10): 1647-69.
- Diks, C., en R. van der Weide, 2005, Herding, a-synchronous updating and heterogeneity in memory in a CBS, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 29(4): 741-63.
- Granger, C.W.J., 1969, Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods, *Econometrica*, vol. 37(3): 424-38.
- Grassberger, P. en I. Procaccia, 1983, Characterization of strange attractors, *Physical Review Letters*, vol. 50(5): 346-49.
- Keynes, J.M., 1936, *The General Theory of Unemployment, Interest and Money*, MacMillan, London.
- Lorenz, E., 1963, Deterministic nonperiodic flow, *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 20(2): 130-41.
- Poincaré, H., 1898, Sur la stabilité du système solaire, *Revue Scientifique*, vol. 20, 609-13.
- Scheffer, M., S.R. Carpenter, T.M. Lenton, J. Bascompte, W. Brock, V. Dakos, J. van de Koppel, I.A. van de Leemput, S.A. Levin, E.H. van Nes, M. Pascual en J. Vandermeer, 2012, Anticipating critical transitions, *Science*, vol. 338: 344-48.
- Schweitzer, F., G. Fagiolo, D. Sornette, F. Vega-Redondo, A. Vespignani en D.R. White, 2009, Economic networks: The new challenges, *Science*, vol. 325(5939): 422-25.
- Shiller, R., 1981, Do stock prices move too much to be justified by subsequent changes in dividends? *American Economic Review*, vol. 71(3): 421-36.
- Simon, H., 1957, *Models of Man*, Wiley, New York.
- Smith, A., 1776, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, W. Strahan, London.
- Takens, F., 1981, Detecting strange attractors in turbulence, in: D.A. Rand en L.-S. Young (eds), *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*, Lecture Notes in Mathematics 898, Springer, Berlin, pp. 366-381.
- Tversky, A., en D. Kahneman, 1974, Judgment under uncertainty: heuristics and biases, *Scienc*, vol. 185(45157): 1124-31.
- VPRO, 2010, Tegenlicht documentaire "Money and Speed: Inside the Black Box" over de Flash Crash van 6 mei (<http://tegenlicht.vpro.nl> en <http://www.youtube.com>).
- Walras, L., 1874, *Éléments d'économie Politique Pure, ou Théorie de la Richesse Sociale*.