

# Bewegen, maar waarheen? Dynamiek en onzekerheid in techniek en economie

## Citation for published version (APA):

van der Grinten, P. M. E. M. (2003). *Bewegen, maar waarheen? Dynamiek en onzekerheid in techniek en economie: Afscheidscollege van Prof. Dr. Ir. P.M.E.M. van der Grinten*. (1 ed.) Universiteit Maastricht.

## Document status and date:

Published: 12/12/2003

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# **Bewegen, maar waarheen?**

**Dynamiek en onzekerheid in techniek en economie**

## **Colofon**

*Basisontwerp en realisatie: Unigraphic, Universiteit Maastricht*

*ISBN 90-5681-184-3*

*Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur of uitgever.*

# **Bewegen, maar waarheen?**

**Dynamiek en onzekerheid in techniek en economie**

**Afscheidscollege**

Op 12 december 2003  
uitgesproken

door

**Prof. Dr. Ir. P.M.E.M. van der Grinten**

Hoogleraar Concernplanning aan de Universiteit  
Maastricht



**Universiteit Maastricht**



## Bewegen, maar waarheen?

### Dynamiek en onzekerheid in techniek en economie

#### Signalen en ruis

Gewoonlijk houdt een hoogleraar maar éénmaal een intree- en uit-treerede. Mijn intree- en uit-treerede stamt uit 1969 aan de RUG. Met deze uit-treerede wil ik dan ook leeropdrachten afsluiten die ik vóór de UM heb vervuld als een soort zwervend docent in deeltijd aan de TUD, de RUG, de TUE en de ULB (Brussel). Dat lijkt wellicht wat lastig omdat het leeropdrachten betreft in verschillende vakgebieden aan verschillende faculteiten: Scheikundige Technologie, Toegepaste Wiskunde, Technische Natuurkunde, Sciences Appliquées en tenslotte dus Economische Wetenschappen en Bedrijfskunde. Toch zal ik u proberen aan te tonen dat er een lijn en verband bestaat tussen deze opdrachten, althans in de wijze waarop ik daaraan invulling heb proberen te geven. Dat verband is al een beetje aangeduid in de ondertitel van deze rede: "Dynamiek en Onzekerheid in techniek en economie". Dat zijn interessante thema's uit het vakgebied dat wel eens *systeemtechniek* wordt genoemd. Daarin tracht men processen (systemen) en signalen (veranderlijken) te beschrijven middels dynamische modellen. Het doel is om vervolgens met deze kennis de systemen zo goed mogelijk te sturen naar een opgegeven doel, ondanks de onzekere veranderingen in de omgeving, de storingen. Het systeem kan een elektronisch apparaat zijn of een schip, een chemische installatie of een volledige fabriek, maar ook een onderneming of een nog grotere economische entiteit. Daarbij moet overigens worden aangetekend dat die laatste dikwijls zodanig door de politiek of emoties worden beïnvloed dat van logische analyse en meetbare doelstelling weinig sprake kan zijn.

Het woord "sturen" kan al naar gelang de toepassing dan ook gelezen worden als regelen, optimaliseren, besturen, plannen of strategisch ontwikkelen, dit alles in afdalende volgorde van exactheid en mede daarom ook in de tijdsvolgorde waarin ik het vak beoefend heb. Wellicht is dat ook de reden dat mij op de TU's wel eens verweten werd te veel economie in het onderwijs te stoppen en op de UM te veel techniek en gereken. In ieder geval zal ik u in dit gesproken verhaal door mijn vele interesses en mijn bescheiden bijdragen in het vak leiden, zonder formules en vaktaal. In de schriftelijke versie zal dat gemis iets worden gecompenseerd middels voetnoten en appendices.

U hoorde mij het woord *elektronica* noemen. Dat is het vakgebied van mijn eerste opleiding in de ingenieurswetenschappen en daar werd ik ook voor het eerst geconfronteerd met de fenomenen dynamica en onzekerheid. Mijn afstudeeropdracht in Delft ging over de geleiding van elektromagnetische golven (radio signalen) langs de buitenkant van een enkele draad. De golven bleken zich, onder zekere voorwaarden, tijdens de voortplanting aan de draad vast te kleven en zo een goedkoop communicatiekanaal op te leveren. Experimenten in de praktijk brachten echter aan het licht dat een grote hoeveelheid ruis werd opgewekt en dat het open systeem erg gevoelig was voor externe storingen. Zodanig zelfs dat de over te zenden signalen door de storende ruis werden overstemd. Speciale dynamische filters bleken nodig om de signaal/ruis verhouding te verbeteren. In het huidige tijdsbestek zouden we trouwens het open systeem ook wantrouwen vanwege de signalen kunnen lekken naar de boze buitenwereld of hackers die gemakkelijk kunnen binnendringen.

U hoorde mij ook een *ship* noemen als voorbeeld van een dynamisch systeem dat accuraat bestuurd moet worden. Dat kan inderdaad slaan op het werk van de navigator en de stuurman die het dikwijls traag en zelfs averechts reagerende schip naar zijn doel moeten dirigeren ondanks storende windvlagen, golven en stromingen. Mijn persoonlijke ervaring, opgedaan tijdens mijn diensttijd als officier bij de Koninklijke Marine, ligt echter op een dieper vlak, namelijk in het vooronder van een onderzeeër, door leken wel eens duikboot genoemd. Daar luisterde ik uiterst langdurig door een honderdtal hydrofoons (onderwatermicrofoons) naar vijandelijke scheepsbewegingen. Er waren daar twee problemen van dynamica en onzekerheid: hoe kun je honderd op de scheepshuid vast gemonteerde hydrofoons zo richten dat ze als een scherpe bundel alleen in de gewenste richting zoeken en alle van elders komende signalen negeren; en hoe kun je onderscheid maken tussen het geruis van de golven en dat van de vijandelijke scheepsschroeven? Het eerste probleem werd opgelost door elke hydrofoon een vertraging te geven die overeenkomt met zijn afstand tot het doel zodat alle hydrofoons in gelijke fase zijn en zo een scherpe akoestische schijnwerper kunnen vormen. Het tweede probleem betreft weer signaal-ruis scheiding, waarbij het signaal het geruis van de te detecteren scheepsschroef is. Dat probleem is beter oplosbaar naarmate de statistische patronen van beide ruisbronnen beter bekend zijn. De vingervorm van het signaal van de vijand is dikwijls al in kaart gebracht door spionage, tegenwoor-

dig intelligence genoemd. Het ruispatroon van de golven is ook goed in kaart te brengen als functie van de weersgesteldheid, de diepte, de temperatuur etc., maar bovendien ook te meten met een hydrofoon die niet op de vijand is gericht. Met al deze gegevens kan een zogenaamd "matched filter" worden ontworpen waarbij het type, de snelheid en de vaar-richting van het vijandelijke schip op 10 mijl afstand kunnen worden vastgesteld zonder dat zelf signalen zijn uitgezonden. Dit is dus een fraai voorbeeld van de dynamische behandeling van signalen en informatie met het oogmerk de onzekerheid te verminderen en de doelen dichter te benaderen.

In het vervolg van deze voordracht komen dit soort problemen terug maar dan is het woord vijand vervangen door concurrent, zeegolven door conjunctuurgolven en scheepsbewegingen door activiteiten van de concurrent en de markt.

### Dynamische productieprocessen. Stabiliserende regeling.

Inmiddels bestudeerde ik bij DSM, mijn gewaardeerde hoofdwerkgever gedurende 40 jaar, de besturing van chemische reactoren, destillatiekolommen en andere log reagerende en moeilijk in het gareel te houden systemen. Log reageren betekent hier dat de dynamische eigen-

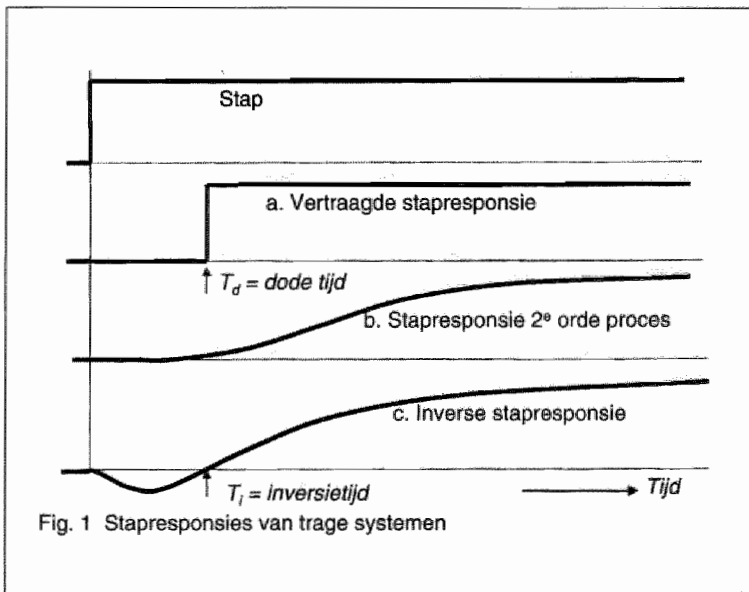


Fig. 1 Stapresponsies van trage systemen



schappen voornamelijk bestaan uit vertragingen die ontstaan omdat er materiaal en energie in de installatie moet worden getransporteerd en getransformeerd. Het duurt soms wel een half uur voordat een storing in de toevoer van een destillatiekolom merkbaar is aan de uitgang: de zogenaamde looptijd of dode tijd. Sommige responsies kunnen zelfs een invers karakter hebben: aanvankelijk negatief en pas na enige tijd (de inversietijd) positief. Ook het systeem "mens" heeft hier soms last van, zeker het balorige type. De regelbaarheid van dit soort systemen is daarom gering, zeker als dynamische storingen wisselen binnen een tijd die kort is vergeleken met de dode tijd of de inversietijd. (Appendix B 1, Fig.1, pag. 7). Als men dan een afwijking aan de uitgang constateert is het te laat om nog in te grijpen middels een terugkoppelende of feedback regeling. Indien men echter in staat is om de ingangsstoring te lokaliseren en te meten, is het mogelijk om het systeem al bij voorbaat zo te regelen dat de storing wordt opgevangen (feedforward), maar men moet de dynamische eigenschappen van het proces dan wel goed kennen. Voor processen waaraan zeer hoge eisen worden gesteld wordt dikwijls een combinatie van feedforward en feedback voorgesteld (Fig.2). In algemene bewoordingen gesteld: meet de storingen die op het proces inwerken en doe al bij voorbaat ingrepen die de invloed van de storing compenseren. Als er na verloop van tijd aan de uitgang toch nog afwij-

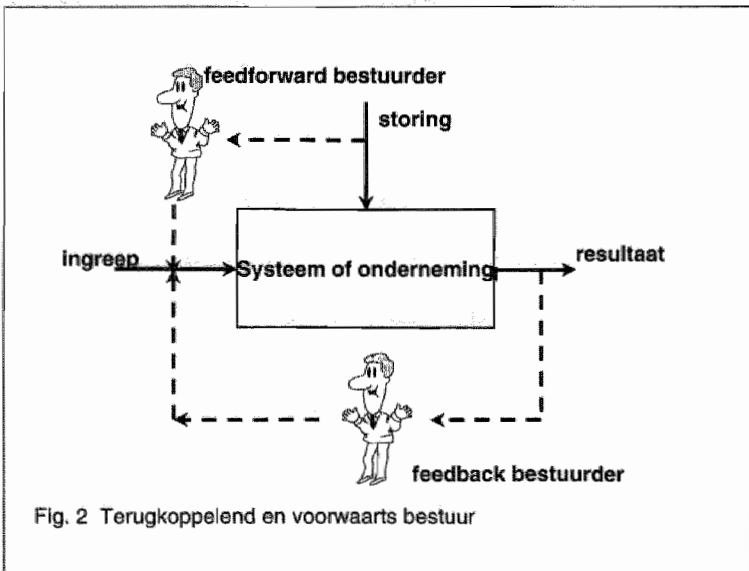


Fig. 2 Terugkoppelend en voorwaarts bestuur

kingen worden geconstateerd, bijv. afkomstig van niet of slecht gemeenten storingen, dan wordt alsnog via feedback ingegrepen, zij het dat dan alleen nog maar de langzame verstoringen kunnen worden aangepakt. Als bijvoorbeeld in een chemische reactor de druk en de temperatuur nauwkeurig moeten worden geregeld kan het nuttig zijn om de temperatuurwisselingen in de toevoer te meten en al bij voorbaat en in de juiste sterkte door te geven aan de verwarmingsregelaar. Bij het kwantitatief analyseren en ontwerpen van dit soort regelsystemen heb ik veel inzicht kunnen ontlenu aan de definitie van de zogenaamde regelbaarheidsfactor, die de dynamiek van de storing afweegt tegen de dynamiek van het proces en zo laat zien wat de maximale storingsreductie is die in deze gevallen is te bereiken (Appendix B2-5). De analogie met de regeling van economische processen zal u wellicht al duidelijk zijn, of anders binnen korte tijd duidelijk worden.

### Optimaliserende regeling

Optimaliserende regeling gaat een stap verder. Aannemende dat de storingen door kundige regeltechnici goeddeels zijn geëlimineerd of gecompenseerd en dat de belangrijkste procesvariabelen stabiel en nauwkeurig op hun gewenste waarden worden gehouden, dan is de

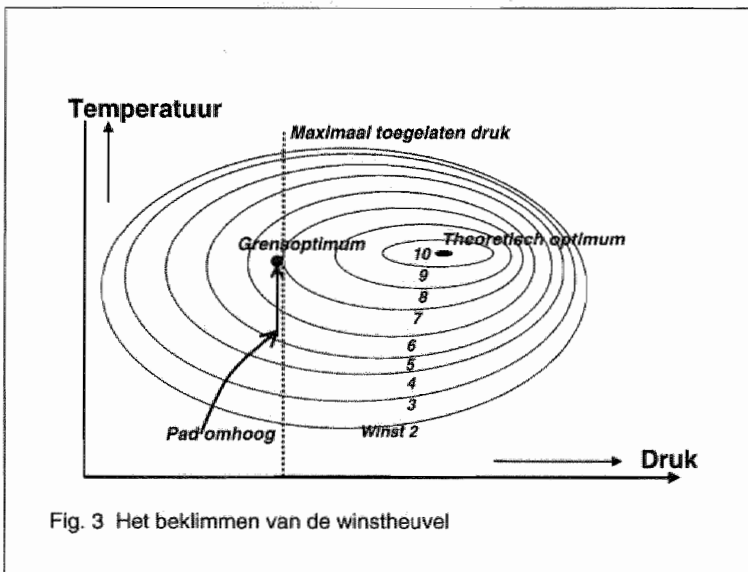


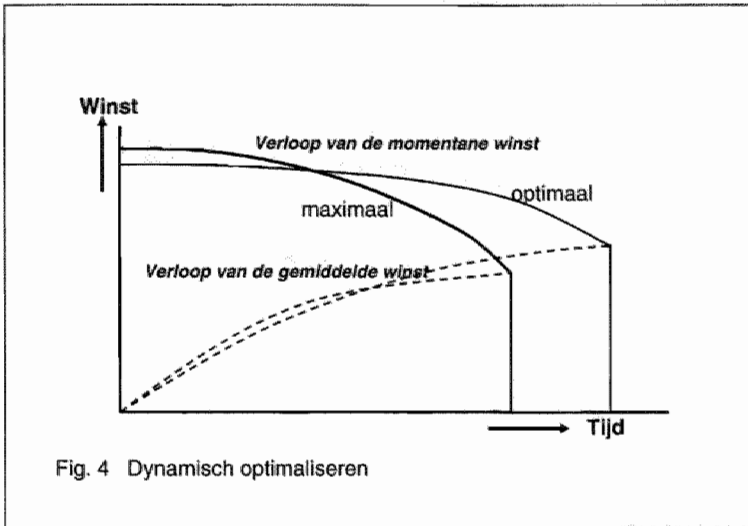
Fig. 3 Het beklimmen van de winsthevel

vraag: wat zijn eigenlijk de gewenste waarden? Wat is de combinatie van procesvariabelen die het hoogste profijt oplevert binnen de opgelegde grenzen van veilig en milieubewust produceren? De hiervoor te hanteren modellen worden ingewikkelder en mathematisch lastiger te hanteren vanwege niet-lineariteiten, hogere orde dynamica en niet stationariteit. Toch zijn er interessante resultaten te bereiken door de modellen te vereenvoudigen tot kwalitatief juiste (dus theoretisch gefundeerde) doch experimenteel kwantitatief te preciseren bestanden. Daarna kan een mathematische of experimentele beklimming van de winstheuvel plaatsvinden tot een grens bereikt wordt. Dan kan in vertraagd tempo nog langs de grens worden voort geklommen tot een grensoptimum is bereikt. (Fig.3, pag.9) Een probleem ontstaat als inmiddels het landschap is veranderd, dus als het model de veranderende omgeving niet meer voldoende dekt. Dit kan worden beschouwd als een langzame storing waarmee door voortdurende herijking en adaptie van het model rekening kan worden gehouden. We schieten op een bewegend doel.

De werkelijke problematiek ligt echter op een ander vlak: wat is de juiste definitie van profijt of winst; hoe hangt de prestatie van dit proces samen met de andere verbonden processen en vooral met de markt. Uit verschillende experimenten bleek dat een andere markt vraag of ander grondstoffenaanbod tot geheel andere instellingen kan leiden. Het verschil tussen productiebeperking en marktbeperking blijkt een grote invloed te hebben op de optimale instellingen van het productieproces. Grofweg gezegd zal bij dreigende productiebeperking of ondercapaciteit de doelstelling gelegen zijn in de maximalisering van de productie en bij marktbeperking is de doelstelling een minimalisering van de grondstoffen. Veranderingen in de markt vragen derhalve een grote flexibiliteit van de productiebedrijven en een groot bereik van modellen en regelsystemen. De analogie met de gewenste geheel verschillende ondernemingsstrategieën in geval van een aanbodeconomie dan wel een vraageconomie is gemakkelijk in te zien.

### **Lange termijn optimalisering**

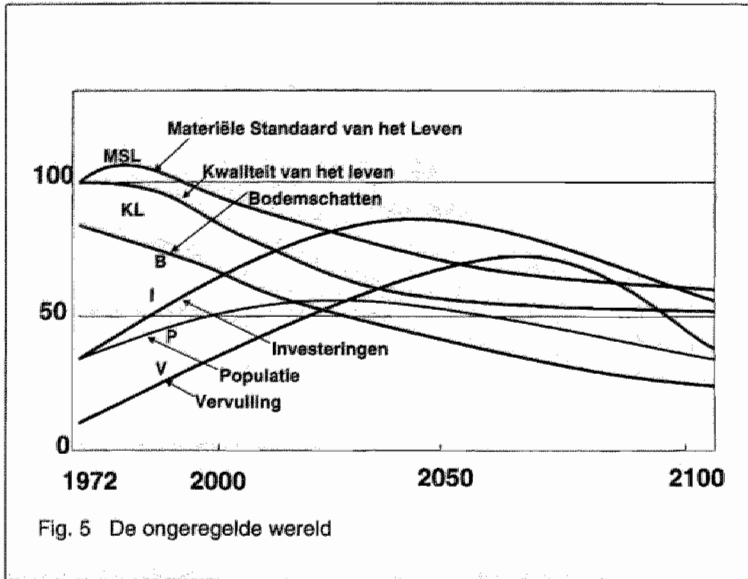
Een interessante complicatie treedt op als de te besturen systemen niet stationair blijken te zijn. Het is dan dikwijls beter om niet te streven naar optimalisering van de momentane winst doch eerder van de gemiddelde winst over de hele niet-stationaire periode, het zogenaamde dynamisch optimaliseren. Een door mij veelvuldig bestudeerd pro-



bleem is de technische installatie die verslijt en door het gebruik in prestatie achteruit gaat. Bij DSM werden de belangrijkste basisgrondstoffen, etheen en ammoniak, gemaakt in reactoren die vervuilden en deactiveerden naargelang de hoogte en intensiteit van de productie. In deze gevallen bleek de gemiddelde winst over de gehele levensduur maximaal te zijn als de installatie in de beginperiode niet voluit wordt belast doch tegen het einde, als de gemiddelde winst gelijk is geworden aan de momentane winst, is maximalisering geen bezwaar meer. (Appendix B6, Fig. 4). De verhoging van de gemiddelde winst die aldus is te bereiken kan aanzienlijk zijn en wordt vooral bereikt door de verlenging van de levensduur van de installatie. Het is zoals met een nieuwe automobiel die de eigenaar meestal direct na de aanschaf niet te zwaar zal belasten doch vlak voor de inruil wel eens flink wil afjakkeren. Theoretisch is dit dus een verantwoord gedrag.

### Werelddynamica. Grenzen aan de groei?

Het voorbeeld van de jakkerende automobilist werd door de Club van Rome gebruikt om de wereldburgers duidelijk te maken dat het toenemend verbruik van de wereldgrondstoffen en van het wereldmilieu door een sterk toenemende wereldbevolking tot een te korte economische levensduur van onze globe zou leiden en dat het einde al in zicht zou zijn. Ingrepen zijn nodig om de levenscyclus te verlengen, zeker als men



beseft dat inruil hier niet mogelijk is. U begrijpt mijn interesse in het dynamische wereldmodel van Forrester en Meadows dat ik via bevriende relaties in 1971 in handen kreeg (Appendix B 11). Een vereenvoudigde simulatie op een analoge computer toonde inderdaad het gedrag van een uitdovende wereld (Fig. 5). De toenemende bevolking en investeringen doen de vervuiling extra snel toenemen en de grondstoffenvoorraad afnemen. Door de vervuiling zal op den duur de bevolking weer afnemen en door het gebrek aan grondstoffen zal ook het investeringsniveau en de welvaart drastisch afnemen. De wereld eindigt volgens dit model dus met een snik en niet met een knal, tenzij er nog onzekere factoren een rol gaan spelen zoals wereldrampen dan wel een wereldregering die nog kan ingrijpen. Of wellicht een nieuw en beter model dat laat zien dat het allemaal zo erg niet is en hanteerbaar blijft en dat toch vernieuwing en gedeeltelijke inruil van de wereld mogelijk zou zijn. Ondanks alle kritiek op dit sterk geaggregeerde wereldmodel en de aangetoonde kwantitatieve fouten kende ik het een aantal verdiensten toe in de publicaties en de heftige discussies die toen gevoerd werden:

- Ten eerste: het model zit structureel goed in elkaar, geeft dus tendensen weer en kan ook gebruikt worden om het effect van tegengaatregelen te onderzoeken. Bijvoorbeeld het invoeren van een terugkoppelend beleid waarbij elke procentuele overschrijding van

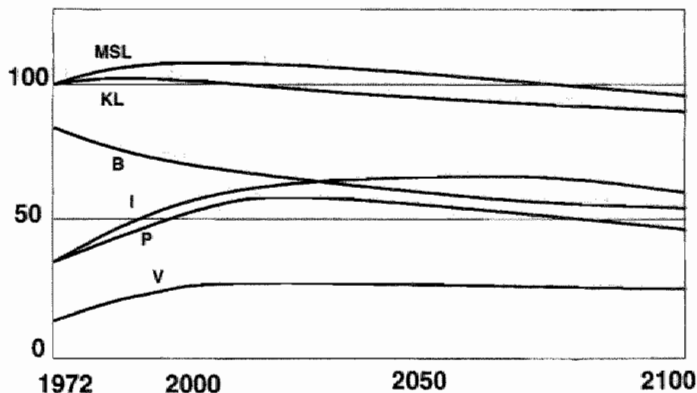


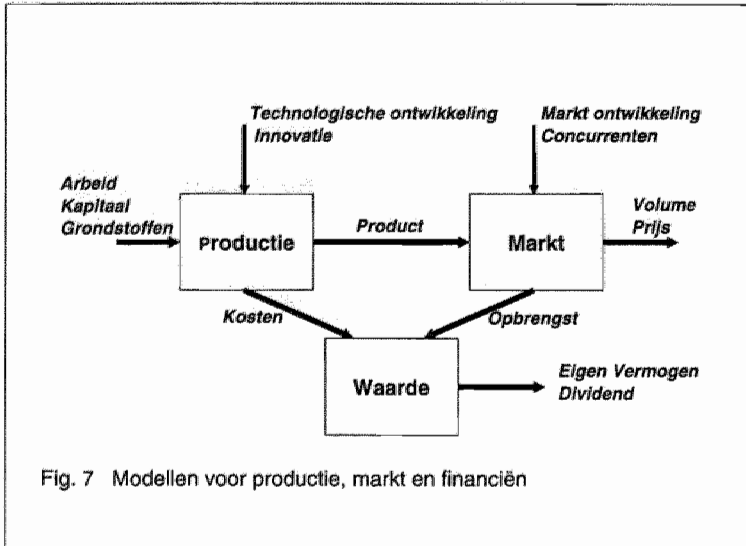
Fig. 6 De geregelde wereld

de huidige normen voor milieu- en grondstoffenvoorraad leidt tot een proportioneel procentuele besteding van het wereldinkomen voor de bescherming van het milieu respectievelijk de bodemschatten (Fig. 6). U ziet in de grafieken dat door deze terugkoppelende besturing een veel stabielere wereld kan ontstaan.

- Ten tweede: het heeft de discussie op gang gebracht over deze lange termijn wereldproblemen en de noodzaak om te werken aan een wereld autoriteit om tot ingrijpen te kunnen komen. Dat dit laatste een groot probleem is illustreren de laatste wereldconferenties over milieu, grondstoffen, handel en recht (o.a. Kyoto, Cancun).
- Ten derde: het heeft een uitdagende werking om te komen tot meer inzicht en dus betere en verder gesegregeerde modellen van de lange termijn effecten die deze wereld gaan beheersen. Nog veel multidisciplinaire studies zullen moeten volgen om tot hanteerbare beleidsinstrumenten te kunnen komen. Deze universiteit zou daar wellicht een rol in kunnen spelen.

### Ondernemingsplanning in turbulentie

Uit het tot nu toe beschreven historische verloop van mijn werkzaamheden en bijdragen op het gebied van de besturing van dynamische



processen blijkt dat deze langzamerhand in een duidelijker economische context zijn terechtgekomen. Dat werd nog eens benadrukt toen ik bij DSM verantwoordelijk werd gesteld voor de strategische planning en ontwikkeling van de onderneming. Dat bood ruimschoots de gelegenheid om de dynamische samenhang tussen een groot aantal productieprocessen en markten in kaart te brengen en te besturen in een zeer turbulente periode (Fig. 7). Majeure economische storingen in de 70-er jaren waren de eerste en tweede oliecrisis en de duidelijke omslag van een vraag-economie naar een aanbod-economie. In productieterminologie betekent dat een omslag van ondercapaciteit naar overcapaciteit. In marketingtermen een omslag van een volumestrategie naar een prijsstrategie, gepaard gaande met een enorme toename van de competitieve intensiteit. Vele bedrijfstakken, ook de chemische, betraden de volwassen fase waar een groeistrategie niet meer mogelijk is, maar naar innovatieve doorbraken moet worden omgekeken om de continuïteit te waarborgen.

Maar in systeemterminologie bleek sprake van dezelfde basisproblematiek als weleer, namelijk:

- Bouw het procesmodel op: d.w.z. bepaal de eigen mogelijkheden; doe een sterkte-zwakteonderzoek en een positiebepaling ten opzichte van de concurrenten.

- Bouw een storingsmodel op: d.w.z. bepaal de onzekere economische en technologische omstandigheden en de richting waarin de markten zich bewegen; doe een kansen-dreigingen onderzoek; neem waar wat de concurrentie in het schild voert en waar openingen worden geboden: zoek het gat in de markt.
- Bouw een daarop gebaseerde sturing in de richting van de doelstellingen. Snelheid en flexibiliteit van de organisatie zijn hier opnieuw belangrijke vereisten.

De trage en soms averechtse reactie op de rukken aan het ondernemingsstuur kan frustrerend werken op degene die de dynamica niet begrijpt of er geen rekening mee wil houden. Maar het kost nu eenmaal tijd voor een besluit tot investeren of acquireren is uitgevoerd en de autonome penetratie van markten kan ook alleen maar geleidelijk. De beloofde project cashflow wil dan ook wel eens lange tijd negatief blijven, zeker als er cyclisch is geïnvesteerd. Bovendien geven nieuwe procédés en nieuwe markten nogal eens aanleiding tot verrassingen. Onzekerheden zullen nooit helemaal verdwenen zijn, maar kunnen door ervaring en filtering hopelijk teruggebracht worden tot een aanvaardbaar niveau.

Laten we iets nader ingaan op twee belangrijke dynamische elementen in de strategische planning: de levenscyclus van een afzonderlijke

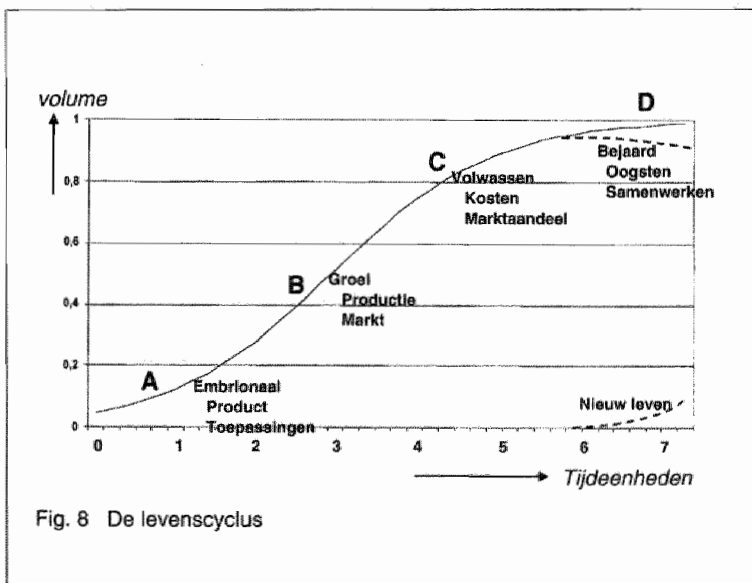


Fig. 8 De levenscyclus

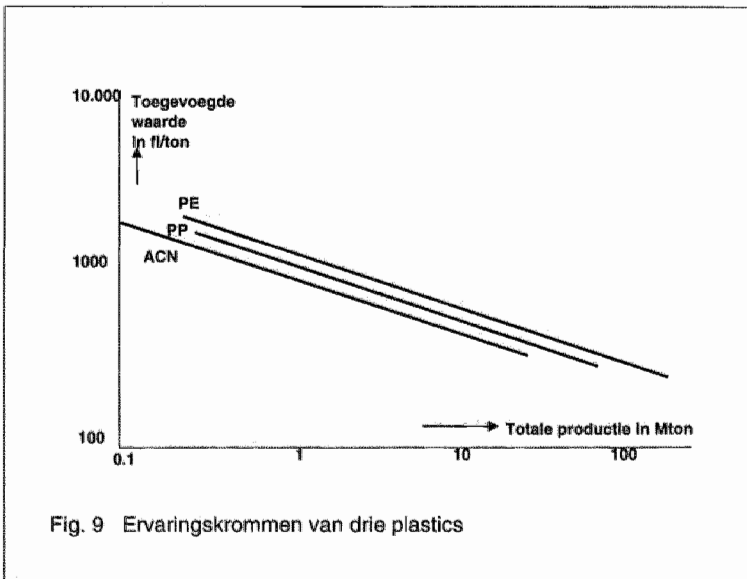


product-markt combinatie en de portfolio evolutie van een onderneming met diverse product-markt eenheden.

## De levenscyclus

De levenscyclus van een product laat het dynamisch verloop zien van het volume van een bepaald product dat in de markt wordt afgezet (Appendix B 7, Fig. 8, pag. 15). Een theoretisch verdedigbaar verloop heeft een S-vorm: het begint met een exponentiële groei, daarna zwakt de groei af en begint een langzame benadering van het verzadigingsniveau. Tot slot kan een neergang ontstaan indien verdringende producten op de markt komen. Een goede inschatting van het buigpunt (de tijdconstante) van deze S-kromme en het bereikbare verzadigingsniveau geeft een belangrijk uitgangspunt voor de planning. Natuurlijk zal de werkelijkheid zich anders gedragen door allerlei onzekere factoren, zoals veranderingen in de economie, acties van de concurrenten en doorbraken in de technologie. Doch elk van deze onzekerheden kan op een flexibele manier verwerkt worden in de voortdurende monitoring van de levenscyclus.

Behalve het volume is natuurlijk ook het dynamisch verloop van de prijs van het product van belang voor de planning. De kostprijs heeft



over het algemeen een dalend verloop (Appendix B8, Fig. 9). Onder de druk van de concurrentie wordt men gedwongen tot productiviteitsverhoging en kostenbesparing. Daarin slaagt men des te beter naarmate men meer ervaring heeft met de productie en marketing van het betreffende product. Het is in vele gevallen statistisch vastgesteld dat de kostprijs met een vast percentage daalt, bijvoorbeeld met 25%, als het totaal geproduceerde volume verdubbelt, de zogenaamde ervaringskromme. De geproduceerde hoeveelheid product is namelijk een goede maat voor de ervaring die een lerende ondernemer gebruikt om beter en efficiënter te produceren en te marketen. Ook voor deze efficiëntieverhoging bestaan verschillende wetmatigheden, zoals de regels van de schaalvergroting, de automatiseringsgraad, de distributienetwerken etc.

Aan de hand van deze twee dynamische verschijnselen van volume en prijs is al een eerste inzicht te geven in mogelijke strategieën die een ondernemer kan volgen om tot een goede besturing van deze product-marktcombinatie te komen. Tijdens de eerste embryonale fase zal de nadruk liggen op de innovatie, differentiatie en ontwikkeling van de nieuwe product-markteenheid. Het volume mag nog laag zijn, de prijs echter hoog omdat het nieuwe product betere kwaliteit en functionaliteit biedt. Ook de onzekerheden zullen nog hoog zijn: de tijdconstante en het verzadigingsniveau van de markt zijn nog niet goed ingeschat en de positie ten opzichte van de concurrenten is nog ongewis. Op elk moment kan het project in deze periode nog worden afgeblazen zonder te grote afboekingen. Heeft het product echter een vooraanstaande positie in de markt tijdig bewezen dan breekt de tweede fase aan: die van groei, uitbreiding en verovering van een groot marktaandeel. Dit vergt uiteraard investeringen en derhalve meer zekerheid omtrent de toekomstperspectieven. Van de andere kant geeft groei ook de mogelijkheid om te profiteren van schaalvergroting en dus kostprijsverlaging waarmee de concurrentiepositie kan worden versterkt: de ervaringskromme begint haar werk te doen. Toch komt er een moment dat de marktgroei begint te stagneren: de volwassen fase kondigt zich aan. Er is geen groei meer en degenen die toch nog investeren creëren overcapaciteit en derhalve prijsdalingen. Het adagium wordt nu kostenverlaging, stabilisatie van het marktaandeel en generatie van cashflow ten behoeve van de toekomstige opvolgende product-markt eenheden. De laatste fase tenslotte is de bejaarde en zich terugtrekkende periode: de markt wordt planmatig verlaten, te beginnen met de slechtste klanten. Wellicht kan worden overwogen door verkoop of liquidatie te versnellen

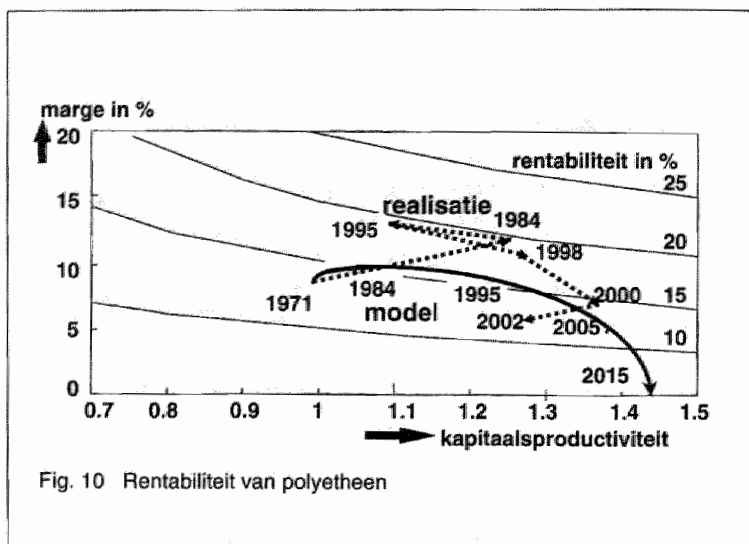


Fig. 10 Rentabiliteit van polyetheen

en de liquide middelen aan te wenden voor embryonale of groeiende activiteiten elders in de onderneming. Dat is dan de start van een portfolio opbouw.

### Dynamische kentallen

Aldus volgen de strategieën voor een product-markteenheid elkaar op: ontwikkelen, groeien, stabiliseren en terugtrekken. Elke fase heeft zijn eigen dynamische karakteristieken in techniek, marketing, financiering en bedrijfsvoering. Een belangrijk hulpmiddel om de voortgang van de strategie door deze fases kritisch te volgen is de dynamische ratio-analyse (Fig.10). Tijdens de ontwikkelingsfase zal de marge moeten stijgen om te bewijzen dat een levensvatbaar product op de markt wordt gezet. In de groeifase zal men de marge proberen vast te houden en de productiviteit laten stijgen, vooral door schaalvoordelen. In de volwassen fase komt de marge onder druk van de concurrentie maar is de productiviteit nog te verhogen door rationalisatie, automatisering en kostenbesparing. Pas in de bejaarde fase zullen zowel marge als productiviteit onder druk staan. De rentabiliteit, immers het product van marge en productiviteit, daalt dan snel tot waarden die onacceptabel zijn en tot liquidatie doen besluiten.

Ter illustratie toon ik u dynamisch verloop van deze kentallen gege-

neroord door een markt-, productie- en financieringsmodel dat gehanteerd is bij onze postdoctorale opleiding van register controllers (Appendix B 10). Het model is geijkt op een polyetheenfabriek en de groeivoorzichten van de markt in een vroeg jaar in de levenscyclus (1975). De studenten konden laten zien dat theoretisch inderdaad de bovengenoemde strategie kan leiden tot langdurige stabilisatie van de rentabiliteit ondanks dalende marges en afnemende groei. De werkelijke prestatie van de onderneming waarop het model was geijkt is ook in de grafiek weergegeven. Vooral vanwege de conjunctuurgolven wijkt deze af van de theorie, maar toch niet veel en zelfs in gunstige zin.

### **Inverse responsies**

De meest interessante combinatie van dynamica en onzekerheid treedt op bij de grote investeringen in de groeifase. Eigenlijk gaat hier om de meest belangrijke beslissing van een ondernemer: investeren of niet investeren en wanneer, hoe groot en hoe snel? Het hoofdprobleem is natuurlijk gelegen in de inverse responsie van een investering. Na de beslissing volgt een lange tijd (de inversietijd) van negatieve cashflow waarin de productie installaties worden gebouwd en de markt wordt voorbereid op de komende grote volumes. Economen en andere bezorgde burgers hebben hier een hekel aan omdat de verliezen dichtbij en zeker zijn, terwijl de beloofde winsten veraf en onzeker zijn. Natuurlijk is bij de investeringsbeslissing deze negatieve cashflow meegenomen, waarbij men heeft trachten te aan te tonen dat die overtroffen wordt door de gediscoteerde positieve cashflow op langere termijn. Als dan na een of meerdere jaren de productie goed op gang is gekomen kunnen de conjuncturele omstandigheden of andere omgevingsfactoren echter aanmerkelijk gewijzigd zijn of kan blijken dat de gehanteerde marktmodellen niet (meer) accuraat zijn. Dit klemt des te meer naarmate de wisselingen in de omgeving ongeveer dezelfde cyclusduur vertonen als de inversietijd van het project. De regelbaarheid van het project is dan zeer laag als men de cashflow als maat voor het succes beschouwt en daarmee een terugkoppelende besturing wil uitvoeren. Relatief kleine vertragingen in de marktgroei kunnen een aanmerkelijke vertraging betekenen van het moment dat de cashflow weer positief wordt en zeker van het moment dat de cumulatieve cashflow positief wordt, dus het project zich heeft terugverdiend.

Een oplossing van dit probleem van lage regelbaarheid kan worden gevonden door te streven naar een voorwaarts koppelend beleid.

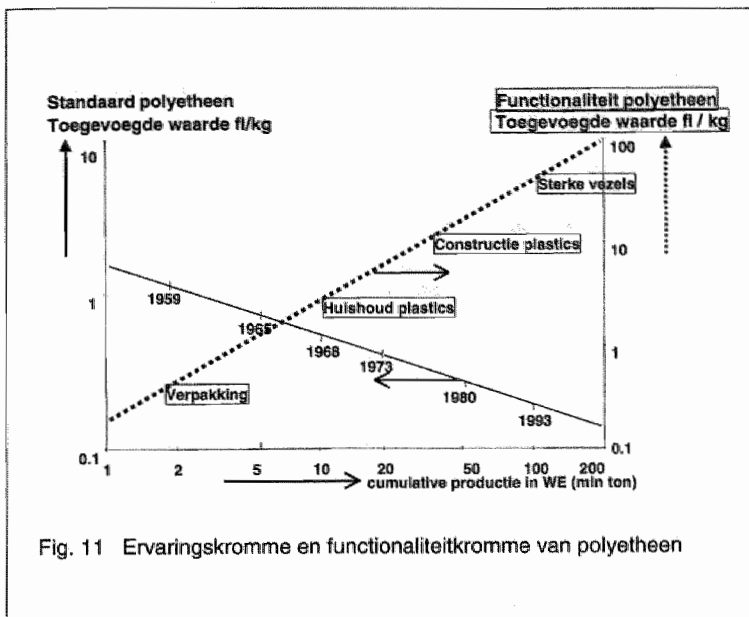
Als men de belangrijkste storing, in dit geval waarschijnlijk de conjunctuur, kan monitoren en voorspellen dan is de dynamica van het project nog wellicht zo te beïnvloeden dat de storingen worden opgevangen. Heel triviaal maar uiterst effectief is in dit verband het anticyclisch investeren, dus de timing van de investering aanpassen aan de dynamiek van het proces en van de storing. Timing is uiterst belangrijk als strategische vrijheidsgraad, die in de praktijk dikwijls wordt overschaadwd door opportunisme. Bij zeer innovatieve projecten bestaan deze voorspellende besturingen natuurlijk veel minder. Daar betekent timing vooral het bezit van geduld en doorzettingsvermogen. Voor deze projecten zijn discounted cashflow criteria dan ook niet bruikbaar en zelfs dodelijk indien niet een verre horizon en een lage disconteringsvoet worden aangenomen. De kans op een werkelijke doorbraak is een beter criterium. Het is te betreuren dat vele ondernemingen, onder de druk van de aandeelhouders, uit zijn op te snelle winsten en te hoge voorkeursvoeten hanteren om langlopende innovatie projecten te kunnen steunen met geld en kennis.

### **Portfolio-strategie**

De continuïteit van een onderneming kan worden bevorderd door het beheren van meerdere product-markt eenheden. Een goede portfolio moet voldoen aan minstens drie voorwaarden:

- er moet een spreiding zijn zodat de kwetsbaarheid voor externe of interne storingen wordt verminderd;
- er moet synergie en onderlinge steun mogelijk zijn tussen de eenheden;
- ze moeten elkaar kunnen opvolgen als trekpaarden voor de totale onderneming.

De aandeelhouders zouden het hier niet mee eens kunnen zijn omdat zij zelf door spreiding continuïteit in hun beleggingportfolio nastreven. Toch zal de kundige ondernemer middels de genoemde voorwaarden van spreiding, synergie en timing een betere bijdrage aan de continuïteit kunnen geven, desnoods tegen de zin van de aandeelhouder. Deze uitspraak om de macht van de aandeelhouder op dit punt te beperken is bewust gedaan, contrair aan de huidige ontwikkeling op het gebied van corporate governance, mede naar aanleiding van een recente aandeelhouders vergadering van onderneming in de "high tech" branche. Op cash beluste aandeelhouders dienden een motie in om een zeer profijtelijke, ontwikkelende en groeiende dochteronderneming te verkopen en de opbrengst uit te keren. Men beseftte kennelijk niet dat door deze



motie alleen al de marktwaarde van deze dochteronderneming zou dalen, maar vooral dat de ondernemer nu niet meer zijn portfolio kan onderhouden, daardoor zijn continuïteit op het spel moet zetten, kortom niet meer kan ondernemen. Mede daarom heb ik mijn commissariaat bij deze onderneming neergelegd.

Ter illustratie van een geslaagde portfolio ontwikkeling voer ik de producent van het bulk-plastic polyetheen weer ten tonele. Deze werd in de volwassen fase geconfronteerd met dalende prijzen conform de ervaringskromme, met dalende marges en met afname van de groei in de massatoepassingen. Door zijn grote kennis en ervaring met dit materiaal slaagde hij erin diverse nieuwe types polyetheen te ontwikkelen met hoogwaardige toepassingen, vooral gelegen in constructie onderdelen en uitmondend in een vezel sterker dan staal. De opbrengst is dan het tien- tot honderdvoudige van het eenvoudige polyetheen gebruikt als verpakkingmateriaal, zij het in veel kleinere volumes en pas na langdurige inwechtperioden. Op de *functionaliteitskromme* (Fig.11) scoren de nieuwe productgroepen Constructieplastics en Sterke Vezels aanmerkelijk hoger dan oorspronkelijke basis polyetheen en zij voldoen uitstekend aan de voorwaarden van synergie en opvolging in de tijd. Zodanig zelfs dat de businessseenheid polyetheen door de betreffende onderneming inmiddels profijtelijk kon worden afgestoten.

Het eerste belangrijke kenmerk van een product-markt eenheid is uiteraard zijn positie in de levenscyclus, omdat daaruit de vooruitzichten op langere termijn voor het betreffende product zijn af te lezen. Een behoorlijke verdeling van de eenheden over de levenscyclus komt tegemoet aan de continuïteitsvoorwaarden van spreiding en opvolging.

Een ander belangrijk kenmerk is de sterkte van die eenheid ten opzichte van de concurrenten in dezelfde markt. Dit is zeker van belang bij producten die al gevorderd zijn in de levenscyclus en die zich waarschijnlijk al in een sterk competitieve omgeving bewegen waarbij de levensvatbaarheid ter discussie kan komen. Door beide kenmerken, positie in de levenscyclus en competitieve positie, te meten en in een diagram te zetten kan men inzicht krijgen in de gezondheid van een portfolio en in de mogelijke strategie voor een nadere aanpassing en vernieuwing vorm te geven (fig.12). Ook is visueel gemakkelijk aan te geven in welke gebieden een gevaar voor de continuïteit gaat ontstaan en uiteindelijk zelfs tot tijdig afstoten moet worden overgegaan. Gezonde ondernemingen dienen zolang mogelijk boven de diagonaal te blijven. Anders gezegd: jonge producten mogen nog zwak zijn, oudere producten moeten sterk zijn.

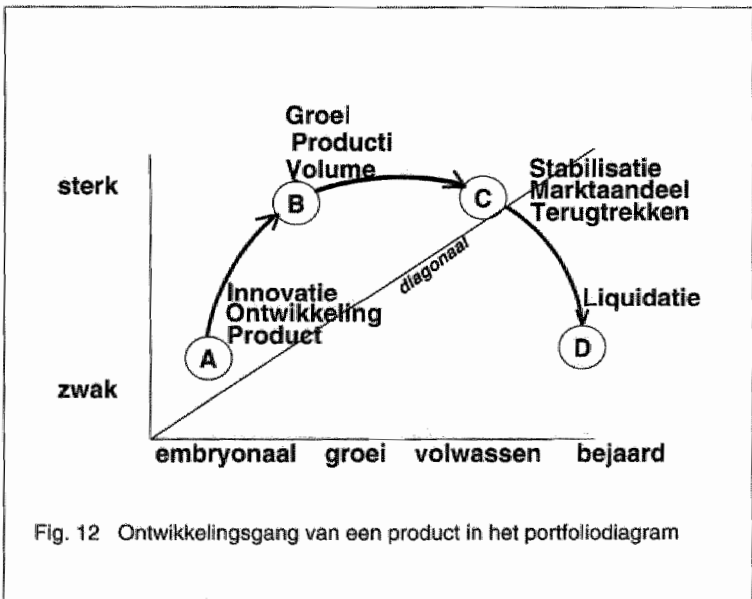


Fig. 12 Ontwikkelingsgang van een product in het portfoliodiagram

## Concurrentie strategie

Een gezonde dynamische strategie van een business eenheid gaat als volgt:

In de allereerste fase A van de levenscyclus ligt de nadruk op product- en marktontwikkeling. Daar is pioniersgeest voor nodig en slagvaardigheid. De positie ten opzichte van de concurrenten is nog moeilijk te bepalen; meestal zijn er nog geen rechtstreekse concurrenten. Wel zijn er concurrerende producten die verdrongen moeten worden op basis van de betere kwaliteit en functionaliteit van het nieuw aangeboden product. Uitdrukkelijk dus niet op basis van prijzen, die eerder hoger zullen kunnen zijn vanwege de premie die voor betere kwaliteit kan worden gevraagd. De strategie is er opgericht zo snel mogelijk het gat in de markt te openen en een sterke positie in te nemen in het begin van de levenscyclus, zij het op kleine schaal en zonder te grote technische investeringen.

Heeft men de sterpositie B van een sterke concurrentiepositie in een beginnende levenscyclus bereikt dan kan de groeistrategie aanvangen. Hier zijn bouwers en globalisten voor nodig. Hier zullen ook de grote investeringsbeslissingen moeten worden genomen. De ontwikkelaar zal de nadruk van het product naar de productie verleggen en door schaalvergroting de eerste verbeteringen in de productiviteit incasseren. De bereikte kostprijsverlaging hoeft wellicht nog niet geheel aan de markt te worden doorgegeven omdat bij weinig concurrentie de ervaringskromme nog niet effectief is. Deze mooie leiderspositie zou men zo lang mogelijk willen behouden.

Doch onvermijdelijk zullen na enige tijd de eerste tekenen van een naderende verzadiging en volwassen positie C zich aandienen. Ook de concurrentie zal door de hoge marges zijn aangetrokken. Behoud van marktaandeel en verdere uitbreiding van de markt kan dan vooral geschieden middels prijsverlaging dus het accepteren van een lagere marge. Als tegelijkertijd nog een groter volume kan worden afgezet kan dit toch nog tot hogere rentabiliteiten leiden. Als echter het einde van de groei definitief is geconstateerd staat geen andere weg open voor behoud van marktaandeel dan kostenverlaging en rationalisering: de groeistrategie dient te worden verlaten en over te gaan in een stabilisatiestrategie. Deze staat van volwassenheid kan en moet lang worden volgehouden en kan voor de leiders grote kasstromen opleveren; er behoeven immers geen grote investeringen meer te worden gedaan.



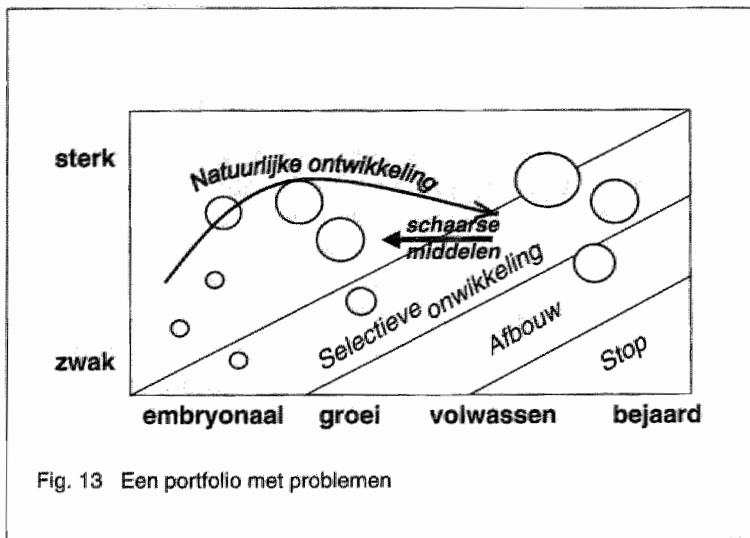


Fig. 13 Een portfolio met problemen

De werkelijk bejaarde fase D breekt aan als de concurrentie door goedkopere producenten of door betere opvolgende producten niet meer tot een positieve kasstroom leidt. Langzame strategische terugtrekking kan nog enige tijd positieve resultaten opleveren door het eerst afscheid te nemen van slechte klanten. Maar als men de leidersrol in de markt reeds heeft verloren levert tijdige overdracht van het bedrijf meer liquiditeiten op.

Tijdens het doorlopen van deze vier fases in het leven is het duidelijk dat gedurende de twee eerste fases een grote behoefte bestaat aan schaarse middelen, kapitaal, kennis en arbeid. In de twee volgende fasen bestaat er juist, althans bij goed beleid, een overschot aan deze schaarse middelen. Deze zouden dan ter beschikking moeten komen van bedrijfsonderdelen die zich nog in de eerste fases van de levenscyclus bevinden. (Fig.13). Een goed portfolio beleid is derhalve gericht op een zodanige spreiding van de business units dat voldoende sterke volwassenen aanwezig zijn om de jongeren te steunen. Bij voldoende kasoverschot of eigen vermogen kan zelfs overwogen worden om een acquisitie te plegen in het groeitraject. Dit kan de portfoliovernieuwing sneller laten verlopen dan een autonome ontwikkeling doch zal toch een tijdelijk lage kasstroom veroorzaken wegens integratiekosten en zal ook minder unieke posities opleveren. Zo kan continuïteit en stabiliteit worden bereikt door een dynamisch portfolio beleid, dus door een gecoördi-

neerd en gestimuleerd dynamisch gedrag van de eenheden. Dit gaat dus verder dan de strategie van "de boel een beetje bij elkaar houden", zoals een bekend burgemeester onlangs als zijn ondernemingsdoel formuleerde.

### Tot slot: De cyclus van het leven

De dynamische levenscyclus van technische en economische systemen is natuurlijk maar een saaie analogie van de echte biologische cyclus van het leven, met name van het menselijke leven. De kleuters die de volle bescherming van hun ouders nodig hebben, de pubers die geestelijke en lichamelijke groei als kernactiviteit hebben en ook nog steun en leiding nodig hebben, de volwassenen die sterk moeten zijn om al die steun te kunnen verlenen en ook zichzelf staande te houden in deze competitieve maatschappij en de bejaarden die, mits nog steeds sterk en gezond, nog lange tijd kunnen overleven en anderen van hun verworvenheden laten delen. Ik heb de eerste drie fases thans afgelegd en het moet worden gezegd met groot genoegen en dankbaarheid voor allen die mij bijstonden.

Ook in professioneel opzicht was er sprake van een levenscyclus. Die startte met de intensieve opleidingen aan de TUD en TUE waar gepoogd werd het front van de techniek te bereiken. Daarna volgde een periode

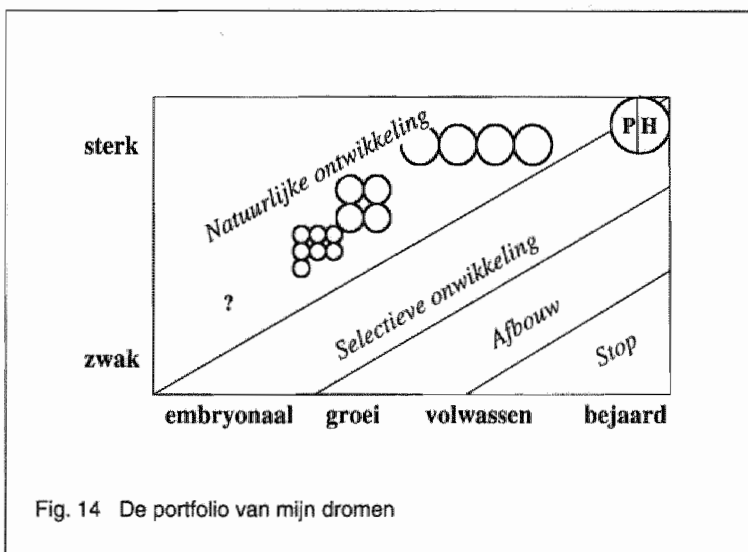


Fig. 14 De portfolio van mijn dromen

van research en publiceren op het Centraal Laboratorium van DSM. Vervolgens kwam de periode van uitvoeren en managen en tenslotte van beleid maken bij DSM. Tijdens en na deze perioden heb ik met plezier onderwijs verzorgd over mijn vakgebieden en studenten kunnen laten delen in mijn ervaringen en inzichten. Ik dank mijn collega's bij DSM en bij de Universiteit voor hun steun om deze soms conflicterende taken te kunnen vervullen.

Ik word vandaag officieel bejaard en verhuis naar het uiterste rechterdeel van de portfolio (Fig.14, pag.25). Dank zij Hetty, mijn lieve echtgenote sinds precies 45 jaar, hopen we zelfs gezamenlijk in de sterke rechter bovenhoek van dat diagram terecht te komen. Het meeste voldoening geeft echter de manier waarop we de rest van de portfolio hebben kunnen invullen: 4 dynamische kinderen, allen nu volwassen en sterk, hebben ons verblijd met 11 uiterst dynamische kleinkinderen die zich thans bevinden in de kleuter en puberfase. Zij doen precies wat de strategie in die fases aanbeveelt en bevinden zich dus ruim boven de diagonaal.

Dit alles biedt een redelijke kans op een goed evenwicht in de stromen van schaarse middelen, kennis, afhankelijkheid en liefde en dus op continuïteit van onze eenheid. Dat die stromen in twee richtingen gaan bewijst het geargumenteerde advies van mijn kleinzoons welke nieuwe auto ik nu moet kopen en welke nieuwe computer, om vervolgens op te houden met hen en U de les te lezen. Hetgeen ik bij deze doe.

Ik heb gezegd.

## Appendix A

### Conclusies in de vorm van stellingen

#### *Over systemen en modellen*

- Systeemtechniek is met vrucht toe te passen op het analyseren en besturen van dynamische economische systemen in turbulente omgevingen zoals ondernemingen.
- Bruikbare modellen hoeven niet ingewikkeld te zijn als ze structureel maar goed zijn en door herhaalde ijking aan de realiteit kunnen worden vastgeklonken.
- De ervaringskromme en de functionaliteitskromme zijn structureel goed en ijkbaar.
- De dynamische levenscyclus van een product is het belangrijkste gegeven bij het ontwerpen van een strategie. Het is van belang om die regelmatig te herijken.
- De productportfolio van een onderneming is een belangrijk hulpmiddel bij het uitzetten van een vernieuwingsstrategie. Het is van belang om die regelmatig te herijken.

#### *Over ondernemen en investeren*

- In tijden van turbulentie is timing van de investeringsbeslissing van groot belang, doch na de beslissing is snelheid van uitvoering cruciaal voor de concurrentiepositie.
- Anticyclisch investeren in groei vraagt vertrouwen in en kennis van de dynamiek van de omgeving, maar kan zeer gunstig uitwerken op de terugverdiensijd.
- Investeringsen in embryonale en innovatieve producten kunnen niet alleen met discounted cashflow methoden worden beoordeeld. Een langdurige terugverdiensijd moet worden gezien met geduld en vertrouwen in een uiteindelijke doorbraak.
- De controller, het economisch geweten van de onderneming, kan aan de hand van een analyse van dynamische kentallen de strategie van een onderneming bewaken.

#### *Over stakeholders*

- Aandeelhouders streven naar korte termijn winsten, maar de ondernemer moet ook de lange termijn continuïteit nastreven ten faveure van de andere stakeholders: de medewerkers, leveranciers en klanten.

- Aandeelhouders willen zelf hun beleggingsportfolio maken, maar de ondernemer dient toch zijn eigen businessportfolio op te bouwen, ook hier vanwege de lange termijn continuïteit.

## Appendix B

### Eenvoudige wiskundige modellen die dikwijls de werkelijkheid goed benaderen.

- 1a.  $H(s) = \exp(-sT_d)$   
Overdrachtsfunctie H van een proces gekenmerkt door een looptijd  $T_d$   
De Stapresponsie is een met  $T_d$  vertraagde stap, zie figuur 5a.
- 1b.  $H(s) = 1 / \{(1+sT_1)(1+sT_2)\}$   
Overdrachtsfunctie van een tweede orde proces met tijdconstanten  $T_1$  en  $T_2$   
De Stapresponsie, zie figuur 5b, kan geïjkt worden op vele processen met hogere orde dynamica. ( $s$  is de Laplace operator)
- 1c.  $H(s) = (1-sT_1) / \{(1+sT_1)(1+sT_2)\}$   
Overdrachtsfunctie van een proces met inversietijd  $T_1$  en tijdconstanten  $T_1$  en  $T_2$   
De Stapresponsie toont een invers karakter gedurende ongeveer  $T_1$ . Zie Figuur 5c.
2.  $\Phi_{xx}(\tau) = \overline{x(t) \cdot x(t+\tau)}$   
Autocorrelatiefunctie van het stochastische signaal  $x$ .  
Bij een eerste orde signaal geldt:  $\Phi_{xx}(\tau) = \sigma_x^2 \exp(-\tau/T_x)$   
Waarin  $T_x$  de signaaltijdconstante of correlatietijd is.  
Vele stochastische signalen kunnen goed worden benaderd door een overheersende tijdconstante  $T_x$  en de variantie  $\sigma_x^2$ .
3.  $\sigma_e^2 = \sigma_x^2 (1-r^2)$   
Variantie van de restfout  $e$  na optimale regeling van de storing  $x$  bij regelbaarheidsfactor  $r$ .
4.  $r_d = \exp(-T_d/T_x)$   
Regelbaarheidsfactor bij een proces met looptijd en storing met hoofdtijdconstante  $T_x$ .

$$5. r_i = (1-T_i/T_x) / (1+T_i/T_x)$$

Regelbaarheidsfactor bij een proces gekenmerkt door inverse responsietijd  $T_i$

$$6. W_{gem} = (T+T_r)^{-1} \int_0^T W dt$$

Gemiddelde winst bij bedrijfstijd  $T$  en reparatietijd  $T_r$ .

De optimale bedrijfstijd is bereikt als  $W = W_{gem}$ . Zie figuur 4.

$$7. Y = 1 / \{1 + (Y_v/Y_s - 1) \exp(-T/T_m)\}$$

De levenscyclus met tijdconstante  $T_m$ . Zie figuur 8.

Volume  $Y$  wordt bereikt op tijd  $T$  na start bij volume  $Y_s$  gaande naar verzadiging  $Y_v$ .

In figuur 8 is eindvolume 1 en beginvolume 0.05 gekozen.  $T_m = 1$  jaar. Gedurende twee jaar is exponentiele groei aanwezig, dan volgen 2 jaar van lineaire groei en daarna volgen 2 jaar van afzwakkende groei en tenslotte stabilisatie. Het buigpunt ligt hier bij 3 jaar.

$T_m$  en  $Y_s$  moeten worden geijkt.

$$8. P/P_i = (E/E_i)^e$$

De ervaringskromme. Zie figuur 9.

De prijs  $P$  ten opzichte van de beginprijs  $P_i$  neemt af naarmate de ervaring  $E$  toeneemt ten opzichte van de beginervaring  $E_i$ . Ervaring wordt steeds uitgedrukt in totaal geproduceerde hoeveelheden. De ervaringsfactor  $e$  ligt tussen -0.2 en -0.3.

Nb. De toegevoegde waarde in reël geld toont meestal een nog betere correlatie met de ervaring dan de prijs. Ervaringsfactoren moeten worden geijkt.

$$9. K_2/K_1 = (O_2/O_1)^p$$

De productiviteitsformule bij schaafeffecten.

De kapitaalsvergroting  $K_2/K_1$  is minder dan de omzetvergroting  $O_2/O_1$  als de productiviteitsfactor  $p$  kleiner is dan 1. Een waarde van bijv.  $p=0.6$  zegt dus dat een verdubbeling van de omzet kan worden behaald met slechts 60% meer geïnvesteerd kapitaal. Voor de arbeidsproductiviteit  $L_2/L_1$  gelden nog wel lagere waarden, bijvoorbeeld  $p=0.2$  terwijl voor de grondstofproductiviteit  $G_2/G_1$  meestal waarden tussen 0.95 en 0.99 worden gevonden. Productiviteitsfactoren moeten worden geijkt.

10. Het Ondernemingsmodel zoals gebruikt in strategieoefeningen bij postdoctoraal onderwijs:

$W=O-G-A-L$	Winst = Omzet-Grondstoffen-Afschrijvingen-Lonen
$WvB=W-i.VV$	Winst voor Belasting = Winst - interestvoet. Vreemd Vermogen ( $i=0.06$ )
$NW=WvB-b.WvB$	Netto Winst=Winst voor Belasting - belasting voet.WinstvB ( $b=0.35$ )
$Div=d.NW$	Dividend = dividendPayout.Netto Winst ( $d=0.4$ )
$EV_2=EV_1+(1-d).NW$	Eigen Vermogen dit jaar=EV vorig jaar + ingehouden winst
$VV=K-EV$	Vreemd Vermogen = Kapitaal-Eigen Vermogen
$c.K=O$	Omzetsnelheid.Kapitaal = Omzet ( $c=2$ )

Dit is een vereenvoudigd financieel dynamisch model van een onderneming. Door dit model te koppelen aan het productiemodel (vergelijkingen onder 9) en het marktmodel (vergelijkingen onder 7 en 8) en vervolgens te ijken op een bepaalde branche wordt een totaal dynamisch model verkregen dat bruikbaar is om strategieën te toetsen zoals de investeringstrategie, de dividend- en financieringstrategie, de marktvolume en prijsstrategie en de productiviteitsstrategie. Zie ook fig.7. Ook de timing van liquidatie en innovatie kan hiermee worden geanalyseerd en aldus helpen bij het opbouwen van een evenwichtige portefeuille.

11. Wereldmodel, afgeleid van Wereld 2 door Forrester en Meadows.

$dP/dt = 0.04 ak_1P - 0.028k_2P$	Toename van de bevolking door geboorte-sterfte
$dI/dt = 0.05bk_3I - 0.025 B$	Toename van de investeringen door productie-schaarste
$dB/dt = -ck_4I$	Afname bodemschatten door investeringen
$dV/dt = dk_5IP - V/T_v$	Toename vervuiling door bevolkingsdruk-zelfreiniging

Hierin is P de populatie, I het investeringsniveau, B de bodemschatten en V de vervuiling en  $T_v$  de halfwaardetijd van de vervuiling. De vergelijkingen zijn gekoppeld door de factoren  $k_1 \dots k_5$  die geijkt moeten worden. De factoren a, b, c en d zijn stuurfactoren; in ongeregelde toestand (de "ontregelde wereld") zijn die gelijk aan 1. Zie fig. 5

