

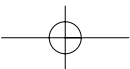
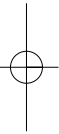
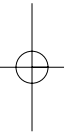


**Universiteit Twente**  
*de ondernemende universiteit*



## **Het verleggen van grenzen bij het regelen**

door Prof. dr. A.A. Stoorvogel



# Het verleggen van grenzen bij het regelen

Rede uitgesproken bij  
het aanvaarden van het ambt  
van hoogleraar

## Wiskundige Systeem- en Besturingstheorie

aan de faculteit Elektrotechniek,  
Wiskunde en Informatica  
van de Universiteit Twente  
op donderdag 6 maart 2008  
door

Prof.dr. A.A. Stoorvogel

**Mijnheer de Rector Magnificus  
Collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire  
gemeenschap, zeer gewaardeerde toehoorders, dames en heren,**

Na een studie in Leiden, heb ik 20 jaar gewerkt aan de Technische Universiteit Eindhoven. Daarnaast heb ik ook 6 jaar aan de Technische Universiteit Delft gewerkt en ik ben langere tijd op bezoek geweest bij de University of Michigan en de Washington State University. Ik heb afgelopen jaren dus heel wat universiteiten gezien maar ik ben de 40 intussen wel gepasseerd. Toen de midlife crisis toesloeg heb ik nog even de sportauto overwogen maar in plaats daarvan heb ik mijn leven helemaal overhoop gehaald en ben naar deze universiteit vertrokken. Ik ben nu een jaar werkzaam aan de Universiteit Twente. In deze voordracht wil ik u laten zien waarom dit een goede keuze is geweest en daarnaast wil ik u mijn plannen voor de komende jaren ontvouwen.

Zoals gebruikelijk, zal ik onderzoek, onderwijs en de bestuurlijke kant de revue laten passeren en eindigen met een dankwoord.

4

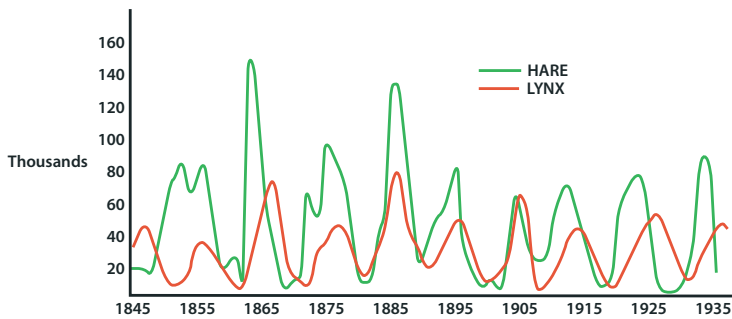
Het verleggen van grenzen bij het regelen

## Onderzoek

Mijn vakgebied is de wiskundige systeem- en regeltheorie. Nu heeft een ieder wel een (meestal incorrect) idee wat wiskunde inhoudt maar de term “Systeem- en regeltheorie” behoeft toch enige toelichting. Regeltheorie heeft alles te maken met terugkoppeling. We zien terugkoppe-



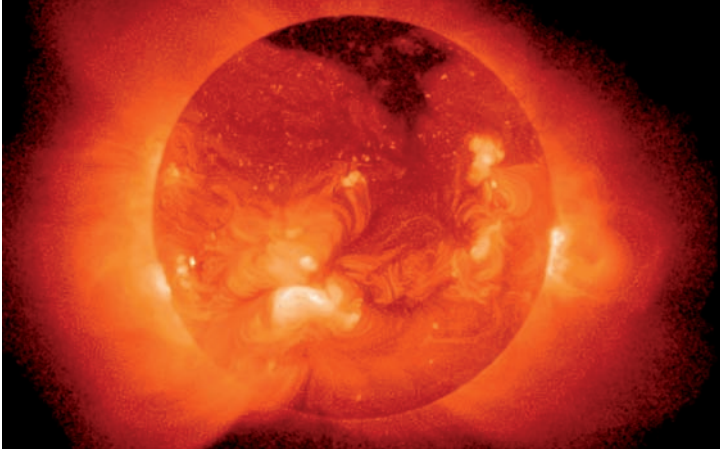
ling op veel plaatsen maar een mooie manier om het concept te introduceren is te kijken naar de natuur om ons heen. Een klassiek voorbeeld is in de ecologie. Het aantal lynxen in Canada bleek sterk gekoppeld aan het aantal sneeuwzhazen. Het aantal lynxen neemt toe als er meer voedsel beschikbaar is. Lynxen eten sneeuwzhazen en daardoor neemt het aantal lynxen toe als er meer sneeuwzhazen zijn; een positieve terugkoppeling. Omgekeerd, als er meer lynxen zijn dan neemt het aantal sneeuwzhazen af doordat ze opgegeten worden; een negatieve terugkoppeling. Dit zorgt voor een golfbeweging zoals we zien in de grafiek (afkomstig van Odum, Fundamentals of Ecology, Saunders, 1953).



Het bijbehorende klassieke wiskundige model is het Lotka-Volterra model. Een andere vorm van terugkoppeling zien we in modellen van de opwarming van de aarde. Opwarming van de aarde zorgt voor smeltend ijs. Hierdoor is



er meer donkere grond en neemt het weerkaatsingsvermogen voor zonlicht af. Dit zorgt er dan weer voor dat de temperatuur toeneemt. We zien ook dat het permanent bevroren ijs rond de polen veel CO<sub>2</sub> bevat. Door het smelten van de ijskap als gevolg van de toenemende temperatuur, neemt de CO<sub>2</sub> concentratie in de lucht toe en dit zorgt dan weer voor een verdere toename van de



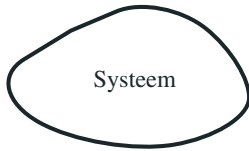
temperatuur. Plankton is een belangrijke factor voor de reductie van  $\text{CO}_2$ . Maar door toename van de temperatuur neemt de hoeveelheid plankton af en daardoor neemt de concentratie van  $\text{CO}_2$  toe en dit zorgt voor een verder toename van de temperatuur. In de biologie zien we steeds meer modellen voor het gedrag van bijvoorbeeld cellen waar het concept van terugkoppeling een belangrijke rol speelt. Binnen de systeembioologie is een goede kennis van het concept van terugkoppeling dan ook belangrijk voor het begrijpen van het kwalitatieve en kwantitatieve gedrag.

Vandaar dat er ook vanuit de systeemtheorie steeds meer belangstelling is voor de biologie.

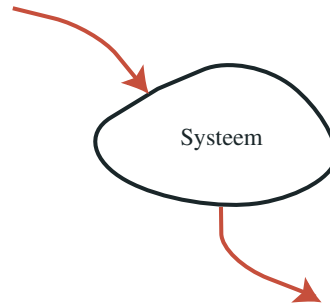
In bovenstaande context hebben we te maken met bestaande terugkoppelingen. In de regeltheorie zijn we geïnteresseerd in het toevoegen van terugkoppelingen die het gedrag van het systeem gunstig beïnvloeden.

Terugkoppeling kan het gedrag van het systeem sterk verbeteren maar ook verslechteren. We moeten dus met wijsheid handelen.

Een eerste stap in de systeem- en regeltheorie is meestal het maken van een model. Wij hebben echter niet te maken met een gesloten systeem zoals in Figuur 1. De omgeving kan het systeem beïnvloeden en omgekeerd kan het systeem de omgeving beïnvloeden zoals geïllustreerd in Figuur 2. Denk bijvoorbeeld aan een model voor een auto. We kunnen dit in een isolement modelleren maar op de snelweg beïnvloedt het gedrag van één auto het gedrag van andere auto's en omgekeerd. Door die wederzijdse interactie van een systeem en zijn omgeving kan er al direct een terugkoppelingseffect zijn

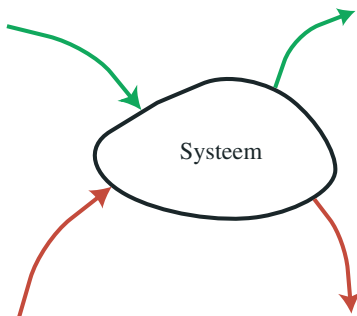


Figuur 1

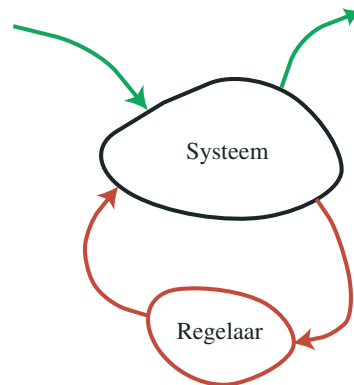


Figuur 2

maar we kunnen ook een terugkoppeling introduceren. Er wordt bijvoorbeeld steeds meer onderzoek gedaan naar meer geautomatiseerde bediening van een auto. Als een auto te dicht bij zijn voorganger komt dan wordt er automatisch geremd. Als zo'n mechanisme verkeerd is afgesteld, kan dit op een drukke snelweg onverwachte gevolgen hebben. Vooral door de snelle reactietijd van die automatische systemen. Als er nog maar een paar auto's zouden zijn zonder dit systeem zou dit een kettingreactie kunnen oproepen met bijna onvermijdelijk ongelukken.



Figuur 3



Figuur 4

In de systeemtheorie zien we in dit soort voorbeelden een “systeem”. De ingaande pijl geeft aan dat er buiten het systeem (de “omgeving”) zich dingen bevinden die invloed kunnen uitoefenen op het systeem. De uitgaande pijl geeft aan dat het systeem de omgeving beïnvloedt. We zien in Figuur 3 een tweetal ingaande en een tweetal uitgaande pijlen. We maken bij de ingaande pijlen een onderscheid tussen hoe wij zelf vanuit de omgeving het systeem kunnen beïnvloeden en hoe de omgeving het systeem beïnvloedt zonder dat wij hier iets aan kunnen veranderen. Als u een auto als systeem ziet dan is de kwaliteit van de weg iets dat u niet kunt beïnvloeden maar de stand van het stuur is wel iets dat u kunt beïnvloeden. Bij de uitgaande pijlen maken wij onderscheid tussen effecten van het systeem op de omgeving die wij niet direct kunnen waarnemen en effecten van het systeem op de omgeving die wij wel direct kunnen waarnemen. Om het voorbeeld van de auto weer te bekijken: wij kunnen de snelheid direct waarnemen via de kilometerteller maar niet de temperatuur en de hoeveelheid koolmonoxide van de uitlaatgassen. Dat laatste zouden we kunnen waarnemen maar daarvoor moeten we een extra sensor toevoegen. In de configuratie zoals aangegeven in Figuur 3 kunnen we ons nu afvragen of we, door middel van onze waarnemingen, het systeem kunnen beïnvloeden zodanig dat het systeem zich meer volgens onze wensen gaat gedragen. Zoals aangegeven in Figuur 4 op de vorige pagina willen we dus een regelaar toevoegen. In het geval van een auto zouden we dus met behulp van de regelaar kunnen proberen ervoor te zorgen dat de afstand tot de voorganger boven een bepaalde minimumafstand blijft. We willen de besturing automatiseren, via een soort computer, zodat het gedrag aangepast wordt zonder dat hier een persoon constant alles in de gaten houdt.

Regeltechniek heeft een belangrijke plaats in een zeer groot scala van toepassingen. Eigenlijk zijn er weinig gebieden waar concepten als terugkoppeling geen rol spelen. Gezien recente discussies binnen deze universiteit is het toepasselijk ook de connecties met Management en Bestuur en Gedragswetenschappen te noemen. Toen ik jaren terug naar een verhaal luisterde van een Groningse hoogleraar bedrijfskunde en hij regelmatig teruggreep op concepten uit mijn vakgebied, verraste mij dit wel, maar later begreep ik dat wij dezelfde promotor hebben gehad. Bij de interactie in een bedrijf tussen mensen of afdelingen spelen concepten als terugkoppeling een belangrijke rol. Dit kan interactie tussen mensen in een ander, verhelderend, perspectief plaatsen. Ook in de economie speelt het concept van terugkoppeling een belangrijke rol. De staat kan, gegeven de gemeten werkloos-



heid, inflatie en andere economische indicatoren, besluiten tot het verhogen dan wel verlagen van de rente. Dit is feitelijk ook een regelaar. Maar ook een bedrijf kan op basis van omzetcijfers en winst van zowel het eigen bedrijf als directe concurrenten besluiten tot extra investeringen. Dit is feitelijk ook een vorm van regelen.

In elk huis vinden we tegenwoordig wel regelsystemen. Bijna alle elektronische apparatuur van tegenwoordig bevat wel regelsystemen: de thermostaat, wasmachine, droogtrommel, koelkast, kookplaat, televisie, computer, printer, etc. Veelal zijn dit eenvoudige regelsystemen maar lang niet altijd! Daarnaast zien we in de mechatronica en procesindustrie steeds meer en steeds geavanceerdere regelaars.

De titel van mijn rede verwijst naar het verleggen van grenzen bij het regelen. Natuurlijk is hierbij een belangrijke factor de snelheid van onze computer. Waar eind 19de eeuw de eerste regelsystemen vaak mechanische systemen waren, wordt tegenwoordig vrijwel altijd de computer gebruikt om te bepalen hoe we optimaal kunnen reageren op onze omgeving.

De snelheid van een computer is en blijft een bottleneck. Stel dat ik elke seconde een meting doe met slechts 2 mogelijke waarden en, op basis van de metingen, ik een besluit moet nemen, bijvoorbeeld een simpele “aan/uit” schakelaar. Stel dat we in dit voorbeeld een periode van 100 seconden willen bekijken. Dan zijn er meer dan  $10^{30}$  mogelijke regelaars. Laten we optimistisch stellen dat een huidige computer 3 miljard regelaars per seconde kan beoordelen, dan heb ik nog meer dan 13000 miljard jaar nodig. Gelukkig is mijn computer volgend jaar 2 keer zo snel; dan hoef ik nog maar 6500 miljard jaar te wachten. Als de wet van Moore in de komende millennia geldig blijft (2 keer zo snel per 18 maanden) hoef ik zelfs maar iets meer dan 58.000 jaar te wachten. Natuurlijk maak je pas optimaal gebruik van de wet van Moore als je dan ook elke 18 maanden een nieuwe computer koopt. Dus simpelweg alle mogelijkheden langslopen werkt niet!

Maar ook andere factoren dwingen ons tot het verleggen van grenzen. Ten eerste, de toename van steeds complexere systemen en de bijbehorende verscherping van specificaties. Waar de productie van een klassieke gloeilamp redelijk eenvoudig is, zijn de huidige hoogrendementlampen veel complexer maar vereisen daarnaast ook dat veel nauwkeuriger aan de specificaties wordt voldaan. Ten tweede, de extra eisen aan flexibiliteit. We moeten in steeds meer situaties snel kunnen omschakelen naar de productie van

producten met andere specificaties. Het snel en efficiënt omschakelen vereist goede regelaars maar het kunnen omschakelen betekent ook meer werk voor regelaars (software) en minder werk voor de hardware.

Er is een grote verscheidenheid aan toepassingen van de systeem- en regeltheorie maar er is een sterk gemeenschappelijk karakter.

Vaak zijn die gemeenschappelijke technieken van wiskundige aard en het is die wiskundige achtergrond waar ik mij met mijn onderzoek op richt. Wat zijn de problemen waar we tegen aanlopen binnen de systeemtheorie en regeltechniek? We kunnen hier een driedeling maken:

### **Model**

Meestal gebruikten we lineaire modellen in de regeltechniek. We beseften natuurlijk wel dat dit slechts een benadering is maar zelfs voor lineaire systemen was het ontwerp van regelaars al lastig genoeg en zolang het systeem in de buurt van een gegeven setpoint bleef ging dit goed. Robuuste regelsystemen werden in de jaren 80 ontworpen om de discrepantie tussen model en werkelijkheid mee te nemen in het regelaarontwerp. Maar deze klasse van lineaire systemen blijkt steeds vaker te beperkt en we moeten de niet-lineariteiten expliciet meenemen in ons ontwerp.

### **Waarnemingen**

We hebben informatie nodig over de huidige stand van zaken. We kunnen geen autopiloot voor een vliegtuig bouwen zonder informatie over de positie, snelheid, oriëntatie en dergelijke van het vliegtuig. Wil je een auto in de huidige rijbaan houden dan moet je kunnen waarnemen als de auto uit zijn rijbaan dreigt te gaan. Tegenwoordig hebben we vaak veel meer metingen maar daaruit moeten we afleiden wat we werkelijk willen weten. We hebben beelden uit een camera met mooie hoge resolutie maar hoe halen we daaruit betrouwbare gegevens over de positie van de auto binnen zijn rijbaan?

### **Regelingen**

Om het gewenste gedrag te krijgen moeten we het systeem kunnen beïnvloeden. In een auto hebben we een gaspedaal, rem, versnelling en een stuur om het gedrag van de auto te bepalen. Bij een grote vrachtauto kunnen we soms de wielen individueel of paarsgewijs draaien wat een veel kleinere draaicirkel mogelijk maakt.

Model, waarnemingen en regelingen moeten samengevoegd worden tot een totaalontwerp dat natuurlijk niet alleen in theorie maar ook in de prak-

tijk goed werkt. Als we zien hoeveel ongelukken met vliegtuigen gebeuren door een menselijke fout is de claim dat het veiliger zou zijn om de piloot uit het vliegtuig te verwijderen en te vervangen door een regelaar niet eens zo vreemd. Per slot, als de elektronica uitvalt in een modern verkeersvliegtuig dan kan een piloot ook niets meer want zelfs zijn stuurknuppel is alleen elektronisch verbonden met het roer.



Zoals ik u heb proberen duidelijk te maken is het vakgebied van de systeem- en regeltheorie zeer breed en wordt er zowel in Nederland als wereldwijd veel aan gewerkt.

Binnen Nederland is het wetenschappelijk onderzoek landelijk gebundeld in onze onderzoeksschool DISC. Vanaf mijn promotie, toen ik via de voorloper van DISC door cursussen een goede basiskennis kon opbouwen, tot de dag van vandaag heb ik aan DISC veel gehad. Recent is er ook een bundeling van krachten binnen de drie Technische Universiteiten van Nederland: de zogenaamde 3TU federatie. Binnen deze federatie zijn zogenaamde Centres of Competence en Centres of Excellence gevormd. Mijn onderzoek valt binnen het Centre of Competence “High Tech Systems” en binnen het Center of Excellence “3TU.Centre for Intelligent Mechatronic Systems”. Zeker omdat mijn leerstoel voor 5 jaar gefinancierd wordt door dit “3TU.Centre for Intelligent Mechatronic Systems” is dit een



Daarom gaan 75 van onze beste hoogleraren samenwerken in 5 Centres of Excellence. En zij kunnen direct, dankzij extra middelen van de Nederlandse overheid, op zoek naar bijna 30 nieuwe tophoogleraren. Samen slaan ze met hun wetenschappelijke expertise nieuwe wegen in om via technologisch onderzoek bij te dragen aan het oplossen van urgente maatschappelijke vraagstukken.

goede ontwikkeling. Zoals in de advertentie voor de posities in de NRC stond was men op zoek naar nieuwe mensen. De doelen waren terecht ambitieus maar ik durfde, in mijn bescheidenheid, hier nauwelijks meer op te

solliciteren. Uiteindelijk is het allemaal toch gelukt en nu sta ik voor de zware taak hier de komende jaren vorm aan te geven. Binnen de 3TU federatie is het zwaartepunt voor de wiskundige systeem- en regeltheorie in Twente neergelegd en met de groep in Enschede hieraan vorm te geven is een prachtige uitdaging.

Wat zijn zoal de uitdagingen waar ik in Enschede aan wil gaan werken?

Een van de mooie zaken van de Universiteit Twente is de bundeling in instituten waardoor de samenwerking met collega's uit andere faculteiten veel



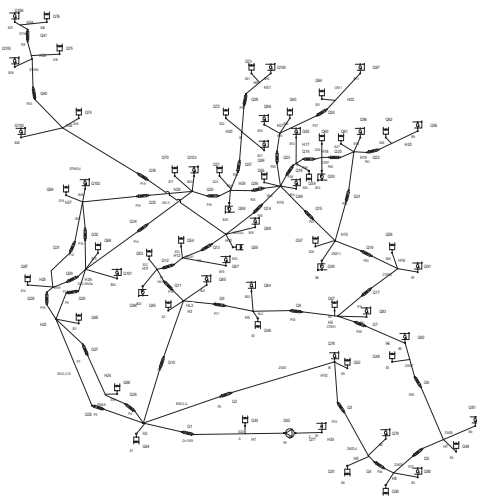
makkelijker vorm krijgt. Mijn onderzoek aan de Universiteit Twente is ondergebracht bij IMPACT en daarbinnen, maar ook daarbuiten, liggen goede mogelijkheden voor samenwerking. Zo wordt binnen IMPACT maar ook binnen het

onderzoeksinstituut BMTI gewerkt aan de robotica waarbij zeer interessante regelproblemen naar voren komen. De systemen zijn sterk niet lineair maar hebben wel een hele mooie onderliggende structuur in termen van energie en vermogen die regelaarontwerp mogelijk maken. Ook binnen het onderzoeksinstituut CTIT liggen mooie toepassingen.

12

Het verleggen van grenzen bij het regelen

Een speciale klasse van systemen zijn gedecentraliseerde of gedistribueerde systemen. Laat ik met een specifiek voorbeeld beginnen. Het waterleidings-



netwerk zoals hier aangegeven voor Zwolle wordt traditioneel op druk gehouden door watertorens.

Doordat in een watertoren het water stilstaat kan dit water makkelijk besmet raken door bacteriën.

In plaats daarvan kun je dit netwerk ook op druk proberen te houden met pompen.

Dit levert allerlei interessante problemen op. Er zitten duidelijke tijdsvertragingen in het systeem. Het

waterverbruik fluctueert sterk en is slechts beperkt voorspelbaar. Maar dit waterverbruik is natuurlijk in sterke mate bepalend voor de druk. We hebben slechts op een beperkt aantal plaatsen metingen van de waterdruk en we moeten dus op andere plaatsen een schatting maken van de druk. Het moet betrouwbaar zijn, dus het systeem moet goed bestand zijn tegen de uitval van één of meer pompen. Communicatie tussen de verschillende componenten is duur en is ook een mogelijke bron voor storingen, dus daar moeten we ook rekening mee houden. Zelfs bij de aanleg van nieuwe waterleidingen moeten we opletten want de voortplantingssnelheid van de waterdruk in bijvoorbeeld PVC en stalen buizen is respectievelijk 300 en 1200 meter per seconde. Die verschillen kunnen grote gevolgen hebben voor de mogelijkheden om het netwerk op druk te houden. Tot slot bieden de pompen nog verschillende beperkingen. Snelle veranderingen zorgt voor extra slijtage en je kunt de stroomrichting bijvoorbeeld niet veranderen. Regelproblemen voor dit soort systemen bieden prachtige uitdagingen.

Ook elektriciteitsnetwerken hebben dit soort gedistribueerde gedrag. In 2003 ontstond er een gigantische stroomstoring in de V.S. en Canada waarbij naar schatting 50 miljoen mensen zonder stroom kwamen te zitten en een schade ontstond van naar schatting 6 miljard dollar. Er wordt nog steeds geruzied wat de precieze oorzaak is geweest van de storing. Maar het is duidelijk dat de uitval van een kritische energiecentrale of de uitval van een kritische stroomkabel een kettingreactie kon veroorzaken waarbij, uit veiligheidsoverwegingen, verschillende netwerkcomponenten werden uitgeschakeld waarna het opstarten een lastige klus bleek door de omvang van de storing. Dit netwerk heeft verschillende aspecten die overeenkomen met het waterleidingnetwerk.

Ook hier is een beperkt voorspelbare stroomafname door gebruikers; hebben we te maken met tijdsvertragingen en met de noodzaak om een betrouwbaar netwerk te behouden als er componenten uitvallen. De pompen zijn hier echter de elektriciteitscentrales die meer of minder vermogen aan het





netwerk kunnen leveren. Nu wordt er gesproken over steeds meer kleine elektriciteitscentrales. Bijvoorbeeld een huis met zonnepanelen; een boerderij met een biocentrale; een huis met een windmolen. Deze centrales leveren lokaal elektriciteit en men wil tekorten aanvullen via het elektriciteitsnetwerk maar

overschotten ook leveren aan het elektriciteitsnetwerk. Hierdoor ontstaat er, naast de onzekerheden in de afname van energie, ook onzekerheden in de aanlevering van energie. Hoe kunnen we de betrouwbaarheid van ons elektriciteitsnetwerk garanderen als we met een miljoen kleine elektriciteitscentrales te maken hebben? Door lokale opslag van energie en andere vormen van bufferen is er veel mogelijk maar dit uitwerken is een maatschappelijk relevante en technologisch uitdagende vraag.

14

Het verleggen van grenzen bij het regelen

Naast elektriciteitscentrales en waterleidingen zijn er talloze andere gedistribueerde netwerken zoals bijvoorbeeld het internet of gas- en oliepijpleidingen. Echter ook in een huis komen steeds meer apparaten die over ingebouwde computertjes beschikken.

Hierdoor wordt het in de toekomst mogelijk steeds meer integratie te bereiken maar ook dit levert steeds meer gedistribueerde systemen op.



Ook sensornetwerken bieden interessante uitdagingen. Dan bedoel ik niet de meer dan 10,000 bewakingscamera's die een stad als Londen "beschermen". De opvolger van de Hubble telescoop, de James Webb telescoop gaat niet 1 spiegel bevatten maar 18 spiegels die onderling optimaal moeten samenwerken. Tegenwoordig bevat een moderne radio telescoop, zoals in New Mexico, 27 telescopen die moeten samenwerken. De trend is om veel goedkope kleine sensoren te gebruiken in plaats van een

enkele dure sensor. Een verken-  
ningsvliegtuig zoals de Global  
Hawk kost per stuk \$ 123 mil-  
joen. Men zoekt nu naar  
mogelijkheden om in plaats van  
één zo'n vliegtuig bijvoorbeeld  
1000 simpele en goedkope vlieg-  
tuigjes te gebruiken die met  
goede samenwerking betere  
resultaten kunnen opleveren.



Hier ontstaan al direct regel-  
technische vragen zoals het optimaal verdelen van de sensoren om zoveel  
mogelijk informatie te verzamelen. Maar ook het gebruik van deze overvloed  
aan informatie bij het regelen van systemen biedt voldoende uitdagingen. Er  
wordt binnen de leerstoel steeds meer gekeken naar signaaltheorie om uit al  
deze metingen de gewenste informatie te destilleren. Er zijn natuurlijk nog  
vele andere toepassingen van mijn vakgebied die ik vandaag niet kan belich-  
ten: binnen de gezondheidszorg, de robotica, hoge precisie regeltechniek  
voor nano toepassingen, de procesindustrie enz.

In 1987 begon ik aan mijn promotiewerk. Ik weet nog goed dat bij mijn solli-  
citatiegesprek het systeem waar ik naar moest gaan kijken op het bord ver-  
scheen. Dit leek me volstrekt triviaal.

$\dot{x} = Ax + Bu$     Differentiaalvergelijkingen met constante coëfficiënten  
 $y = Cx + Du$     worden binnen de wiskunde al in het eerste jaar behan-  
deld en worden, in zekere zin terecht, als zeer eenvoudig  
beschouwd. Aan de andere kant, het bepalen van een

optimale ingang zodat de uitgang van het systeem een zeker gewenst gedrag  
vertoont bleek toch niet zo eenvoudig! Voor deze klasse van systemen is  
een vrijwel complete theorie nu wel beschikbaar. Hoe anders wordt het als  
wij wat extra structuur opleggen. Zoals een systeem waarbij  $u_1$  en  $u_2$  alleen  
kunnen beschikken over  $y_1$  en  $y_2$  respectievelijk. Daarvoor zijn bijna alle  
basisvragen nog onbeantwoord. Dit zijn precies de vraagstukken waar je

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B_1u_1 + B_2u_2 \\ y_1 &= C_1x \\ y_2 &= C_2x\end{aligned}$$

tegenaan loopt als je met dit soort gedistribu-  
eerde systemen te maken krijgt. Het is fan-  
tastisch leuk om dit soort inzichtelijke wis-  
kundige problemen te destilleren uit de oor-  
spronkelijke vraagstelling, dan op te lossen  
en, zeker niet te vergeten, om dan te laten

zien hoe dit soort verkregen inzicht kan worden benut voor het beantwoorden van de vragen die opkwamen bij het originele vraagstuk uit de praktijk.

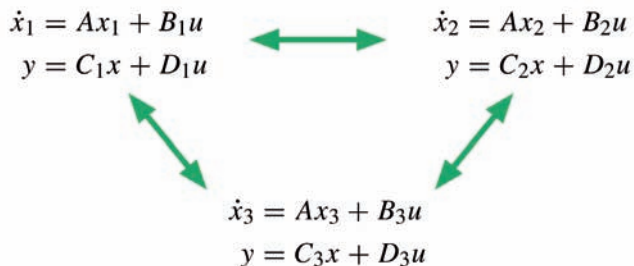
$\dot{x} = Ax + Bu$   
 $y = Cx + Du$

Tot slot van dit onderdeel (helaas moet ik de receptie nog even uitstellen) wil ik nog even terugkomen op de titel van mijn rede. Waar ik de afgelopen jaren ook veel naar heb gekeken zijn systemen met begrenzingen op de ingang of toestand. Hier zijn signalen als  $u$  of  $x$  begrensd en hebben harde onder- en/of bovengrenzen. Voor dit soort systemen is met behulp van model predictive control een nieuwe techniek beschikbaar gekomen. Echter, deze techniek is gebaseerd op een online optimalisatie. Hier blijken in de praktijk veel successen mee behaald te worden. Echter, het is lastig om te analyseren wat kan gebeuren. Veelal worden door simulatie mogelijke scenario's doorlopen maar het is nooit mogelijk alle scenario's te simuleren. Hoewel veel ingenieurs simulatie volledig overtuigend vinden, is het zeker voor kritische systemen cruciaal om theoretisch na te gaan wat er kan gebeuren, ook als zulke scenario's niet veel voorkomen. Alleen dan kun je ervoor zorgen dat een systeem 100% van de tijd goed functioneert. We moeten ook beseffen dat soms, om een doorbraak in de praktijk te bereiken, we even een stap terug moeten zetten om een nieuw stuk gereedschap te ontwikkelen.

16

Het verleggen van grenzen bij het regelen

Waar we ook steeds meer tegenaan lopen is dat er variabelen zijn die slechts discrete waarden aan kunnen nemen, bijvoorbeeld 0 en 1. We krijgen dan vaak dat het systeem tussen twee of meer verschillende systemen schakelt.



Soms kunnen we via een ingang kiezen welke dynamica we willen hebben en soms wordt dit door het systeem bepaald, bijvoorbeeld door de positie



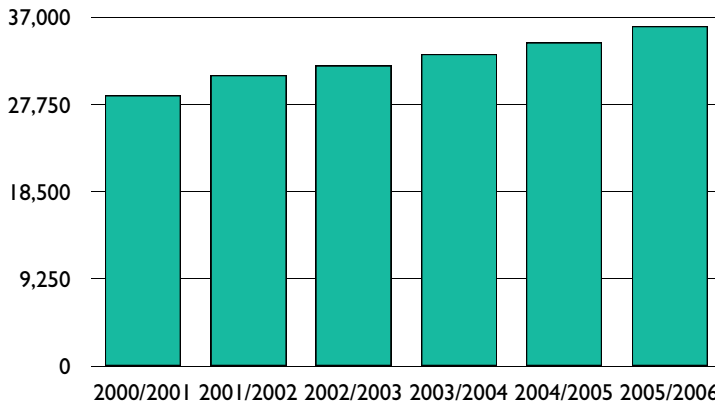
waar we ons bevinden. Dit lijkt een stuk eenvoudiger omdat je bij een discrete ingang bijvoorbeeld slechts 2 mogelijkheden hebt in plaats van oneindig veel mogelijkheden. Wiskundig zijn deze problemen echter vaak veel lastiger. Dat komt natuurlijk omdat we per tijdstap 2 mogelijkheden hebben en dus na 100 tijdstappen zitten we weer op de  $10^{30}$  mogelijkheden waar we het eerder over hadden. Dit soort klassen van hybride systemen of schakelende systemen wordt ook binnen mijn leerstoel bestudeerd.

Het is de universiteit die als primaire doelstelling, naast het onderwijs, ervoor moet zorgen dat meer langetermijnonderzoek een plaats kan vinden. Veel technologische doorbraken zouden ondenkbaar zijn geweest zonder goede wiskundige modellen. Maar dit wiskundig fundament kan niet als een statisch geheel beschouwd worden. Het vereist interactie met de praktijk om te zien waar nieuwe wiskundige theorievorming een bijdrage kan leveren. Maar we moeten ook nieuwe ideeën kunnen uitwerken over een periode van een aantal jaren en dit is een termijn waarvoor binnen het bedrijfsleven weinig ruimte is. Natuurlijk moeten we aan een ondernemende universiteit altijd open staan voor valorisatie en open staan voor evaluaties om te zien of ons werk van excellente kwaliteit is en goed aansluit bij de langetermijndoelen van de industrie en ondernemend Nederland. Echter, hierbij moet sterk gewaakt worden dat de bureaucratie niet de overhand krijgt. Als ik de kosten zie van een accreditatie van ons onderwijs en de aanstaande evaluatie van ons onderzoek, niet alleen in directe euro's maar ook in mankracht, dan is dat toch niet goedkoop.

Een ander probleem is dat de minister meer onderzoeksgeld aan de universiteiten wil verstrekken via een organisatie als NWO, maar dit geld wil weghalen uit de vaste onderzoeksfinanciering. Ten eerste blijkt het door de onzekere financiering nu al heel lastig om een stabiele geldstroom te krijgen voor de universiteit. Het ene jaar is er een bezuiniging en het jaar daarop is er royaal geld over. We hebben die vaste voet nodig om de vaste staf te financieren en om continuïteit te garanderen. Ten tweede heeft dit geld via NWO, maar ook andere belangrijke bronnen zoals de EEG en het ministerie van economische zaken, de neiging terecht te komen bij gevestigde groepen en op een aantal specifieke onderzoeksgebieden die op dat moment sterk in de maatschappelijke belangstelling staan. Tot slot, we lopen na jaren van bezuinigingen het gevaar op veel gebieden achter te gaan lopen. De Nederlandse economie met zijn hoge lonen kan alleen goed draaien door innovatie en dat vereist een solide basis. Gemiddeld hebben we in Nederland goede

onderzoekers maar die mogen bij organisaties als NWO blij zijn als meer dan 10% van de aanvragen wordt goedgekeurd. Vorig jaar dreigde zelfs de hele

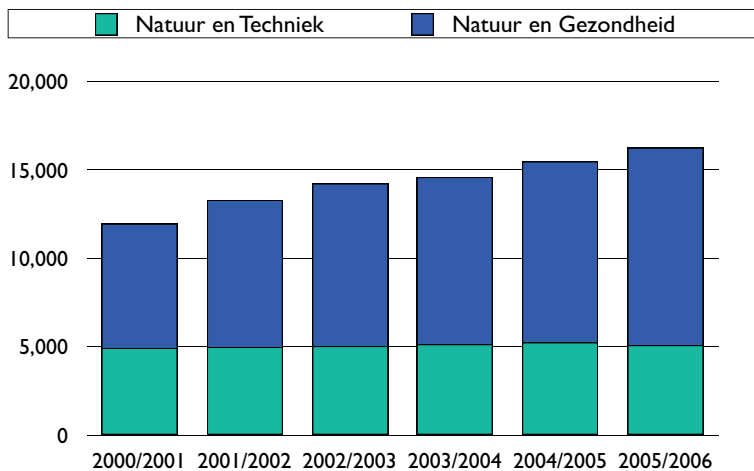
## VWO studenten per jaar



“open competitie” van NWO voor de wiskunde niet door te gaan wegens gebrek aan geld. Nu is er meer geld maar het is een koekje van eigen deeg.

### Onderwijs

In Nederland hebben we een jaarlijks licht toenemende stroom VWO-studenten. Dit is de groep waar de universiteiten hun instroom vandaan moeten halen. Echter, als we kijken naar de profielkeuze, dan zien we dat Natuur en Techniek, wat voor een Technische Universiteit de belangrijkste groep is, de afgelopen jaren nauwelijks gegroeid is en minder dan 15% van de VWO-studenten betreft. Door een aantal studies, zoals Technische Geneeskunde, die ook geschikt zijn voor studenten met een Natuur en Gezondheid profiel kunnen we als totale universiteit een bredere groep bereiken. Voor opleidingen als wiskunde, natuurkunde en elektrotechniek is er echter maar een kleine groep die de geschikte voorkennis heeft en die kiest natuurlijk lang niet geheel voor een technische studie. Gezien de cruciale rol van de bèta-wetenschappen voor de Nederlandse economie, zijn de meeste mensen er wel over eens dat het goed zou zijn als die getallen zouden verbeteren.



Economen beweren dat er geen bètatekortingen zijn omdat bètatekortingen onmiddellijk zouden leiden tot hogere salarissen en dit nog niet is gebeurd. Wij kunnen als universiteit de salarissen dat we betalen slechts zeer beperkt aanpakken en we zien steeds meer posities waarvoor we geen mensen kunnen krijgen. Van de 30 3TU hoogleraarposities, waarvoor in 2006 is geadverteerd, is volgens mijn gegevens, nu ongeveer 10 ingevuld. Er zijn leerstoelen in mijn vakgebied die al meer dan 3 jaar zoeken naar nieuwe universitaire (hoofd)docenten. Onze afstudeerders hebben vaak 3 of meer aanbiedingen. Kortom, die behoefte is er wel degelijk en ik denk dat de salarisstructuur ook bij bedrijven veel minder flexibel is dan men misschien denkt en dat er niet meteen salarisverhogingen worden geboden als het moeilijk is een vacature in te vullen.

Er zijn steeds meer softwarepakketten beschikbaar voor mensen die iets willen uitrekenen. Dit geeft mensen soms het idee dat men problemen zelf kan oplossen in plaats van het inhuren van bèta's met inzicht in de vereiste berekeningen. Maar in de praktijk kom je er zelden door simpelweg iets in een programma te stoppen. Je moet toch echt inzicht hebben in de problematiek. Ook met simulatie of proberen kom je er niet. Er zijn tools zoals Neurale Netwerken die je "automatisch" kan laten trainen. Zonder inzicht in de structuur ben je echter eindeloos aan het trainen en bereik je zelden een goed resultaat. Met een modelreductieprobleem zag ik het laatst ook weer: een slim beginnetje gaf in alle tests een algoritme met het beste resultaat.

Willekeurige begincondities daarentegen behoeften duizenden pogingen. Er zijn vele experimenten in bijvoorbeeld de procesindustrie waar 1 uur experimenteren duurder is dan het jaarsalaris van een wiskundige. Even proberen heeft daar een hele andere betekenis en het is cruciaal om ervoor te zorgen dat je weloverwogen aan je experiment begint. Als je een overhangend stuk van een gebouw wilt ondersteunen met een paal, dan kun je de veilige weg kiezen door die paal een diameter van een dikke meter te geven van hogesterktebeton. Dit is echter duur en vaak ook niet mooi. Om de minimale sterkte/dikte van zo'n ondersteuning te berekenen zul je toch met een goed wiskundig model moeten komen. Het geheel bouwen en dan experimenteel vaststellen of het gebouw overeind blijft is waarschijnlijk geen handige methode. Hier speelt ook het belang van rekenfouten. Laatst hoorde ik het verhaal waarbij de vereiste sterkte van een gebouw werd doorgerekend en de jonge medewerker uitkwam op een ondersteuning door een paal met een diameter van 10 cm. Het was de ervaren senior medewerker die meteen inzag dat dit niet kon kloppen. Blind vertrouwen op je softwarepakket is gevaarlijk, zeker omdat er bij de invoer van de gegevens makkelijk een fout gemaakt kan worden. Kortom, we hebben bètamensen hard nodig willen we als Nederlandse economie het innovatief karakter behouden en liefst natuurlijk versterken.

Nu heeft veel van de aantrekkingskracht van een vakgebied te maken met het imago van de opleiding. In India heeft een ingenieur een hoge status terwijl een bedrijfskundestudent in Nederland ooit tijdens een werkcollege wiskunde meldde: "Waarom zou ik dit leren; later ben ik de baas en dan huur ik wel iemand in voor dit soort dingen". Ook het idee dat niet goed zijn in wiskunde iets is waar je bijna trots op kunt zijn. Hoe vaak hoor je niet als je vertelt wat je doet "Wiskunde, daar kan ik helemaal niets van". Iedereen heeft zijn zwakke kanten en daar moet je gewoon wat harder voor werken. Het is cruciaal voor een goed imago dat er goede docenten op de middelbare scholen werken. Door het vak wiskunde op het VWO denkt men te weten wat wiskunde is. Dat dit beeld niet correct is kan alleen een goede docent duidelijk maken. Hiervoor heeft hij/zij dan wel zelf een goede wiskundeopleiding nodig. Helaas krijgen veel wiskundedocenten via het HBO slechts 1 jaar wiskunde (verdeeld over hun studie) naast didactiekvakken. Als zo'n leerling dan ook nog van de HAVO komt heeft hij nauwelijks voldoende tijd om zich de VWO-stof goed eigen te maken, laat staan dat hij of zij echt kan overbrengen wat wiskunde allemaal omvat. De commissie Dijsselbloem heeft in een parlementair onderzoek gekeken naar de onderwijsvernieuwingen van de

afgelopen jaren en de resultaten zijn niet bemoedigend.

Voor maatregelen om het onderwijs echt structureel te verbeteren moet hard naar geld gezocht worden. Dit terwijl Nederland 5% van zijn BNP uitgeeft aan onderwijs terwijl in de V.S. dit percentage gelijk is aan 7.5%. Maar toch, de eerste expliciete stap van de minister was het gratis verstrekken van schoolboeken. Er was al compensatie voor diegenen die het niet konden betalen en deze maatregel kost naar schatting 300 miljoen. Ik kreeg als student via de basisbeurs ook plotseling extra geld terwijl er al veel geregeld was voor de lagere inkomens. Nu is dat nooit weg, maar dit geld was daarvoor niet beschikbaar om het onderwijs te verbeteren. Ook mijn AIO salaris was in 1987 slechts 1758 gulden bruto per maand; het equivalent van 55% van schaal 10. In 2007 is dit salaris opgetrokken naar 85% van schaal 10. Aan de leerling/student/promovendus kant zijn er dus verschillende verbeteringen doorgevoerd. Een eerstegraadsleraar kon echter makkelijk doorgroeien naar schaal 12 maar nu wordt dit steeds moeilijker en mede door de lage salarissen is de status van het beroep ook sterk uitgehold. Salarisverschillen tussen academisch opgeleide leraren en leraren met een HBO vooropleiding zijn vrijwel geheel weggefallen. Daarnaast, toen een leraar strafwerk gaf, hoorde ik dat hij via de leerling een briefje van de ouders krijgt met de opmerking “mijn kind heeft niets gedaan en hoeft het strafwerk dus niet te maken”. Daar hoefde ik bij mijn ouders niet mee aan te komen; de leraar had in hun ogen per definitie gelijk. Laat staan dat ik bij mijn grootvader zou moeten komen die de straf al snel zou verdubbelen.

We krijgen dus te weinig studenten maar ook studenten met een andere vooropleiding. We hebben problemen met een aantal aspecten:

- Vaardigheden
- Abstractievermogen
- Kritisch werken

Veel is wel behandeld op de lagere school of middelbare school maar, mede door te weinig oefening, weggezakt maar in kern vaak nog wel aanwezig. Men is echter niet kritisch genoeg. Als men op  $\frac{1}{2} + \frac{1}{3}$  als antwoord  $\frac{1}{5}$  geeft en je zegt nee, dan probeert men  $\frac{2}{5}$  en pas als je dan weer zegt dat het niet klopt, gaat men nadenken en komt men meestal tot het goede antwoord. Op een tentamen vroeg ik een afgeleide te berekenen. Een royale meerderheid van de studenten beheerste de techniek van het differentiëren. Niet één student had het correcte antwoord. Je ziet weinig studenten die, als ze tijd over hebben, nog een keer alles zorgvuldig controleren. Over rekenfouten moeten we volgens studenten niet teveel zeuren. Maar we zien die noodzaak van kritisch denken ook op andere plekken. Een paar van mijn studenten

moest een keer een integraal van een complexwaardige functie uitrekenen die (enigszins vereenvoudigd) de volgende vorm had:

$$\int_0^{2\pi} e^{i(k-1)t} dt$$

met  $k$  een geheel getal en  $i = \sqrt{-1}$ . Men deed dit natuurlijk met de computer en kreeg als antwoord 0. Nu klopt dit voor alle  $k$  behalve voor  $k=1$ . Een punt van zorg waar ik op college steeds de nadruk op leg. Echter een simpele berekening in het computerpakket Mathematica levert dit antwoord 0 op zonder enige zorgen voor het geval  $k = 1$ . Dit was 6 jaar geleden al het geval maar ook de nieuwste versies van Mathematica en Maple V geven nog steeds dit foute antwoord. Nu moesten deze studenten een gelijkrichter bouwen en door deze rekenfout kwam er een prachtige gelijkspanning uit van 0V. Met wat nadenken over je antwoord had je toch kunnen inzien dat dit niet kon kloppen. Redeneren is ook iets waar we tegenaan lopen. Zeker als je een student vraagt om een bewijs te geven of simpelweg iets te beargumenteren. Men is niet in staat een logisch verhaal op papier te krijgen. Tot slot, het abstractievermogen is cruciaal en we zien dat studenten nog niet inzien dat

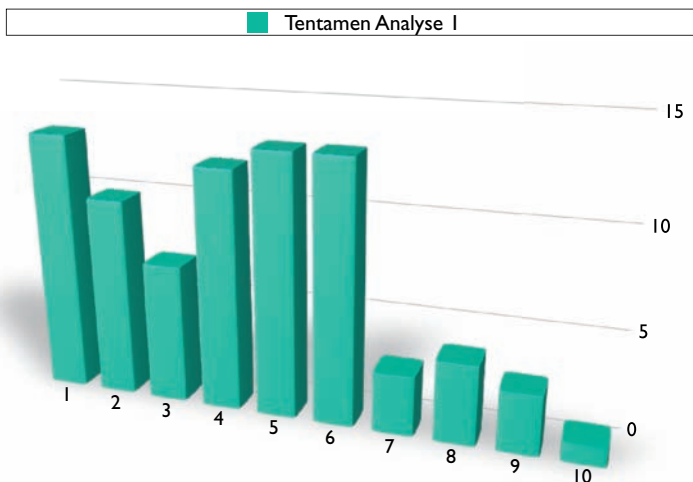
$$\frac{1}{x+1} + \frac{1}{x+2} \quad \text{en} \quad \frac{1}{2} + \frac{1}{3}$$

qua techniek eigenlijk precies hetzelfde is.

Kortom, rekenvaardigheden, kritisch werken, redeneren en abstractievermogen zijn zwaktes bij de huidige eerstejaars. Nu is het makkelijk om te zeggen dat vroeger alles beter was en we kunnen naar kritische rapporten over de huidige middelbare school verwijzen maar we moeten er natuurlijk wel voor zorgen dat we nog steeds studenten opleiden tot een volwaardig ingenieur van een goed niveau.

Dit vereist een inspanning. Echter niet alleen van docenten maar ook van studenten. Door bijbanen en andere zaken zien we dat studenten vaak veel minder tijd besteden aan een vak dan gepland. Een vak van 5 EC staat voor een inspanning van de student van 140 uur. We zien uit enquêtes dat studenten er meestal slechts 80 à 90 uur insteken. Opkomst bij werkcolleges is vaak slecht. Nu is studierendement een belangrijk punt van aandacht maar slechte resultaten komen vaak doordat de student er te weinig tijd in steekt.

Om vaardigheden op te krikken moet je veel sommen maken. Als je dat niet doet, dan moet je niet vreemd staan te kijken dat je het vak niet haalt.



U ziet hier de uitslagen van een eerstejaarscollege. Dit vak heeft een slaagingspercentage van 30% maar ik durf te beweren dat de studenten die een 1 of 2 hebben echt bijna niets aan dit vak gedaan hebben maar dat zijn wel 23 studenten uit een populatie van 80. We kunnen ons onderwijs verbeteren maar ten eerste helpt dat hooguit de student die nu een 5 heeft en ten tweede wordt ons onderwijs vaak al als goed beoordeeld. Ook onder de groep die nu een 5 heeft zie je dat men veel te weinig tijd aan het vak besteed heeft. Belangrijk is dus vooral om studenten aan het werk te krijgen; studeren is geen deeltijdbaan. Een ander punt is dat de deficiënties van de studenten dusdanig zijn dat je dit niet even kunt oplossen. Een korte extra cursus in het eerste half jaar van hun studie kan heel nuttig zijn, maar we moeten aandacht aan dit soort zaken blijven geven gedurende de hele studie. Daarmee kunnen we bijvoorbeeld het abstractievermogen rustig opbouwen tot een goed niveau. Nu wordt de aansluitingsproblematiek te vaak geconcentreerd in het eerste halfjaar. Deze deficiënties wegwerken kost ook weer een inspanning van de studenten!

## Tenslotte

Bij de gelegenheid van deze ambtsaanvaarding horen ook nog enkele dankwoorden. Mijn ouders hebben vanaf het begin geen grenzen opgelegd aan mijn behoefte om kennis te vergaren en hebben mij hierin altijd gesteund. Hiervoor en voor de goede familieband (ook met mijn broer en zijn gezin) ben ik zeer dankbaar.

Bij mijn opleiding heeft Guido Jansen als mijn afstudeerbegeleider op zijn geheel eigen wijze zijn invloed uitgeoefend. Bij mijn promotiewerk werd ik begeleid door Harry Trentelman die te allen tijde voor mij klaar stond. Vanaf het begin van mijn promotiewerk tot op de huidige dag heeft Maló Hautus mij altijd ondersteund. Hij is met recht mijn wetenschappelijke vader.

Ik behoorde tot de eerste groep van promovendi die binnen het Netwerk Systeem- en Regeltheorie college gingen volgen in Utrecht waarbij een grote verscheidenheid van onderwerpen binnen de systeem- en regeltheorie aan bod kwamen die voor mij buitengewoon waardevol waren. Die gaven me, naast de noodzakelijke diepte van een promotiewerk, een breed overzicht van het vakgebied. Ik ben alle mensen die bij dit Netwerk betrokken waren zowel vanuit het oogpunt van organisatie dan wel als docent dankbaar. Intussen is dit Netwerk opgegaan in het Dutch Institute of Systems and Control en blijft het een waardevolle bijdrage leveren bij het onderwijs aan onze promovendi en ook draagt het bij aan het scheppen van een band tussen de onderzoekers op dit vakgebied.

In Eindhoven waren we in de groep CeMAS bezig met een nieuwe uitdaging om de consultatieactiviteiten bij wiskunde te versterken. We deden dit in goede onderlinge harmonie door te bouwen op de sterke kanten van de individuele medewerker. Het was een moeilijke stap dit proces voortijdig te verlaten voor een nieuwe uitdaging. Jullie begrip voor deze stap is erg belangrijk geweest voor mij. Ik wens jullie heel veel sterkte in de toekomst.

In Eindhoven had het faculteitsbestuur mij net voorgedragen voor een benoeming tot hoogleraar toen ik een vakantiedag opnam om te solliciteren in Enschede. De benoeming door het College van Bestuur van de Technische Universiteit Eindhoven vond plaats een paar dagen voordat ik naar Enschede vertrok voor een tweede gesprek.



Ik dank de TU/e voor het in mij gestelde vertrouwen en voor het begrip dat een overstap van een hoogleraarspositie aan de TU/e naar een hoogleraarspositie aan de UT in mijn geval zo eervol was, dat ik deze kans niet kon laten schieten.

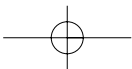
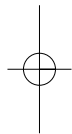
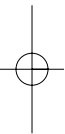
Tot slot wil ik natuurlijk de Universiteit Twente danken voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik zal mijn best deze functie op een waardige wijze uit te oefenen.

De sfeer in de groep is uitstekend in Enschede en daardoor heb ik mij vanaf het begin direct daarin hartelijk opgenomen gevoeld. Ik wil vooral Jan Willem Polderman danken voor het waarnemen van de hoogleraarspositie na het vertrek van Arjan van der Schaft en voor het mij wegwijs maken binnen de UT.

We gaan er iets moois van maken in de komende jaren!

Ik heb gezegd.







**Universiteit Twente**  
*de ondernemende universiteit*