

Arjan van der Schaft

Faculteit der Toegepaste Wiskunde

Universiteit Twente

Postbus 217, 7500 AE Enschede

twarjan@math.utwente.nl

Inaugurale rede

Verdeel en

Het modelleren van fysische verschijnselen door middel van differentiaalvergelijkingen heeft een rijke geschiedenis die zeker drie eeuwen omspannt. Aan dit klassieke en levendige vakgebied zijn in de vorige eeuw vele nieuwe aspecten toegevoegd. Uit de behoefte om deze fysische processen zichzelf te laten besturen is de systeemtheorie voortgekomen. Hierbij kan men denken aan elektrische circuits, robots, de automatische piloot in een vliegtuig of de thermostaat van een verwarming. De ontwikkeling van een vakgebied zoals bijvoorbeeld de ruimtevaart is zonder de systeemtheorie ondenkbaar. Arjan van der Schaft, samen met H. Nijmeijer auteur van het op dit gebied veelgebruikte boek 'Nonlinear Dynamical Control Systems' en hoogleeraar deterministische systeem- en besturingstheorie aan de Faculteit der Toegepaste Wiskunde van de Universiteit Twente, geeft in zijn inaugurale rede een overzicht van dit vakgebied.

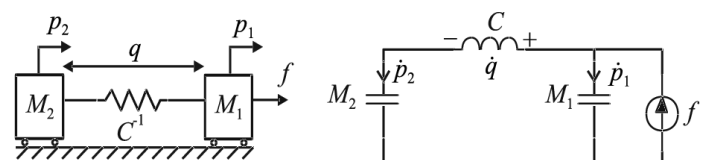
Het houden van een rede waarin een persoonlijk visie wordt gegeven op onderzoek en onderwijs bij het aanvaarden van een leeropdracht aan een universiteit is een enigszins oubollige maar interessante traditie, waartoe eigenlijk ieder lid van de universitair gemeenschap in staat zou moeten gesteld; ik kom daar later nog op terug.

De prikkelend bedoelde titel van deze voordracht zal ik hanteren als lijfspreuk voor het gebied van de Wiskundige Systeem- en Besturingstheorie (Mathematical Systems and Control Theory), waarover ik in het eerste deel van deze voordracht iets zal vertellen. In het tweede deel van de voordracht zal ik vervolgens de rol van de wiskunde (en in het bijzonder de toegepaste wiskunde) aan de universiteit bespreken, om dan in het laatste deel nog iets te zeggen over universitair onderzoekbeleid.

Wiskundige systeem- en besturingstheorie

Het vakgebied van de wiskundige systeem- en besturingstheorie is een relatief nieuwe loot aan de wiskundige boom, die pas vanaf het eind van de vijftiger jaren van de twintigste eeuw een duidelijke vorm heeft gekregen. Grote namen die aan de beginfase zijn verbonden zijn onder andere Wiener (die de naam *cybernetica*, afgeleid van het Griekse woord voor stuurman voorstelde), Pontryagin, Bellman, en in het bijzonder Kalman.

Vanaf het eerste begin is de systeem- en besturingstheorie een sterk interdisciplinair vakgebied geweest, dat zijn wortels heeft in onder andere de klassieke regeltechniek (voortbouwend op het werk van Bode en Nyquist in de dertiger jaren), de Fourieranalyse, variatierekening en waarschijnlijkheidsrekening in de wiskunde, en diverse richtingen in het modelleren en ontwerpen van technische en biologische systemen, zoals netwerktheorie, de theorie van rekenmachines, en theorieën over de



$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q/C \\ p_1/M_1 \\ p_2/M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} f$$

Figuur 1 Twee fysische modellen; éénzelfde wiskundig systeem



Arjan van der Schaft

heers

werking van het zenuwstelsel.

Vanuit sociologisch standpunt is het een typische 'naoorlogse' activiteit die de schotten tussen verschillende wetenschapsgebieden slechtte, en een frisse start probeerde te maken voor een theorie van 'algemene' systemen die de bestaande disciplines van elektrotechniek, werktuigbouwkunde, biologie en wiskunde deels kon overstijgen. De daarbij optredende opwindning en spanning vibreert gelukkig nog steeds door in het vakgebied, al is de jeugdige overmoed inmiddels verdwenen.

De rol van de wiskunde in de ontwikkeling van de systeem- en besturingstheorie is zeer groot geweest. De wiskunde verschaftte de universele taal om modellen uit verschillende vakgebieden op dezelfde wijze te beschrijven. Het eenvoudige voorbeeld dat de bewegingsvergelijkingen van een mechanisch systeem bestaande uit twee zich in een rechte lijn verplaatsende massa's gekoppeld door een lineaire veer gelijk zijn aan de bewegingsvergelijkingen van een elektrisch circuit met twee condensatoren en één spoel is nog steeds een eye-opener voor studenten (zie figuur 1).

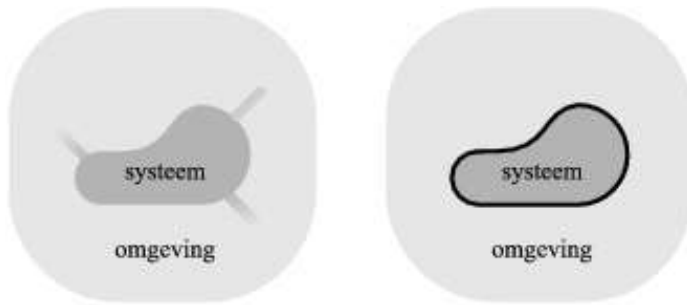
Meer in het algemeen bleek de wiskunde een bijna onuitputtelijke bron van concepten en technieken om systeemmodellen op verschillende niveaus van algemeenheid te bestuderen en om uiteindelijk een zelfstandige theorie van wiskundige systemen te ontwikkelen. Ten nadele van de wiskunde kan hieraan toegevoegd worden dat het veelal niet wiskundigen van origine waren die deze ontwikkelingen initieerden en vormgaven, maar ingenieurs met een sterke theoretische belangstelling. Dit raakt aan een belangrijk facet van de wiskundebeoefening, waar ik in het tweede deel van de voordracht op terug zal komen. Van meet af aan is een belangrijk aspect van de systeemthe-

orie, waarmee het gebied zich beslissend onderscheidt van bijv. de mathematische fysica, dat het zich niet beperkt tot het *beschrijven* van wiskundige modellen van systemen uit verschillende wetenschapsgebieden, maar zich ook richt op het *voorschrijven* van modellen met gewenst gedrag. Naast de *analyse* van modellen gaat het dus ook om de *synthese* van modellen. Dit heeft verstrekkende gevolgen, die niet altijd even goed begrepen en geapprecieerd worden. Aan de andere kant geeft dit het vakgebied enorme mogelijkheden, die naar mijn vaste overtuiging nog maar voor een zeer klein deel zijn geëxploreerd.

Open dynamische systemen

Laat ik daarom iets vertellen over het conceptuele kader van de wiskundige systeem- en besturingstheorie, in het bijzonder over de aspecten die ik samenvat met het motto 'Verdeel en Heers'. De meeste wiskundigen bestuderen dynamische systemen als *gesloten systemen*: de systeemvariabelen ontwikkelen zich eenduidig in de tijd als functie van hun beginvoorwaarden. De analyse van dit soort systemen, met als kenmerkende voorbeelden de banen van de planeten van het zonnestelsel of de weerpatronen in de atmosfeer van de aarde, biedt nog steeds ongelooflijke uitdagingen. Een gesloten systeem is per definitie een idealisatie: het systeem als deel van de werkelijkheid zal altijd enige interactie ondergaan met de omgeving. Dit is echter de onderliggende hypothese voor de experimentele bestudering van alle fysische modellen: we onderzoeken de evolutie van een aantal systeemvariabelen waarbij we andere systeemvariabelen constant beschouwen (de beroemde *ceteris paribus* conditie).

Systeemtheoretici echter nemen een fundamenteel ander gezichtspunt: dynamische systemen worden expliciet gemodelleerd als *open*



Figuur 2 Open systeem versus gesloten systeem

systemen die interacteren met hun omgeving. Meestal wordt dit gedaan door de systeemvariabelen te onderscheiden in *interne* variabelen (de variabelen die ook in een mathematisch-fysische beschrijving figuren) en *externe* of interactievariabelen. De interactie met de omgeving vindt plaats via deze variabelen. Omdat het gedrag van de omgeving per definitie onbekend is wordt de dynamica van het systeem nu beschreven door alle mogelijke tijdsfuncties van de interne en externe variabelen die compatibel zijn met de beperkingen die het systeem aan deze variabelen oplegt.

Zeker voor technische systemen lijkt de beschrijving als intrinsiek open systeem het meest vruchtbare standpunt: als we de dynamica van een fiets willen beschrijven zullen we ook de invloed van de fietser in beschouwing moeten brengen, en het is onbevredigend om dit alleen voor een modale fietser te doen. Een tweede, evenzeer belangrijke, reden voor het beschouwen van open systemen is dat zelfs gesloten systemen vaak zinvol als een *koppeling* van open systemen kunnen worden beschouwd; ik zal hier straks uitgebreid op terug komen.

Vanuit een beperkt wiskundig standpunt impliceert de overgang van gesloten naar open systemen dat stelsels systeemvergelijkingen beschouwd worden waar het totale aantal variabelen groter is dan het aantal vergelijkingen; zogenaamde *onderbepaalde stelsels*. Onderbepaalde stelsels van gewone of partiële differentiaalvergelijkingen hebben geen eenduidige oplossingen, en zijn traditioneel in de wiskunde als veelal slecht gestelde problemen terzijde geschoven. Alleen in nieuwe wiskunderichtingen zoals de operations research is het belang van, in dit geval meestal statische, onderbepaalde stelsels onderkend.

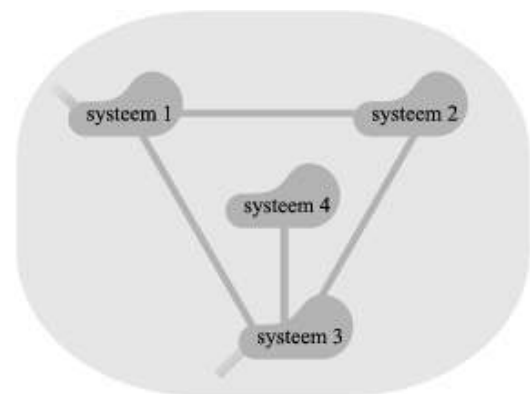
Als we echter iets verder van ons wiskundige huis gaan is het idee van open systemen welverspreid. In het bijzonder in de technische wetenschappen is het conceptuele kader van open systemen gemeengoed, hoewel het vaak niet geformaliseerd wordt. Een vergaande formalisatie van het begrip open systeem heeft wel plaatsgevonden binnen de informatica. Ook het standpunt van de *signaaltheorie*, waarbij systemen beschreven worden als het verband tussen in- en uitgangsignalen, is direct op het idee van open systeem gebaseerd.

Tot dusver hebben we een open systeem alleen gepositioneerd ten opzichte van een volledig onbekende omgeving. De grote kracht van het concept 'open systeem' is echter *compositionaliteit*: een open systeem kan gekoppeld worden aan één of meerdere andere open systemen, met resultaat een nieuw open systeem (figuur 3).

We kunnen het proces van compositie van twee kanten bekijken: aan de ene kant de *analyserichting* waar een gegeven complex systeem uiteengerfeld wordt tot een koppeling van eenvoudige deelcomponenten, en complementair de *syntheserichting* waar verschillende open systeemcomponenten worden samengesteld tot een complex systeem. Beide richtingen liggen aan het hart van de wiskundige systeem- en besturingstheorie. De analyserichting is direct verbonden met de systeemtheoretische manier van modelleren van complexe pro-

cessen (*Verdeel*), terwijl de syntheserichting direct verbonden is met het ontwerp en de besturing van systemen (*Heers*). Systeemtheoretische wiskundige modellering en analyse is dus het uiteenrafelen van het systeem in onderliggende deelsystemen, en de analyse en verificatie van de dynamische systeemeigenschappen in termen van de eigenschappen van deze deelsystemen en de manier waarop ze aan elkaar gekoppeld zijn. Het is een zeer effectieve manier om tot een inzichtelijke complexiteitsreductie te komen. ('Verdeel' het probleem in eenvoudiger deelproblemen.) Andersom is systeemtheoretisch ontwerp en besturing erop gericht om uit (deels gegeven) deelsystemen een systeem samen te stellen met gewenste eigenschappen. Dit is het basisidee van *terugkoppeling* (feedback) in de besturings- of regeltheorie: het aanbrengen van een eenvoudige terugkoppeling in een gegeven systeem kan de dynamica van het systeem dramatisch veranderen. (Het 'Heersen' vindt dus niet plaats door het tegen elkaar uitspelen van de verschillende deelsystemen, maar juist door hen op goede wijze te laten samenwerken!)

Een wezenlijk element in de wiskundige systeemtheorie is het feit dat de samenstellende deelsystemen van uiteenlopende aard kunnen zijn; deels (analoge) fysische componenten (mechanisch, elektrisch, etc.) en deels (digitale) softwarecomponenten. In dit opzicht kan systeemtheoretisch ontwerp en regeling *virtueel* worden genoemd.

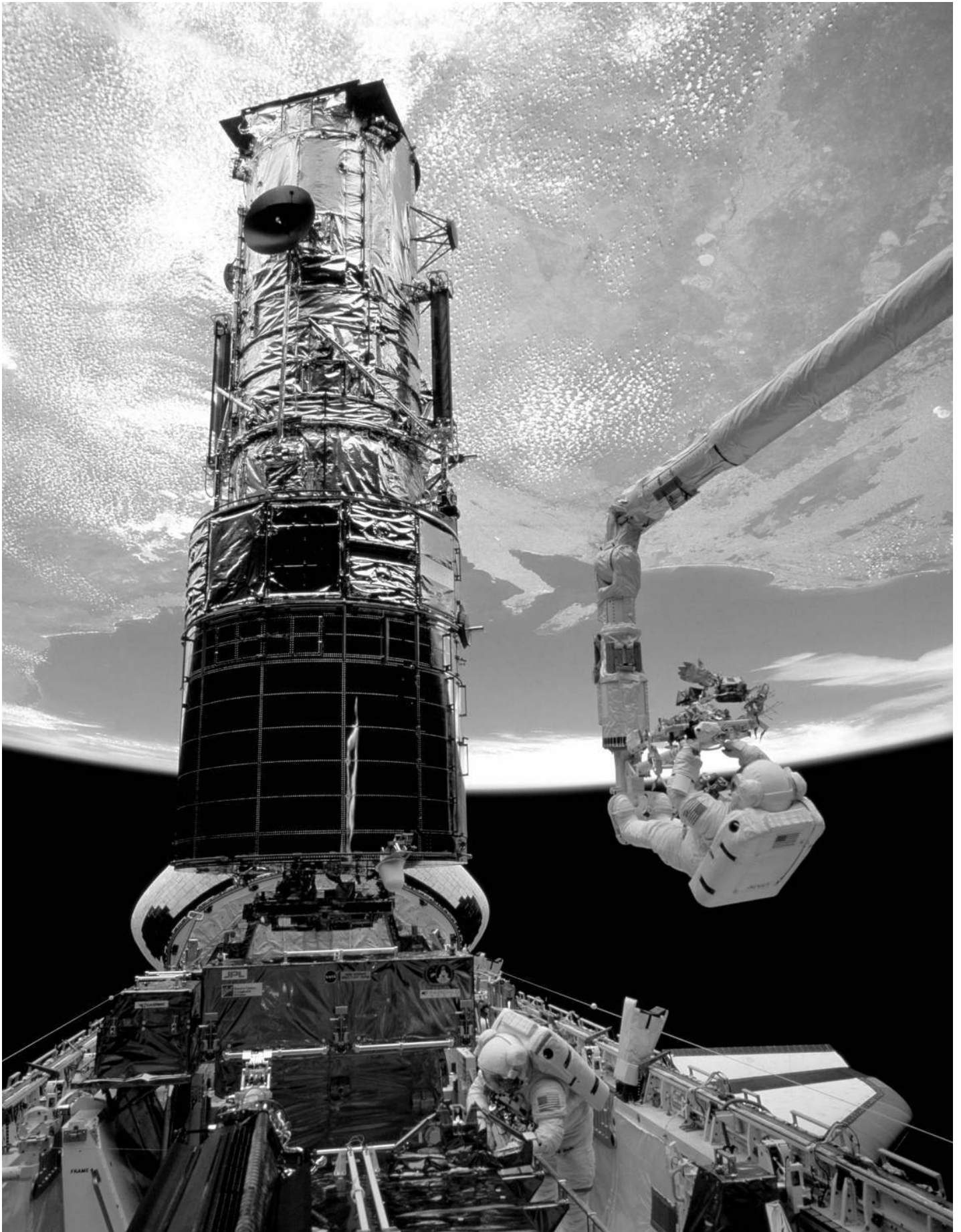


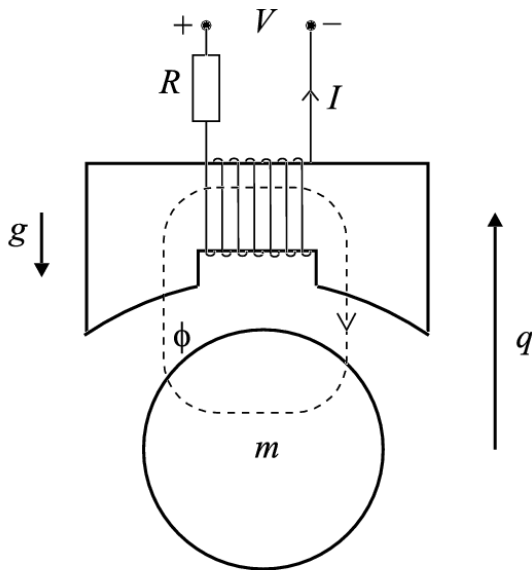
Figuur 3 Compositie

Zeker wat betreft het besturingsaspect is de wiskundige systeemtheorie gerelateerd aan de mathematische besliskunde, en een belangrijke mogelijkheid om het dynamisch gedrag van het systeem zo goed mogelijk te ontwerpen is *optimalisatie*. Hierbij dient aangetekend te worden dat het optimalisatiecriterium vaak niet eenduidig gegeven is, en vooral functioneert als een manier om in het oerwoud van mogelijke terugkoppelingen een structuur aan te brengen.

Natuurlijk is het bovenstaande hopeloos algemeen en zullen velen van u zeggen: "Dat doen wij eigenlijk ook". Dat is grotendeels ook zo, maar de kracht van de wiskundige systeem- en besturingstheorie is juist om dit conceptuele standpunt in wiskundige theorieën te formaliseren, en deze theorieën werkbaar te maken voor verschillende deelklassen van systemen. Gelukkig kan de systeemtheorie hierbij sterk profiteren van theorieën die reeds in andere vakgebieden zijn ontwikkeld. In het bijzonder wil ik de theorie van gedistribueerde systemen in de informatica noemen, en de theorie van netwerkmodellering van fysische systemen. Ik mag mij gelukkig prijzen dat beide genoemde

Foto rechts In de ruimtevaart wordt veel met zelfbesturende systemen gewerkt. Hier een foto van astronaut F. Story Musgrave, die aan een Remote Manipulator System (RMS) is bevestigd. Hij staat op het punt om naar de top van de Hubble telescoop te worden gebracht om daar reparaties te verrichten. Copyright: NASA





$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \\ \frac{\partial H}{\partial \phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} V$$

$$I = \frac{\partial H}{\partial \phi}$$

$$H(q, p, \phi) = mgq + \frac{p^2}{2m} + \frac{\phi^2}{2k_1 \left(1 - \frac{q}{k_2}\right)}$$

Figuur 4 Magnetisch zwevende bal

vakgebieden hier op de Universiteit Twente meer dan uitstekend vertegenwoordigd zijn, en ik zal mij inzetten om de interdisciplinaire traditie van de systeemtheorie in deze samenwerking voort te zetten.

Andersom ben ik ervan overtuigd dat, juist omdat het boven geschetste kader zo herkenbaar is voor velen van u, de wiskundige systeemtheorie een zeer fundamentele bijdrage kan leveren aan het onderzoek en onderwijs in verschillende wetenschapsgebieden, en aan hun onderlinge communicatie. De wiskundige systeemtheorie is dan ook een uitstekend voorbeeld van toegepaste wiskunde *pur sang*; ik zal daar later op terug komen.

Het bovengeschetste kader van compositie van open systemen voor modellering, specificatie, simulatie, analyse, ontwerp en regeling, is te algemeen en vaag om in concrete toepassingsgebieden werkbaar te kunnen zijn. Het doel van de wiskundige systeemtheorie is daarom om geschikte deelklassen van systemen wiskundig te formaliseren, en hiervoor een wiskundige theorie te ontwikkelen met bijbehorende gereedschappen en algoritmen.

De grote *success story* van de wiskundige systeem- en regeltheorie gedurende de afgelopen veertig jaar is de ontwikkeling van een theorie van open systemen beschreven door lineaire differentiaalvergelijkingen, waarbij de externe variabelen in *ingang*- en *uitgang*-variabelen verdeeld zijn. Deze theorie (in *toestandsvorm* of in *frequentiedomeinvorm*) is uitermate succesvol gebleken, zowel vanuit theoretisch als vanuit toepassingsstandpunt. Het behoort, zeker in de vorm van vele *MATLAB Toolboxen*, tot het dagelijkse gereedschap van veel ingenieurs. Hoewel er nog steeds belangrijke ontwikkelingen binnen deze theorie

plaats vinden (onder andere het laten vallen van het soms beperkende onderscheid tussen in- en uitgangsvaariabelen in de zogenaamde *behavioral theorie* [9]) zijn er buiten deze klasse van systemen grote uitdagingen voor een wiskundige theorieontwikkeling die het contact met, en de impact op, toepassingsgebieden verder kunnen versterken.

Ik wil hiervan twee voorbeelden bespreken waaraan reeds de afgelopen jaren binnen de vakgroep Systeem-, Signaal- en Besturingstheorie succesvol is gewerkt.

Systeemtheoretische modellering van open fysische systemen

Het eerste voorbeeld betreft de wiskundige formalisering van netwerkmodellen van fysische systemen. De prevalentie van modelleren van eindigdimensionale fysische systemen voor simulatie en regeling is *netwerkmodellering*, waarbij het mogelijk complexe fysische systeem als een interconnectie van ideale elementaire deelsystemen wordt beschouwd. Kenmerkende voorbeelden zijn complexe mechanische systemen, elektrische netwerken, en hydraulische systemen. Voordelen van de netwerkbenadering zijn legio: modellen kunnen gemakkelijk uitgebreid en veranderd worden, de elementaire deelsystemen kunnen als toekomstige bouwstenen in bibliotheken opgeslagen worden, sommige eigenschappen van het fysische systeem kunnen al op basis van het netwerkmodel (zonder de vergelijkingen) bestudeerd worden, en deze modellering leent zich uitstekend tot automatisering.

Een conceptueel zeer aantrekkelijke methode van netwerkmodellering is de methode van bondgrafen, zoals geïntroduceerd door Paynter in het begin van de zestiger jaren en onder andere hier bij de faculteit Elektrotechniek door Van Dixhoorn en Breedveld tot bloei gebracht. In een bondgraaf wordt de interconnectie tussen de deelsystemen gebaseerd op vermogensoverdracht. Dientengevolge kunnen ook systemen met deelsystemen uit verschillende fysische domeinen (zoals het mechanische, elektrische, hydraulische en thermodynamische domein) systematisch gemodelleerd worden. In deze zin vormen bondgrafen een universele methode voor netwerkmodellering van eindigdimensionale fysische systemen. Het in Twente ontwikkelde 20-sim is een uitstekend modellering- en simulatiepakket gebaseerd op bondgrafen.

Aan de andere kant is de klassieke wiskundige modellering van bijvoorbeeld mechanische systemen veelal gebaseerd op variatieprincipes. Dit resulteert in de beschrijving van het systeem middels de befaamde *Euler-Lagrange*- en *Hamilton*-vergelijkingen, die aanleiding hebben gegeven tot een ongelooflijk rijke theorie aangaande stabiliteit, integreerbaarheid, symmetrie en reductie. Bijzonder aantrekkelijk is dat deze theorie volledig coördinaatvrij geformuleerd kan worden, door middel van de meetkundige objecten van een *symplectische* en *Poisson*-structuur.

De vraag is derhalve hoe beide aanpakken, de één globaal, gebaseerd op een variatieprincipe, en de ander compositioneel, gebaseerd op interconnectie van elementaire deelsystemen, zich verhouden tot elkaar. Eén van de problemen hierbij is dat de globale manier, uitgaande van de analyse van de vrijheidsgraden van het systeem, de standaard Hamilton-differentiaalvergelijkingen oplevert, terwijl de compositionele manier in het algemeen een gemengd stelsel van *differentiaal*- en *algebraïsche* vergelijkingen genereert.

Het antwoord op deze vraag is zeer aantrekkelijk [1–2]: de manier waarop de elementaire energie-opslaande deelsystemen aan elkaar zijn gekoppeld, inclusief statische vermogensbehoudende verbanden zoals (in een mechanische context) kinematische bindingen en kinematische paren, en (in een elektrische context) transformatoren en gyrotoren, definieert een *meetkundige structuur* op de ruimte

van energievariabelen behorende bij de energie-opslaande elementen. De bewegingsvergelijkingen van het systeem zijn Hamiltons met betrekking tot deze meetkundige structuur en de Hamilton-functie gegeven door de totale opgeslagen energie, alsmede de energiedissipatiestructuur. We noemen deze veralgemeende Hamiltonse systemen *poort-Hamiltonse systemen*, omdat ze zijn opgebouwd uit deelsystemen die door middel van vermogenspoorten met elkaar interacteren.

De gebruikte meetkundige structuur, *Dirac-structuur* genaamd, is een generalisatie van de Poisson-structuur, en laat algebraïsche bindingsvergelijkingen toe. De Dirac-structuur karakteriseert de vermogensdistributie door het systeem, en bepaalt eenduidig de energie-onafhankelijke behoudswetten van het systeem, zoals impuls en totale lading. Bovendien is deze structuur volledig compositioneel: de koppeling van Dirac-structuren definieert weer een Dirac-structuur.

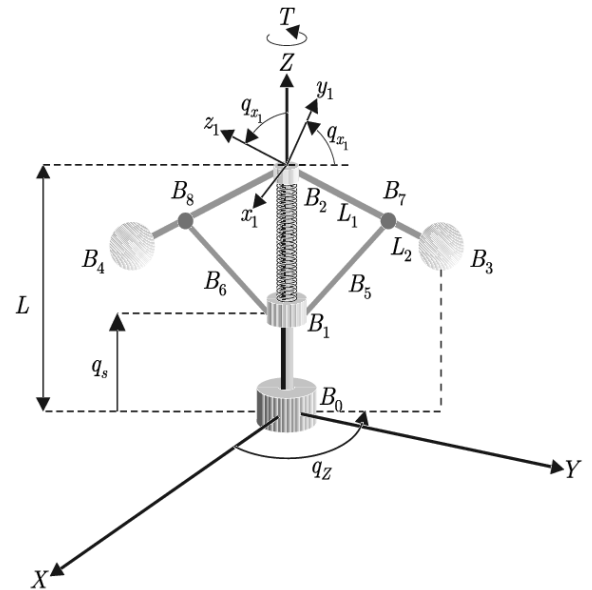
Terwijl de gangbare Hamiltonse formulering van fysische systemen gebaseerd is op de meetkundige structuur van de ruimte van positievariabelen en de bijbehorende impulsvariabelen (eventueel na reductie op basis van symmetrie), wordt in deze nieuwe benadering direct uitgegaan van de ruimte van energievariabelen met daarop een meetkundige structuur gedefinieerd door de compositionele structuur van het systeem. Direct gevolg is dat niet alleen mechanische, maar ook bijv. elektrische en elektromechanische systemen een natuurlijke Hamiltonse formulering toelaten.

Een zeer eenvoudig voorbeeld van de poort-Hamiltonse formulering is al gegeven in figuur 1. De Dirac-structuur wordt in dit geval bepaald door de scheefsymmetrische matrix in de vergelijkingen (die in de elektrische interpretatie correspondeert met de wetten van Kirchhoff). Een eenvoudig voorbeeld van een *elektromechanisch* systeem in poort-Hamiltonse vorm wordt beschreven in figuur 4.

De koppeling van het elektrisch en mechanisch domein vindt in dit geval plaats door de energiefunctie die zowel van de magnetische flux als van de hoogte en de impuls van de metalen bal afhangt. Een meer complex mechanisch voorbeeld is de klassieke Watt reguleerder voor stoommachines [3], zie figuur 5.

De theorie van poort-Hamiltonse systemen biedt vele mogelijkheden voor de *simulatie* en *analyse* van fysische (eindig dimensionale) netwerkmodellen, maar ook voor *regeling* en *synthese* (zie bijvoorbeeld [2, 4]). In het bijzonder kunnen op basis van de Dirac-structuur allerhande structurele eigenschappen van het model worden onderzocht, onafhankelijk van de uiteindelijke bewegingsvergelijkingen, die in een voor simulatie en regeling geschikte vorm kunnen worden gegoten. Door extra deelsystemen aan te koppelen beïnvloeden we de Dirac-structuur, de Hamilton-functie en de dissipatie-structuur van het totale systeem, en daarmee de dynamische eigenschappen. Ook kan een directe integratie met het modellering- en simulatiepakket 20-sim plaatsvinden, zoals ten dele nu al gebeurt op basis van het werk van collega Stramigioli van EL en de Drebbe-ai-o Golo. Tevens biedt de theorie een zeer geschikt kader voor de bestudering van *multi-modale* fysische systemen, zoals vermogensomzetters en wandelende robotten. In dit geval wordt het schakelen tussen de verschillende *modes* van het systeem weergegeven door het schakelen tussen verschillende Dirac-structuren.

Gedurende de afgelopen twee jaar is ook hard gewerkt om het poort-Hamiltonse kader uit te breiden tot oneindig-dimensionale fysische systemen. In het bijzonder zijn we er in geslaagd om kenmerkende voorbeelden zoals de vergelijkingen van Maxwell voor elektromagnetische velden, en de vergelijkingen van Euler voor een ideale vloeistof, als poort-Hamiltonse systemen te modelleren, waarbij de koppeling met andere poort-Hamiltonse systemen via de rand van het ruimte-



Figuur 5 Watt reguleerder

lijk domein kan plaatsvinden. De randvoorwaarden voor de partiële differentiaalvergelijkingen zijn dus niet gegeven, maar zijn de externe variabelen van deze oneindig-dimensionale open systemen. Dit opent grote mogelijkheden voor de simulatie en regeling van fysische systemen met zowel eindig-dimensionale en oneindig-dimensionale componenten, zoals bijvoorbeeld in meerlichaamsystemen met flexibele componenten, vermogensomzetters met transmissielijnen, en telemanipulatiesystemen. Het is een grote uitdaging om aan deze onderzoekthema's vanuit een wiskundig standpunt vorm te geven, in nauwe samenwerking met mijn collega's van het Cornelis Drebbe Instituut voor Mechatronica en van elders.

Hybride systemen

Hoewel in de zestiger en begin zeventiger jaren van de afgelopen eeuw de grenzen tussen de wiskundige systeemtheorie en de informatica nog vloeïend waren (met als direct punt van contact de automatentheorie), zijn beide disciplines sindsdien ieder hun eigen weg gegaan, en vooral in gebruikte wiskundige formalismen uiteengegroeid. De laatste tien jaar is hierin evenwel een kentering opgetreden, zowel binnen de systeem- en regeltheorie als binnen delen van de informatica.

Binnen de *regeltheorie* is in veel toepassingen het zwaartepunt van de inspanning verschoven naar systeemintegratie en systeemvalidatie. Reden is dat veel technologische systemen steeds complexer worden, en tegelijkertijd dichter bij hun grenzen van performance worden gebracht. Typische voorbeelden zijn chemische processen, regeling van netwerken, en luchtverkeersgeleidingssystemen. Terwijl in de gangbare regeltechniek het zwaartepunt lag bij het ontwerpen van goede regelaars voor de afzonderlijke deelsystemen (of zelfs het ontwerp van een centrale regelaar), leidt dit er toe dat juist de koppelingen tussen de verschillende systeemcomponenten (of systeemcomponenten die in verschillende 'modes' kunnen opereren) cruciaal worden voor de totale performance en betrouwbaarheid van het systeem. Dit is het probleem van *multi-agent control*; inderdaad een andere variant van ons thema *Verdeel en Heers*. Omdat veel van deze koppelingen tussen de deelsystemen van een logische en discrete aard zijn, leidt dit tot de beschouwing van systemen met sterk gekoppelde *continue-tijd dynamica* en *discrete dynamica* (het optreden van 'gebeurtenissen'). Deze gemengde dynamische systemen worden *hybride systemen* genoemd.

In de *technische informatica* heeft men zich al snel gerealiseerd dat rekenkundige processen (op ieder niveau, van chips tot internet) in veel gevallen inherent *gedistribueerd* van aard zijn, als ruimtelijk gescheiden activiteiten die een gezamenlijke taak uitvoeren. Dit leidt er direct toe om de deelprocessen te beschouwen in termen van hun complexe wederzijdse beïnvloeding, dat wil zeggen, als reactieve of open systemen. Vanaf het eind van de zeventiger jaren heeft dit geresulteerd in de ontwikkeling van formele methoden en gereedschappen voor specificatie en verificatie van gedistribueerde communicerende systemen. Met de verdere groei van de informatica en haar technische toepassingen is tenslotte ook de koppeling van software met fysische systemen in zicht gekomen. Men spreekt in dit verband van *embedded software*, om aan te geven dat voor een complete specificatie en verificatie ook de interactie met de fysische apparaten waarvoor de software is ontworpen in beschouwing dient te worden genomen. Dit leidt derhalve ook voor de informatica tot de bestudering van hybride systemen, waarbij de discrete software processen gekoppeld worden aan continue-tijd fysische systemen.

In zekere zin is het bestuderen van hybride systemen het openen van een doos van Pandora, want zowel de systeemtheorie als de informatica zijn niet voldoende toegerust om deze uitermate rijke klasse van dynamische systemen te kunnen beschrijven en te analyseren (zie bijvoorbeeld [5]). De uitdaging is dus om door het bijeenbrengen van de complementaire kennis binnen de informatica en de systeemtheorie in ieder geval voor deelklassen van hybride systemen een bevredigende theorie voor specificatie, verificatie en regeling te ontwerpen. Ik ben blij dat een enthousiaste samenwerking op dit onderwerp met de leerstoel Formele Methodes en Gereedschappen van Informatica is opgestart, onder andere gesteund door twee NWO-ai-o plaatsen. Verder zal ook een zojuist toegewezen EU-kaderproject over stochastische hybride systemen in samenwerking met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) een krachtige stimulans zijn voor dit onderzoekthema binnen het onderzoekinstituut Centrum voor Telematica en Informatie Technologie (CTIT).

Verdere uitdagingen

Nog steeds een zeer belangrijk toepassingsgebied voor de systeemtheorie is de regeltechniek, zoals die beoefend wordt in verschillende technische wetenschappen zoals de elektrotechniek, werktuigbouwkunde en chemische technologie. Het ontwerpen van regelaars voor sterk uiteenlopende technische systemen, zoals servomotoren, chemische processen, laserbewerking en vliegtuigbesturing, biedt grote uitdagingen om de performance van deze systemen te verbeteren, of überhaupt mogelijk te maken.

Belangrijke concepten die de regeltechniek ons heeft geleerd betreffen onder andere de modellering van *onzekerheid* in dynamische systemen, het belang van *terugkoppeling* voor het ontwerp van *robuste* regelaars, *identificatie* van dynamische systemen, de mogelijkheden voor *adaptatie* van regelaars, alsmede de *grenzen aan het regelen*. Al deze concepten hebben een enorm potentieel ook buiten de grenzen van de traditionele regeltechniek, en zijn naar mijn mening van groot belang voor de wiskundige theorie van dynamische systemen. In het bijzonder de toepassing van deze ideeën op de bestudering van niet-lineaire dynamica is een fascinerend gebied dat veel meer aandacht verdient, juist binnen de wiskunde (zie onder andere [6–7]).

Ik wil hier alleen kort op het laatste concept ingaan: de ‘grenzen van het regelen’ (oftewel, de *limits of performance*). Kenmerkend aspect van de regel- of besturingstheorie is dat het zich bezighoudt met het ontwerp van systemen waarbij gedeelten van het totale systeem



Figuur 6 Links: Norbert Wiener en Max Born, rechts: Claude Shannon

vastliggen. Derhalve kan niet het gehele systeem worden ontworpen, maar dienen de aanwezige vrijheidsgraden in het ontwerp zorgvuldig gebruikt te worden om toch dicht bij een gewenst totaal systeemgedrag te komen. Typisch voorbeeld is een systeem met een aantal regelvariabelen dat veel kleiner is dan het aantal interne (toestand-)variabelen. Op zich is het verbazingwekkend te zien hoe effectief regeling kan zijn: een generiek instabiel hoogdimensionaal systeem kan bijvoorbeeld gestabiliseerd worden met behulp van één regelvariabele. Voor een goed systeemontwerp is het evenwel ook onontbeerlijk om de door de vastliggende systeemcomponenten inherente beperkingen van het totale systeem te kunnen beschrijven en kwantificeren. Dit is van eminent belang in de afweging tussen verschillende ontwerpdoelstellingen, die deels conflicterend kunnen blijken te zijn. Voor lineaire systemen zijn deze ‘grenzen van het regelen’ al bestudeerd door Bode [8], terwijl een nieuwe invalshoek wordt geboden door de *behavioral theorie* [9]. De uitbreiding naar andere klassen van systemen is echter grotendeels open.

Hierbij kan een parallel getrokken worden met de *informatietheorie* zoals ontwikkeld door Shannon in de veertiger jaren. Door de formalisering van begrippen als ‘informatie’ en ‘capaciteit van een kanaal’ werd het mogelijk abstract te redeneren over de mogelijkheden en de beperkingen voor informatieoverdracht via een kanaal met ruis, voorafgaand aan een eventueel ontwerp. Deze parallel is overigens meer dan een analogie: in de systeemtheoretische analyse en synthese van complexe systemen zal uiteindelijk ook de informatieoverdracht in de verbindingen tussen de deelsystemen een belangrijke rol spelen.

Toegepaste wiskunde als discipline

Zonder overdrijven kunnen we stellen dat de wiskunde, de ‘koningin der wetenschappen’ (of is dit de theologie?), aan de Nederlandse universiteiten onder druk staat. Voornaamste reden lijkt de afgenomen studenteninstroom, maar ook de beeldvorming van wiskundige onderzoekers als bleke wijsneusjes die puzzels aan het oplossen zijn speelt duidelijk een rol, zowel in de publieke opinie als in de gedachten van universitaire bestuurders, die graag hun universiteit met meer trendy dingen willen laten scoren. Dit is een zorgwekkende ontwikkeling, waarmee de rol van de wiskundebeoefening aan de Nederlandse universiteiten gemarginaliseerd dreigt te worden tot weinig meer dan het verzorgen van toeleverend onderwijs aan andere opleidingen, en het hoeden van het eeuwenoude cultureel erfgoed van de wiskunde.

De wiskunde wordt wel verdeeld in *zuivere wiskunde* en *toegepaste wiskunde*, waarbij het onderzoek in de zuivere wiskunde in eerste instantie door intern wiskundige motieven wordt aangedreven, terwijl het onderzoek in de toegepaste wiskunde vooral gemotiveerd wordt

door vraagstellingen uit andere wetenschappen.

Wat is nu de rol van de toegepaste wiskunde, en waarom dient de toegepaste wiskunde als een zelfstandige discipline aan een universiteit als de Universiteit Twente volwaardig in stand te blijven? Centraal begrip in de toegepaste wiskunde is het *wiskundig modelleren*. Hiermee bedoel ik niet in eerste instantie het afleiden van een correct wiskundig model voor een concrete toepassing, maar veeleer het wiskundig *abstraheren* en *formaliseren* van een conceptueel kader, en de wiskundige theorievorming binnen dit wiskundig formalisme. Zo houdt bijv. de wiskundige statistiek zich bezig met het wiskundig modelleren van onzekerheid, de wiskundige systeem- en besturingstheorie richt zich op het modelleren van open dynamische systemen en de 'maakbaarheid' van dynamisch gedrag door middel van koppeling met andere systemen, terwijl de stochastiek het begrip waarschijnlijkheid modelleert en analyseert. Tweede belangrijk element in de toegepaste wiskunde is de *algoritmiek*. Hier worden de verkregen theoretische resultaten omgezet in algoritmen die toegepast kunnen worden op concrete wiskundige modellen. Met de sterke toename van krachtige en goedkope computers is het bereik van implementeerbare algoritmen zeer sterk toegenomen, en heeft veelal geleid tot gebruikersvriendelijke 'toolboxes' die een grote impact hebben op de wereld van de hedendaagse ingenieur.

De kracht van de toegepaste wiskunde, de wiskundige abstractie en de algemeenheid van de verkregen resultaten, is tegelijkertijd ook haar zwakte. De bijdrage van de wiskunde in bijvoorbeeld technologische toepassingen is niet altijd even goed zichtbaar; zeker niet voor de buitenwacht. Dit geldt voor de theoretische ontwikkelingen, maar veelal ook voor de algoritmische bijdragen omdat 'toolboxes' inderdaad als gereedschapskisten gebruikt worden zonder veel appreciatie voor de onderliggende wiskunde, en eerder met informatica dan met wiskunde worden geassocieerd. Aan de andere kant zijn de bijdragen van de toegepaste wiskunde, juist door hun algemeenheid, vaak veel blijvender dan menig ander onderzoek in de technische wetenschappen. Het vereist daarom een wat langere termijn visie op wetenschappelijk onderzoek om de bijdragen van de toegepaste wiskunde echt op waarde te kunnen schatten.

De toegenomen mathematisering van de wetenschappen is onweersproken, evenals het feit dat de taal van de fysisch-technische wetenschappen de wiskunde is. Tezelfdertijd is de wiskunde niet voorbehouden aan de wiskundigen! Inderdaad zijn belangrijke ontwikkelingen in de wiskunde geïnitieerd door niet-wiskundigen, die vanuit hun eigen vakgebied, veelal gedreven door een sterke wiskundige belangstelling, tot belangrijke doorbraken in de toegepaste wiskunde kwamen. Dit geldt zeker ook voor de systeem- en besturingstheorie. De rol van de wiskundigen is derhalve verre van onaantastbaar. Sterker nog, als de wiskundigen zich terugtrekken op hun wiskunde, dan is de kans groot dat de wiskundige ontwikkeling van andere wetenschapsgebieden door niet-wiskundigen gedaan zal worden. De toegepaste wiskundige zal zijn rol dus in zekere zin moeten bevechten, en de enige manier waarop dit echt succesvol kan zijn is als hij een aanzienlijke domeinkennis van één of meerdere wetenschapsgebieden heeft en in direct gesprek is met partners uit deze gebieden. Als aan deze voorwaarde is voldaan ben ik van mening dat de bagage van de toegepaste wiskundige zo goed is, dat hij een unieke bijdrage aan de wetenschapsontwikkeling kan geven; juist door zijn vermogen tot abstractie en algemeenheid. Het fascinerende feit dat dezelfde wiskundige concepten en technieken toepasbaar zijn op sterk uiteenlopende toepassingen is een zeer overtuigend argument voor het in stand houden en verder tot bloei brengen van een zelfstandige wiskundediscipline aan de universiteit,

voor onderzoek en onderwijs.

De afgelopen jaren is onze faculteit Toegepaste Wiskunde zeer succesvol geweest in het vergroten van het aantal tweede- en derdegeldstroomprojecten. Dit is een goede ontwikkeling die, vooral in samenwerking met partners van andere faculteiten, nog meer kansen biedt. De toegepaste wiskunde als geheel zal echter nooit een echte 'grootverdiener' kunnen zijn, simpelweg omdat landelijk de middelen voor fundamenteel onderzoek beperkt zijn en een eenzijdige focus op derdegeldstroomprojecten het gevaar in zich bergt dat toegepaste wiskunde zich op langere termijn van haar eigenlijke missie vervreemdt. De discipline Toegepaste Wiskunde zal dus haar rol binnen de universiteit op inhoudelijke gronden moeten kunnen beargumenteren.

Universitair onderzoekbeleid

Zoals naar verluidt in vroeger dagen wetenschappers uit verschillende gebieden met elkaar discussieerden over de wetenschap als geheel, zo is heden ten dage een favoriet gespreksonderwerp het universitaire onderzoekbeleid, en meer in het bijzonder de laatste ontwikkelingen en roddels op dit gebied. Ik wil deze gelegenheid aangrijpen om hier slechts een paar losse opmerkingen over te maken. Tevens houd ik mij het recht van 'voortschrijdend inzicht' voor; hetgeen in de universitaire bestuurswereld staat voor het binnen enkele maanden handig kunnen overspringen van de ene mening naar een tegenoverstelde mening.

Toen enige tijd geleden de faculteit Toegepaste Wiskunde in financiële problemen verzeilde was een veel gebezigd argument voor bezuiniging het motto "als we een bedrijf waren zouden we allang failliet zijn", waarop soms logisch werd geantwoord met "ja, maar we zijn geen bedrijf". In zekere zin geeft dit de spanning aan van het gehele universitaire beleid. De maatschappelijke functie van de universiteit is een algemene instelling te zijn voor wetenschappelijk onderwijs en fundamenteel onderzoek. Hierop wordt zij door de maatschappij beoordeeld en hierom wordt zij gerespecteerd. Ook voor het bedrijfsleven is deze 'missie statement' van de universiteit klip en klaar. Uitgangspunt van ieder universitair onderzoekbeleid dient daarom de kwaliteit van het fundamenteel onderzoek te zijn, waarbij deze kwaliteit gemeen wordt op basis van internationale wetenschappelijke publicaties. Daarnaast is het van belang om deze kwaliteit te gelde te maken door het aanvragen van extra onderzoeksgelden in de tweede- en derdegeldstroomsfeer, om zo het onderzoekspotentieel van de universiteit te kunnen verhogen.

Hoe kan de onderzoekskwaliteit van de universiteit in stand gehouden en verbeterd worden? Naar mijn mening is dit vooral een kwestie van aanstellings- en personeelsbeleid: het benoemen van goede onderzoekers (en onderwijzers), en hen behouden en zich laten ontwikkelen. Belangrijk element hierin is het scheppen van een stimulerend onderzoekklimaat waarin de prestaties van individuen worden gewaardeerd. Hierbij denk ik nog niet in de eerste plaats aan de materiële waardering — dit is niet de uiteindelijke motivatie voor een universitaire loopbaan — maar aan waardering in de collegiale sfeer en aan loopbaanontwikkeling. Per definitie zal dit een zeer individuele zaak zijn, waarvoor geen uniforme meetlat kan worden aangelegd. Niets is meer demotiverend voor een onderzoeker die uitstekend publiceert dan te horen dat hij eigenlijk te weinig derdegeldstroomprojecten verwerft.

In de huidige structuur zie ik de volgende problemen met het personeelsbeleid. Universitaire bestuurders hebben de neiging om hun verantwoordelijkheid naar lagere regionen door te schuiven. In het bijzonder denkt men aan de leerstoelen als 'business units' die 'afgerekend' kunnen worden op hun prestaties. Dit is misschien uit financiële

managementoverwegingen aantrekkelijk, maar bergt vele gevaren in zich. Natuurlijke academische eenheden zijn niet de leerstoelen maar de wetenschappelijke disciplines, de 'departments' in Amerikaanse terminologie. Binnen deze disciplines dienen de wetenschappers alle ruimte te hebben om zich individueel te ontwikkelen en initiatieven te nemen, ook buiten de leerstoel om. Leerstoelen, of combinaties van leerstoelen, hebben een eerste verantwoordelijkheid voor het onderzoek en onderwijs op deelgebieden. Leerstoelhouders vervullen in dit geheel een wetenschappelijk leidende rol. Echter niet in die zin dat zij het onderzoek en onderwijs voor de andere leden van de leerstoel bepalen, maar veeleer als wetenschappelijk stimulator en initiator, en als 'wetenschappelijk uithangbord' van de leerstoel.

De invulling van de rol van leerstoelhouder vooral als manager van de leerstoel is gevaarlijk. Allereerst is de combinatie van wetenschappelijk onderzoek en management spanningsvol. Dit kan leiden tot de beeldvorming van een hoogleraar als 'iemand in toga, die tegelijk zijn eigen broek moet ophouden'. Ook hier geldt weer dat het functioneren van een hoogleraar niet langs één meetlat beoordeeld dient te worden. Het nadrukkelijk ophangen van een universitaire organisatie aan een fictief beeld van een hoogleraar kan echter gemakkelijk tot problemen leiden. In de tweede plaats kan een te grote nadruk op de managersrol van de hoogleraar er toe leiden dat de overige leerstoel leden de bescherming van de leerstoel verkiezen boven het ontwikkelen van zelfstandige (en leerstoeloverschrijdende) initiatieven. In dit opzicht was de oude WUB, waarin de verantwoordelijkheid voor onderwijs en onderzoek bij de gehele vakgroep lag, veel beter dan de huidige situatie.

De wetenschappelijke onderzoekwereld kan per definitie niet hiërarchisch gestructureerd zijn. Immers, in wetenschappelijk onderzoek is iedereen gelijk. In dit opzicht is de Angelsaksische structuur van de universiteiten waarbij alle vaste stafleden direct onder de 'department chairman' ressorteren een beter voorbeeld. De UD's en zeker de UHD's dienen, op basis van hun individuele kwaliteiten en expertise, de kans te krijgen een volwaardige rol te spelen in alle universitaire processen. Klein, maar misschien typerend, voorbeeld is de huidige terminologie 'assistent promotor' voor de dagelijkse begeleider van een aio, hetgeen toch zeker (in navolging van andere universiteiten) in *copromotor* verbeterd zou moeten worden.

Tenslotte, onderzoekbeleid en de universitaire onderzoeksinstituten. 'Sturing' van onderzoek betekent voornamelijk 'stimulering' en het uitbouwen en bundelen van bestaande expertise die nauw met personen

is verbonden. 'Top' onderzoeksinstituten kunnen niet opgericht worden, maar dienen opgebouwd te worden, waarbij personeelsbeleid en incentives voor samenwerking sleutelementen zijn. Expertise in fundamenteel technisch-wetenschappelijk onderzoek kan slechts langzaam worden opgebouwd, zowel in individuele als in organisatorische zin (zeker op een Nederlandse universiteit met beperkte financiële mogelijkheden). Universitaire onderzoeksinstituten kunnen een belangrijke en nuttige rol spelen in het stimuleren van interdisciplinaire samenwerking en het bundelen van krachten voor gemeenschappelijke initiatieven en de verwerving van externe onderzoeksgelden. Ook als 'uithangbord naar buiten' zijn zij van veel belang. Als interdisciplinaire instituten dienen zij per definitie 'open dynamische systemen' te zijn, met vloeiende grenzen die gemakkelijk in de tijd veranderen, zonder in statische constellaties te verstarren.

Het vakgebied van de wiskundige systeem- en besturingstheorie, zoals ik het boven heb geschetst, heeft inhoudelijk aansluiting bij verschillende van de onderzoeksinstituten van deze universiteit. Ik ben blij dat de huidige samenwerking met collegae van andere faculteiten floreert binnen het Cornelis Drebbel Instituut voor Mechatronica en binnen het Centrum voor Telematica en Informatie Technologie (CTIT). Ik zal mij inzetten om de 'dynamica' van deze instituten verder te versterken.

Afronding

Wiskunde, en zeker toegepaste wiskunde, is een prachtig vak. Het trachten wetenschappelijke concepten en resultaten wiskundig te formaliseren, en met elkaar te relateren en tot hun essentie terug te brengen, om dan vervolgens met deze objecten verder te kunnen redeneren, en algemene resultaten af te leiden die weer terugvertaald kunnen worden naar toepassingsgebieden, is een fascinerende ontdekkingsreis, die nooit ophoudt. Bron voor deze fascinatie is voor mij de verwondering, verwondering deels over de kracht en effectiviteit van de wiskunde, maar vooral verwondering over de nieuwe horizons die altijd weer opdoemen op deze trektocht van de menselijke geest. Het is een voorrecht om binnen zo'n traditie werkzaam te zijn, en deze te kunnen doorgeven aan een jongere generatie, middels onderwijs en begeleiding van promovendi. Het vakgebied van de wiskundige systeem- en besturingstheorie biedt ongekeerde mogelijkheden voor wetenschappelijke ontdekkingsreizen. Ik verheug me op toekomstige reizen in het aangename reisgezelschap van de afdeling Systeem-, Signaal- en Besturingstheorie, en van collegae van andere faculteiten en elders. ❧

Noten

- 1 A.J. van der Schaft, B.M. Maschke, The Hamiltonian formulation of energy conserving physical systems with external ports, *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, 49, pp. 362–371, 1995.
- 2 A.J. van der Schaft, *L₂-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*, 2nd revised and enlarged edition, Springer-Verlag, London, 2000.
- 3 Watt's governor, *Britannica* DVD 2000, 1994–2000 Encyclopaedia Britannica, Inc.
- 4 R. Ortega, A.J. van der Schaft, I. Mareels, B.M. Maschke, Putting energy back in control, *IEEE Control Systems Magazine*, 21, pp. 18–33, 2001.
- 5 A.J. van der Schaft, J.M. Schumacher, *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems*, Springer Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol.251, Springer-Verlag, London, 2000.
- 6 S. Sastry, *Nonlinear Systems: Analysis, Stability and Control*, Springer, New York, 1999.
- 7 H. Nijmeijer, A.J. van der Schaft, *Nonlinear Dynamical Control Systems*, Springer-Verlag, New York, 1990 (4th printing 1998).
- 8 H. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, D. van Nostrand, New York, 1945.
- 9 J.C. Willems, On interconnections, control, and feedback, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42, pp. 326–339, 1997.