

..... Bewogen toestand

Systeemdynamica in het groen

PROF. DR. IR. G. VAN STRATEN

Rede bij het afscheid als hoogleraar Meet-, Regel- en
Systeemtechniek aan Wageningen University op 13 oktober 2011



WAGENINGEN UNIVERSITY

WAGENINGEN UR

Bewogen toestand

Systeemdynamica in het groen

PROF. DR. IR. G. VAN STRATEN

Rede bij het afscheid als hoogleraar Meet-, Regel- en
Systeemtechniek aan Wageningen University op 13 oktober 2011



WAGENINGEN UNIVERSITY

WAGENINGEN UR

“Any state of action or passion implies previous action or passion”

“... and more than that, first principles, even if they appear certain, should be carefully considered”

The Death of Socrates (from the Dialogues of Plato,[1])

Bewogen toestand

Systeemdynamica in het groen

Geachte toehoorders¹,

Kent u het verhaal van de ezel tussen twee hooibergen...? Hij verhongerde omdat hij geen keuze kon maken. Zo voelde ik mij ook enigszins bij het voorbereiden van deze afscheidsoratie. Zou ik gaan spreken over al het moois dat we in de afgelopen jaren hebben bereikt hier in Wageningen aangaande regeltechniek in een duurzame wereld, of juist over hoe ik in de jaren van mijn werkzame leven het academisch bedrijf heb zien veranderen, of moet ik zeggen, in zeiltermen, heb zien verlijeren? Stof genoeg, dus.

Ik heb er uiteindelijk voor gekozen u in dit afscheidscollege een kijkje te gunnen in een aantal opvallende aspecten van het werk van mij en mijn groep hier in Wageningen. Het gebied van de meet-, regel- en systeemtechniek is bij velen van u relatief onbekend, en ik wil dan ook beginnen u daarin kort mee te voeren. Vervolgens wil ik aangeven wat de meet- regel- en systeemtechniek in Wageningen te zoeken heeft. Ik zal u enkele van onze successen laten zien. En ja, en passant zal ik mij veroorloven enkele opmerkingen te maken over het onderwijs in dit vakgebied, over het universitaire bedrijf, en over de toekomst.

Wat is regeltechniek?

In de kern houdt dit vakgebied zich bezig met de vraag hoe we een systeem of proces kunnen laten doen wat wij willen. Als we deze omschrijving iets nauwkeuriger bekijken, dan vallen drie dingen op:

- We moeten weten wat we willen;
- We moeten invloed kunnen uitoefenen op het systeem;
- We moeten begrijpen hoe het systeem werkt.

...

Hoewel systeem en proces niet helemaal hetzelfde zijn zal ik die begrippen in deze tekst nogal losjes door elkaar heen gebruiken. Dat proces of systeem moet iets doen. Daarmee zullen we in het algemeen bedoelen dat het iets anders moet doen dan wanneer het aan zijn lot wordt overgelaten. Dit vereist dat we van buiten af invloed kunnen uitoefenen op het proces. Om dat goed te kunnen doen moeten we enigszins begrijpen hoe het systeem werkt. En ten slotte, en eigenlijk het allerbelangrijkste, moeten we onder woorden kunnen brengen wat we willen. Dit lijkt volkomen triviaal, maar in de praktijk is dit gedeelte juist het deel dat tot de meeste moeilijkheden, verhitte discussies, en teleurstellende ervaringen leidt.

Laat ik u eerst een eenvoudig voorbeeld geven dat iedereen kent. Stel iemand zegt: "Ik wil de temperatuur in deze kamer kunnen regelen". Zo geformuleerd, is de vraag als doel nog volkomen ongeschikt. Wat wil je nu precies? Eén vaste temperatuur, zeg 20 °C? Of juist een comfortzone waarbij de temperatuur tussen 19 en 21 °C mag liggen? Mag die temperatuur iets lager zijn als het buiten kouder is, of binnen droger, en iets hoger als het buiten warmer is, of binnen vochtiger? Moeten die waarden flexibel ingesteld kunnen worden, bijvoorbeeld als we niet thuis zijn? Of willen we een compromis sluiten tussen behaaglijkheid en energieverbruik? U ziet, een ogenschijnlijk simpel doel vergt heel wat doorvragen om er achter te komen waar het de gebruiker echt om gaat. Om een goed systeem te kunnen ontwerpen is het scherp stellen van het doel van ongelooflijk groot belang.

Weten we het doel, dan komt de tweede vraag: wat hebben we ter beschikking om met het systeem ons doel te bereiken? Maar wacht even: welk systeem? Alleen de kamer? Of de kamer plus verwarmingssysteem? En de ketel? Is er misschien ook nog warmteopslag in de bodem? Dan krijgen we allerlei apparatuur, die ook deel gaat uitmaken van ons totale systeem. Ook dit is een kenmerk van ons vakgebied: het systeem kan worden opgevat als een samenstel van deelsystemen, elk met hun eigen gedrag. Die systemen kunnen dan afzonderlijk worden bestudeerd, wat de zaak eenvoudiger maakt, maar ze moeten ook worden gezien in hun onderlinge samenhang.

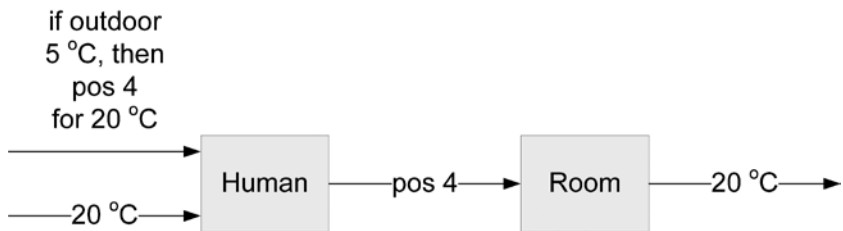
Als we eenmaal helderheid over een systeem hebben, en een duidelijk doel, pas dan kunnen we ons gaan werpen op de eigenlijke vraag van de regeltechniek, namelijk hoe een regelsysteem te ontwerpen waarmee we het systeem kunnen laten doen wat wij willen.²

Nu is het zo dat een gebruiker bij het formuleren van zijn wensen onmogelijke eisen kan stellen. Bijvoorbeeld, iemand kan willen dat bij binnenkomst in een koude kamer de temperatuur onmiddellijk een aangename waarde aanneemt, maar we weten ook allemaal uit ervaring dat dat niet gaat. Dit komt door de inertie van het systeem, en dit is de belangrijkste oorzaak van dynamisch gedrag. We zullen dus bij het ontwerpen van een regeling en bij het formuleren van onze doelen terdege rekening moeten houden met de dynamische eigenschappen van het systeem in kwestie. Kortom, de dynamica staat in ons vakgebied centraal.

Sturen of regelen?

Stel dat ik uit ervaring weet hoe de kamertemperatuur zich gedraagt als je aan de radiatorknop draait, dus bijv. dat een verdraaiing van stand 2 naar 4 een temperatuurverhoging geeft van 4 °C. Stel bovendien dat ik weet dat stand 2 een temperatuur veroorzaakt van 16 °C. Als ik dan eis dat het 's nachts 16 °C is en overdag 20 °C, dan zou ik zonder ook maar één enkele meting te doen als voorschrift kunnen hanteren dat de knop 's nachts op 2 en overdag op 4 moet

.....

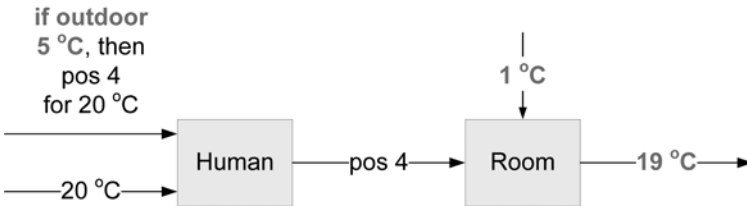


.....

Figuur 1. Open lus sturing. Als het buiten 5 °C is dan is bij stand 4 van de radiatorknop een temperatuur van 20 °C te verwachten.

worden gezet. Deze manier van regelen staat bekend als ‘open lus sturing’. Je zou het ook kortweg ‘sturen’ kunnen noemen, net zoals het verdraaien van het stuur van een auto leidt tot het afleggen van een bepaalde bocht.³

Nu weet iedereen dat die vlieger niet helemaal opgaat. Als het buiten een stuk kouder wordt, dan is een vaste verstelling van de knop niet genoeg.

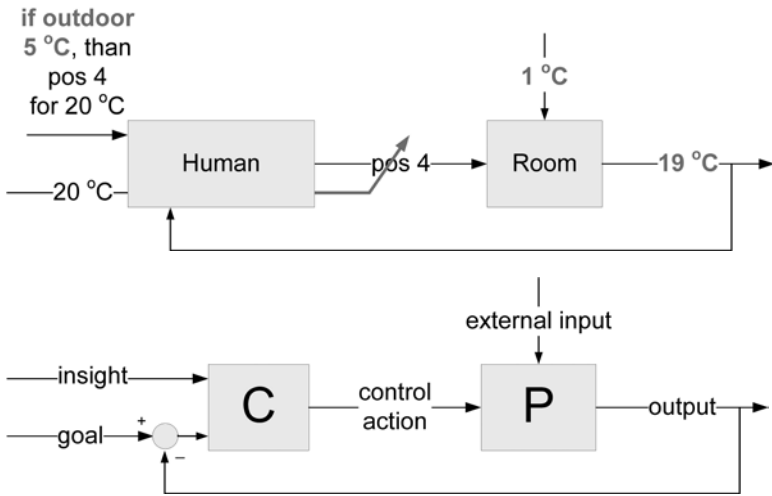


Figuur 2. Problemen met open lus sturing. Als de externe invloed (1 °C hier) afwijkt van de veronderstelde waarde (5 °C) zal ook het resultaat afwijken (19 °C i.p.v. 20 °C).

Wat we nodig hebben is terugkoppeling: we gaan de temperatuur meten, en als die achterblijft, dan draaien we de knop verder open. We hoeven dat niet zelf te doen, maar kunnen dit automatiseren, zoals het geval is in een radiatorthermostaat. Er is dus een terugkoppeling van de uitkomst van het proces (de temperatuur) naar de beïnvloedende variabele (de stand van de knop). Het principe van terugkoppeling, dus het sluiten van de lus, staat centraal in de regeltechniek.

We hebben nu dus, in beginsel, twee belangrijke situaties: open lus sturing, waarin we dus voldoende over het systeem en de externe invloeden weten; en gesloten lus sturing, waar we het gebrek aan volledige kennis over het gedrag van het systeem en de externe invloeden tegengaan via terugkoppeling. Dat noemen we dan regelen.

We hebben gezien dat in elk geval bij open lus sturing kennis over het gedrag van het systeem onontbeerlijk is. Nu denk u misschien dat dat bij regelen in gesloten



Figuur 3. Voorbeeld van gesloten lus sturing door de mens (boven), en een generiek schema met een automatische regelaar (onder); P = proces, C = regelaar.

lus niet zo nodig is. Inderdaad wordt deze gedachte gevoerd door de praktijk van eenvoudige aan/uit regelaars, zoals bij de eerste generatie verwarmingsthermostaten, of door de overbekende PID regelaars die je overal in de procesindustrie tegenkomt. Het succes van die regelingen, die het ogenschijnlijk ook zonder kennis van het systeem goed doen, heeft geleid tot het tragische misverstand dat het met dat regelen zo'n vaart niet loopt. Dit idee heeft nogal postgevat bij klassieke procestechnologen, en is er misschien mede debet aan dat het met het academisch onderwijs in Process Control in Nederland zo droevig is gesteld.⁴

Maar als we er wat verder over nadenken komen we al snel tot de slotsom dat ook in gesloten lus een goede kennis van de relevante dynamica van het systeem onontbeerlijk is voor het bereiken van het doel. Weliswaar kan men ook tot een regeling komen via leren en evolutie, maar dat is nogal inefficiënt, en er zijn geen harde uitspraken te doen of we echt het onderste uit de kan hebben gehaald.

In het voorbijgaan kan ik het niet laten op te merken dat het sturingsdenken, dus in open lus zonder terugkoppeling, wijd verbreid is onder politici, universiteitsbestuurders en procestechnologen (en dit rijtje zou best nog wat langer kunnen zijn). Dat is niet erg als voldaan zou zijn aan de belangrijke voorwaarde dat je voldoende over het systeem weet, maar dat is vaak niet het geval. Zo wordt het verband tussen maatregel en effect dikwijls niet geschraagd door empirisch onderzoek, en ook de dynamiek, d.w.z. de tijd die het duurt om van A naar B te komen, wordt niet zelden veronachtzaamd. En als men al zou meten om terug te kunnen koppelen, dan wordt vaak over het hoofd gezien dat de vertraging in het beschikbaar komen van meetgegevens én in het implementeren van maatregelen destabiliserend kan werken op het systeem als geheel.⁵

En waar, naar mijn vaste overtuiging, slecht ontworpen en slecht afgestelde regelkringen in de proces- en de voedingsindustrie een bron zijn van flinke economische verliezen, zo is dat ook het geval bij het besturen van organisaties, en daar komen de emotionele verliezen dan nog bij.

Metten = niet-weten

Op dit punt is het belangrijk ons te realiseren waarom terugkoppeling nodig is. Zouden we alles weten van het systeemgedrag en van de toekomstige externe invloeden, dan zouden we de manipuleerbare variabelen – ook wel stuurvariabelen genoemd - zo kunnen kiezen dat het systeem zo goed mogelijk het gewenste gedrag vertoont (binnen de fysische mogelijkheden), en meten zou dan overbodig zijn.

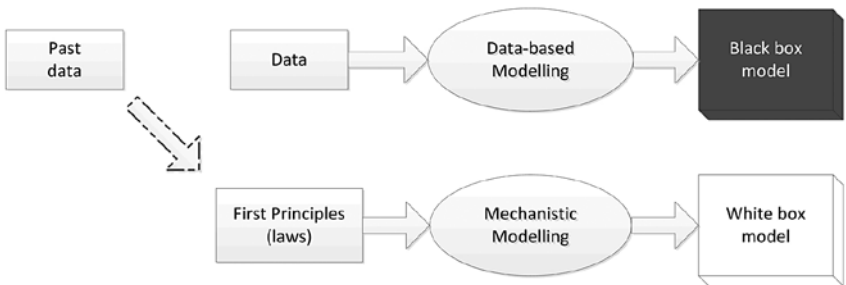
Andersom is dus het niet-weten er de oorzaak van dat we moeten meten. Dus: meten = niet-weten. Ik dank deze uitspraak aan mijn medewerker Gerard van Willigenburg. Hij wil hiermee de studenten duidelijk maken dat sturing van een systeem om een gewenst doel te bereiken in principe mogelijk is zonder te meten, als we werkelijk alles zouden weten over het systeem binnen zijn grenzen, en over de signalen of invloeden die van buiten komen. Deze gedachtegang heeft verstrekkende gevolgen, want binnen deze filosofie komt bij het uitwerken van een regelmethodiek de nadruk te liggen op de inspanningen om ‘alles’ of in elk geval ‘voldoende’ over het systeem te weten te komen. Dat betekent dat we ons bij het beschrijven van het systeem met wiskundige modellen primair laten leiden door fundamenteel onderzoek, en niet zozeer door toevallig beschikbare meetgegevens.

. . .

Dynamische modellen

Het zal duidelijk geworden zijn dat je, zowel in open als gesloten lus, alleen tot goede resultaten kunt komen als je beschikt over kennis van de systeemdynamica, ofwel het gedrag van het systeem in de tijd.

Nu kan het zijn dat de kennis van het gedrag door ervaring in je hoofd zit. De meeste mensen weten wel ongeveer hoever ze thuis de warme kraan van de douche moeten opendraaien om een aangename temperatuur te hebben. Maar als je ergens anders komt is die ervaring van niet veel nut. Om tot een algemeen en overdraagbaar resultaat te komen is het handig die ervaring te consolideren in een paar wiskundige formules. Dat kan bijvoorbeeld door een reeks waargenomen meetgegevens voor het specifieke systeem in een beknopte formulevorm te brengen. We spreken dan van een zwarte doos of black box model. Het kan ook door het model te baseren op fysische wetten – ook wel ‘first principles’ genoemd. In dat laatste geval zijn er constanten die samenhangen met bijvoorbeeld de afmetingen en de materiaaleigenschappen van het systeem. Die constanten noemen we parameters. De waarde kunnen we soms in handboeken opzoeken, of we kunnen ze proberen te ontleen aan de waargenomen feiten door het model op de data te fitten. Bedacht moet worden dat ook de wetten en parameters volgens first principles in feite het resultaat zijn van data uit het verleden.



Figuur 4. Modelleer paradigma's.

Hoe het ook zij, een wiskundig model is dus in feite niets anders dan geconsolideerde ervaring die ofwel specifiek is voor het betreffende systeem – zwarte modellen –, ofwel generiek is voor alle soortgelijke systemen – witte modellen⁶. Er volgt ook uit dat voor een systeem dat nog niet bestaat een black box model zinloos is, terwijl het wel mogelijk is er een wit model voor te maken, als je tenminste een idee kunt krijgen over de fysische wetmatigheden die een rol spelen. Het blijft echter nodig om dit altijd achteraf te valideren, een stap die uit gemakzucht, misplaatste arrogantie, of simpelweg gebrek aan geld of tijd helaas maar al te vaak wordt overgeslagen.

Optimaal sturen en regelen

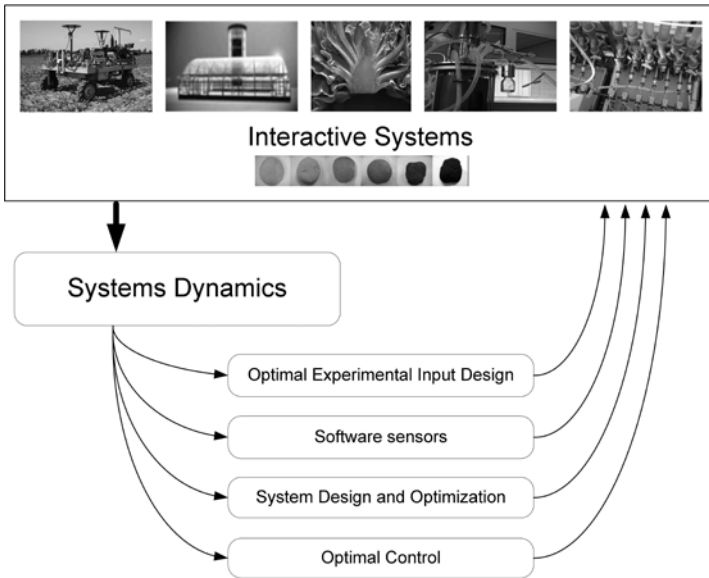
Eenmaal in het bezit van een dynamisch model, van een goed geformuleerde doelstelling en van een verwachting over de meetbare externe invloeden ([2]) is het een kwestie van techniek om te gaan berekenen hoe we moeten sturen om het doel te optimaliseren, dus bijv. winst maximaliseren of kosten minimaliseren. In open loop wordt dit ook wel aangeduid met de term dynamische optimalisatie. Onmeetbare, onvoorspelbare verstoringen gaan we dan te lijf met terugkoppeling. Het principe van optimaal sturen is een rode draad door veel van het werk dat we de afgelopen jaren in Wageningen hebben gedaan. Ik zal er u later nog een voorbeeld van geven.

Maar als je optimaal kunt sturen, dan kun je dezelfde principes ook gebruiken om optimaal te ontwerpen, en optimaal te experimenteren, aspecten die ook kenmerkend zijn geworden voor ons werk.

MRS in Wageningen

Ik kom dan nu op de activiteiten van MRS in Wageningen. We hebben altijd gewerkt in een matrixstructuur, met daarin aan de ene kant de disciplinaire invalshoek, en aan de andere kant de toepassingsgebieden. In de figuur zijn de disciplinaire bijdragen weergegeven, te weten optimal input design en software sensors, procesontwikkeling en optimalisatie, en [optimaal] regelen. Aan de bovenzijde een aantal typisch Wageningse toepassingen.

. . .

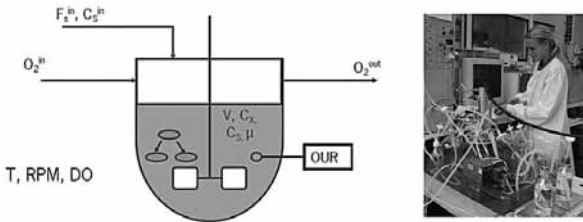


Figuur 5. Disciplinegebieden en toepassingsgebieden.

Deze structuur is gekozen om het mogelijk te maken voor studenten uit verschillende studierichtingen om bij ons af te studeren, niet als meet- en regeltechnicus, maar als agrotechnoloog, bioprocestechnoloog, milieutechnoloog of voedingsmiddelentechnoloog met een goede kennis van de systeemdynamica. Voordat ik wat verder inga op onze instrumenten meten, modelleren en regelen, wil ik eerst een paar voorbeelden noemen van maatschappelijke problemen die voor ons een inspiratiebron zijn geweest.

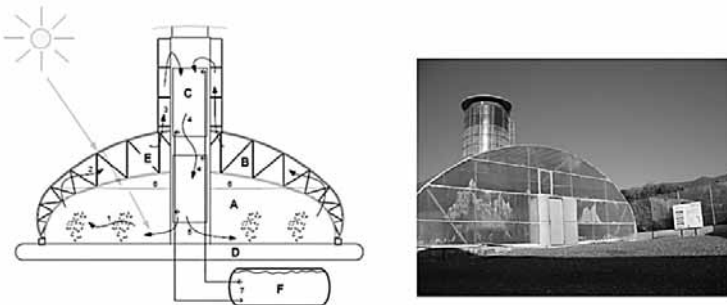
Motivatie

Figuur 6 toont onderzoek dat wij hebben gedaan om een vaccinbereidingsproces (voor het kinkhoest vaccin) zodanig herhaalbaar en voorspelbaar te maken, dat het aantal dierproeven om het product te testen aanzienlijk kan worden gereduceerd. Om dit te kunnen doen hebben we software sensors ontwikkeld om de biomassagroei te kunnen volgen ([3]).



Figuur 6. Software sensor voor biomassa ontwikkeling als onderdeel van Process Analytical Tools (PAT) ten behoeve van herhaalbare veilige vaccinbereiding.

In het volgende plaatje is waterbesparing bij de kasteelt in semi-aride gebieden het thema. Een speciaal geconstrueerde kas heeft in de toren een warmtewisselaar waarin door de plant verdampt water wordt teruggewonnen. Het werkingsprincipe is aangetoond. Wij hebben in deze kas de besturing geleverd die via internet vanuit Wageningen is in te stellen [4], en we hebben een adaptief regelschema ontworpen [5].



Figuur 7. Water terugwinning in geavanceerde Watery kas, Almeria, Spanje.

Het derde voorbeeld betreft de biologische landbouw. Omdat daar geen herbiciden mogen worden gebruikt moet het onkruid mechanisch worden verwijderd, maar dat kost veel mankracht en is dus duur. Wij hebben hiervoor

een autonoom rijdend robotplatform gebouwd [6]. Het wieden tussen de rijen kan nu automatisch. Tevens kan op het platform een gepatenteerde schoffel worden gemonteerd die in de rij kan wieden, ook ontwikkeld door onze groep [7]. Daarnaast is de robot in samenwerking met Rijkswaterstaat ook getest voor het borstelen van wegranden op basis van nauwkeurige GPS gegevens.



Figuur 8. Autonoom rijdend platform voor onkruid wieden in het veld (links) en autonoom borstelen van wegranden (rechts).

Dit zijn maar een paar voorbeelden. Belangrijke drijfveren voor onze promotieprojecten en ons werk in het algemeen zijn:

- energiebesparing
 - kassen [8-11],
 - lage temperatuur drogen [12-16],
 - natuurlijke ventilatie aardappelopslag [17],
- vermindering milieubelasting
 - waterzuivering [18, 19],
 - recirculatie gietwater [20],
- hergebruik grondstoffen
 - biologische ontzwaveling [21],
 - compostering [22],
- benutten zonne-energie
 - zonnepanelen [10],
 - algenproductie [23, 24]),

- voedsel- en waterveiligheid
 sturen op nitraat in sla [25],
 bio-elektrische sensor in drinkwaterbereiding [26],
 UV ontsmetting [27],
- procesverduurzaming
 vermindering dierproeven bij vaccinbereiding [3, 28],
 mechanisch onkruid verwijderen [6, 29]

Het zal duidelijk zijn dat we bij het uitvoeren van deze projecten veel en met succes hebben samenwerkt met andere groepen.

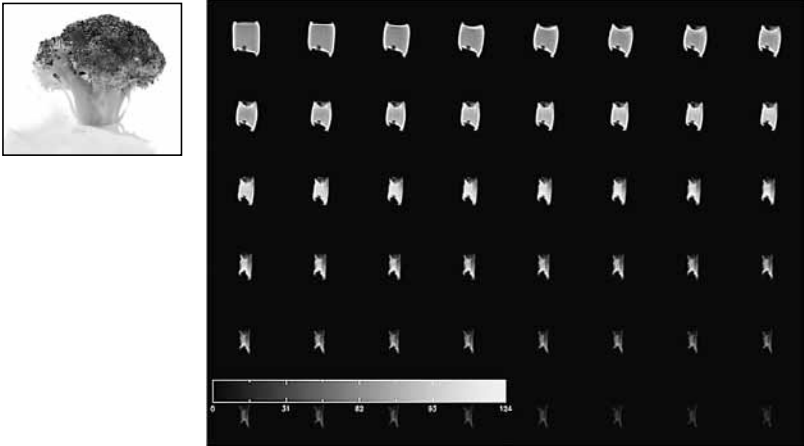
Ik wil nu wat nader ingaan op een paar aspecten uit het drieluik meten, modelleren en regelen.

Metten

De stormachtige ontwikkeling van de micro-elektronica heeft zeker een rol gespeeld bij het instellen van de leerstoel. De gedachte van de pleitbezorgers van MRS was dat de nieuwe leerstoel zijn steentje zou bijdragen aan het introduceren van nieuwe meetprincipes in Wageningen. Echte sensorontwikkeling hebben we niet veel gedaan, omdat andere specialistische labs daarvoor veel beter toegerust waren. Wij hebben ons gericht op de ontwikkeling van software sensors. Daarbij is het idee dat we variabelen die niet of moeilijk te meten zijn met behulp van een modeltechniek kunnen afleiden uit metingen die wel simpel en goedkoop zijn uit te voeren. U zag er hierboven al een voorbeeld van voor het monitoren van de groeisnelheid van micro-organismen in een bioreactor waarin vaccins worden gemaakt. Niet rechtstreeks te meten, maar wel af te leiden uit eenvoudig uit te voeren zuurstofmetingen [3, 28]. Het bepalen van een ruimtelijke verdeling uit enkele metingen is een relevant probleem waaraan we eveneens hebben gewerkt. Zo is een waarnemer ontworpen waarmee je de verdeling van de restbacteriebelasting over de lengte van een UV ontsmettingsbuis kunt bepalen uit alleen een waarneming aan de rand [27]. Het verloop van de ruimtelijke verdeling van te drogen enzymkorrels is gemodelleerd en via tomografie gemeten, waarna van het model gebruik gemaakt is om het droogproces zo te laten verlopen dat je een droog product krijgt, maar met behoud van de enzymactiviteit [13].

• • •

In een project voor het energetisch gunstig drogen van groenten met behoud van gezondheid bevorderende stoffen is het nu zelfs gelukt om *tijdens* het droogproces het vochtgehalte in de steel van een broccolideeltje te volgen. In het plaatje is aan de lichte kleur te zien dat binnenin het vochtgehalte eerst oploopt [30].



Figuur 9. Verloop van het vochtgehalte in de steel van een Broccolideeltje tijdens het drogen.

Modelleren

Zoals u waarschijnlijk al uit het voorgaande heb opgemaakt kunnen we in de regeltechniek niets beginnen zonder model, dus de modelvorming is een essentieel onderdeel van ons werk. Nu is het natuurlijk zo dat wiskundige modellen een grote rol spelen in tal van wetenschapsgebieden, want het is een universele, beknopte en exacte manier om je hypothesen onder woorden te brengen, maar als MRS-ers zijn we in staat om anderen te helpen bij het ordelijk laten verlopen van het modelleren, want niet iedereen is even bedreven om woorden in formules uit te drukken, of om, andersom, formules in woorden te kunnen lezen. De systeemtechnoloog kan echter niet op de stoel gaan zitten van de mensen met de domeinkennis. Dus een milieutechnoloog zal zelf moeten begrijpen welke processen een rol spelen, en welke variabelen daarbij van belang zijn, en dat geldt

voor alle disciplines. Maar de systeemtechnoloog kan wel helpen om het model in een generieke vorm te zetten. Alleen al het goed definiëren van systeemgrenzen en het benoemen van ingangsvARIABLEN, toestandsvARIABLEN, uitgangsvARIABLEN en parameters kan al geweldig helpen orde te scheppen tijdens het modellerenproces. Dit is de eerste toegevoegde waarde van ons vakgebied.

De tweede toegevoegde waarde bestaat erin dat wij verschillende manieren hebben om één en hetzelfde gedrag weer te geven. Ik heb dat hiervoor al even aangestipt in mijn uitweiding over zwarte en witte modellen. Andersom is het ook zo dat wij analogieën zichtbaar kunnen maken tussen ogenschijnlijk totaal uiteenlopende systemen. De formulering van een model in de toestandruimte is daarbij een sterk stuk gereedschap. Op de toestandformulering kom ik zo dadelijk terug.

De derde toegevoegde waarde is dat wij beschikken over een stel gereedschappen voor modelvorming en voor het analyseren van het modelgedrag (en dus hopelijk ook systeemgedrag). Ik doel hier op lineariseren en eigenwaardeanalyse [31] [32], parameterschatting en systeemidentificatie [27, 33], gevoeligheidsanalyse [34], onzekerheidsmodellering [35], tijdschaaldecompositie en modelreductie [27], fundamentele analyse van lineaire systemen [36, 37], modellering met neurale netten [38], procesmodellering [39], technieken voor dynamische optimalisatie [40-42] en zo meer. Hoewel we in het algemeen de toepassing voorop hebben gesteld laten deze voorbeelden zien dat we ook ons steentje hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van de discipline zelf, hetgeen uit academisch oogpunt bijzonder waardevol is.

Waarom hebben we dan toch moeten ervaren dat het niet eenvoudig is om anderen van deze toegevoegde waarde te overtuigen? De regeltechniek heeft vanouds een eigen idioom van modelleren opgebouwd. Centraal staat de klasse van de lineaire dynamische modellen, en de bijbehorende overdrachtsfuncties die gebruik maken van het Laplace of z -domein. Het feit dat dit idioom buiten de wereld van de regeltechniek geen sterke weerklank vindt, zou wel eens voor de buitenwacht een reden kunnen zijn om ons met enig wantrouwen te bejegenen. Mensen die toch leuk een simulatiemodel hebben opgezet in hun vakgebied

• • •

begrijpen niet altijd wat wij er nog over te zeuren hebben. In het primaire onderwijs en in verschillende aio-cursussen hebben wij proberen duidelijk te maken dat veel van de kennis over de dynamica van systemen uitstekend kan worden toegepast ook als het helemaal niet om regelen gaat, maar bijvoorbeeld om begrijpen, hypothesen formuleren, ontwerpen van bemonsteringsschema's, versnellen van simulaties, systeemontwerp en systeemverbetering. Analyse en inzicht in het model en de techniek van simulatie kan veel onheil voorkomen.

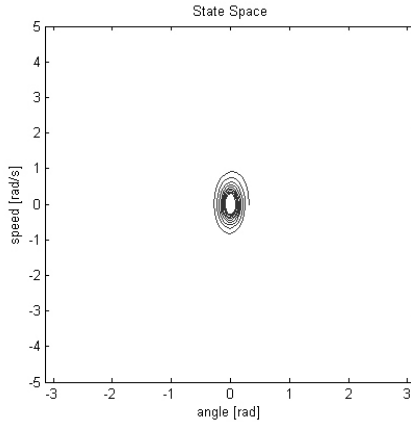
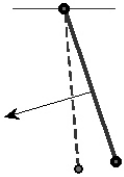
Nu had en heeft Wageningen op modelgebied al een sterke traditie, bijv. in de hydrologie en grondwatermodellering, en vooral ook op het gebied van plantengroei door het pionierswerk van De Wit. De Wit introduceerde de modellering in Wageningen in de tijd dat de eerste computertools voor simulatiemodellen in opkomst kwamen, met name IBM's CSMP. De Wit beseftte dat dynamische modellen van plantengroei als functie van bijvoorbeeld de zonnestraling een geweldig gereedschap zou zijn bij bijvoorbeeld het voorspellen van oogsten. En zo ontstond er een school 'De Wit', met heel veel succes. Ook werd in latere jaren een eigen simulatie vertaler gemaakt, getiteld FST [43].

Toch hebben wij veel last ondervonden van de erfenis van de Wit. Het is een typisch voorbeeld van de wet van de remmende voorsprong. Laat ik deze boude bewering wat verder toelichten.

Net voor mijn komst was Eldert van Henten in onze groep begonnen met optimalisatie van kasklimaat. Hij zocht daarvoor een model voor sla, en de verwachting was dat dat in Wageningen gemakkelijk te vinden zou zijn. Dat bleek echter tot onze verbazing niet het geval, tenminste niet in een vorm die voor ons bruikbaar was. Wat wij zochten was een model in zgn. toestandsvorm, of, in het Engels, in 'state space' vorm.

Laat ik aan de hand van een eenvoudig voorbeeld toelichten wat we daarmee bedoelen. In de volgende figuur is een momentopname van een schommel afgebeeld. De meeste mensen die dit plaatje zien zullen de neiging hebben te verwachten dat de schommel op het volgende moment naar beneden zal gaan, zoals aangegeven door de pijl.

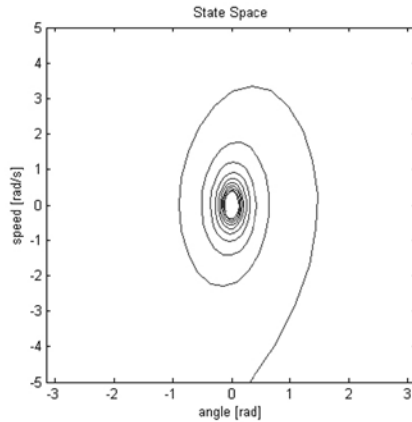
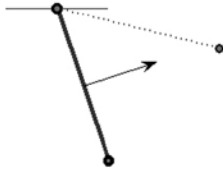
. . .



Figuur 10. Initiële positie en bewegingsrichting vanuit stilstand, en de bijbehorende trajectorie in de toestandsruimte (rechts).

Maar toch is dat niet de enige mogelijkheid, zoals te zien is in de animatie weergegeven in de volgende figuur. Wat is het verschil? In Figuur 10 is stilzwingend aangenomen dat de schommel op het moment van opname stil staat, maar dat hoeft natuurlijk niet. Het kan ook zijn dat de schommel al in beweging was. Dat is kennelijk de situatie in de animatie van Figuur 11. We concluderen dat de beweging pas vastligt als we zowel de hoek als de snelheid kennen. Het verloop van deze twee zogenaamde toestandsvariabelen is weergegeven in het diagram rechts in beide figuren, en dit heet dan ook de *toestandsruimte*. Die naam komt voort uit het feit dat de toestandsvariabelen een ruimte opspannen, waarin het gedrag in de tijd een trajectorie vormt. Het weergegeven van het gedrag van een dynamisch systeem in de toestandsruimte is bijzonder krachtig gebleken, en zo'n model zochten we dus ook voor de groei van sla.

Waarom was dat model er niet? Dat was toch wel een beetje verrassend, want waren die CSMP of FST modellen in wezen niet evengoed toestandsmodellen?

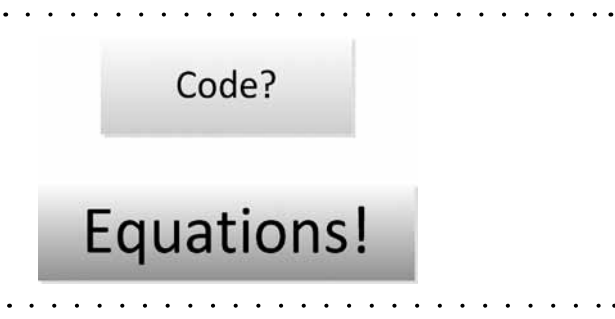


Figuur 11. Initiële positie en bewegingsrichting terwijl de schommel al in beweging is, en de bijbehorende trajectorie in de toestandsruimte (rechts).

Men moet bedenken dat de computers in die tijd nog niet zo snel waren, en dus werden allerlei slimme trucs bedacht om de rekentijd te beperken. Te denken valt aan de gaussische integratie van de fotosynthese over de hoogte van het gewas[44], en het gebruik van tijdsgemiddelde data, waardoor je bijvoorbeeld met stralingsdagsommen kan werken. Dat is handig omdat je lang niet altijd gedetailleerde gegevens over het weer beschikbaar hebt, en het onuitgesproken idee is dat de plant het effect van licht toch wel middelt. Meer problematisch is de gewoonte om eerst binnen een dag de fotosynthese te berekenen, om de aldus opgebouwde biomassa aan het eind van de dag over de organen te verdelen, een modelconcept dat biologen heel aantrekkelijk schijnen te vinden, maar dat modellers veel hoofdbrekers bezorgt. Iets dergelijks geldt voor begrippen als assimilatenbehoefte en potentiële groei. Ik denk dat ik nu wel weet hoe ik hiermee om moet gaan, maar ondertussen is het tot op de dag van vandaag een bron van misverstanden en problemen.

Hoewel een aantal trucs, zoals het omgaan met stijve systemen, d.w.z. systemen met zeer sterk uiteenlopende tijdschalen, ook nu nog waardevol zijn, zijn een aantal andere dat niet meer, en kan je nu door de snelheid van de huidige computers veel dichter blijven bij de fysisch-biologische toestandsbeschrijving, zonder compromissen te hoeven sluiten, of trucs te hoeven uithalen. Bovendien hoef je je zelf nauwelijks nog bezig te houden met de ins en outs van simulatie, omdat er uitstekende pakketten bestaan die je heel veel gedoe uit handen nemen. Kortom, heel veel van wat toen zinvol was is dat nu niet meer.

Maar intussen was van lieverlee een generatie wetenschappers ontstaan voor wie het model niet meer werd dan een computercode. Sterker nog, wij kwamen tot de ontdekking dat in veel gevallen de vergelijkingen helemaal nergens waren opgeschreven, en er ontstond de omgekeerde wereld dat de vergelijkingen uit de computercode moesten worden afgeleid, in plaats van andersom zoals het hoort. Ook begonnen de uit de verzelfstandiging van DLO voortgekomen contractresearchorganisaties die modellen te gebruiken om er geld mee te verdienen. Daar is op zich niks mis mee, maar wel met het feit dat het beschermd houden van de computerprogramma's werd verward met het geheim houden van de algoritmes – lees de vergelijkingen. Dit laatste is de dood in de pot, want het betekent dat je je onttrekt aan wetenschappelijk debat wat uiteindelijk leidt tot bloedarmoede. Ik moet bekennen dat we ons in één project hebben laten aanleunen dat we slechts mochten werken met een gecompileerde versie van het programma. Dat is zo ongeveer hetzelfde als een automonteur te vragen een motor af te stellen zonder onder de motorkap te mogen kijken. We hebben gezworen dat we dat nooit, nooit meer zouden doen.



.. .Figuur 12. Geen computercode maar vergelijkingen.

Het is dus van het grootste belang dat in elk geval de vergelijkingen bekend zijn. Toeters en bellen in code vertroebelen het zicht op datgene waar het echt om gaat. Ik beweer dat de kern van een model, d.w.z de vergelijkingen, per deelmodel op niet meer dan een paar A4-tjes moet passen, en ik zou u aanraden elk model te wantrouwen waarvan beweerd wordt dat dat niet kan.

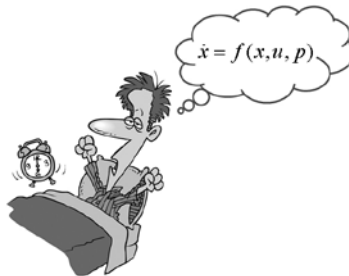
Wat hebben wij zelf gedaan om het probleem te lijf te gaan? Eldert van Henten heeft binnen het project Kasklimaat Jaren '90 uit arren moede zelf maar een net toestandsmodel voor sla opgezet [8]. Ook in projecten daarna hebben we dit gedaan, bijv. Tap's Big Leaf - Big Fruit model van tomaat [9].

'Early Modelling'

Een andere gewoonte die je nog al eens aantreft in Wageningen is om aan het eind van een proefschrift op natuurwetenschappelijk terrein nog even gauw een modelhoofdstuk toe te voegen. In mijn optiek is dat de omgekeerde wereld. Toen ik nog aan de UT werkte hadden we daar het grapje van de 'Wageningse methode' waarmee bedoeld werd dat iemand maar eens wat ging experimenteren. Inderdaad is in situaties waarin je echt helemaal niets weet hiervoor geen alternatief, maar ik ben ervan overtuigd dat deze situaties veel minder talrijk zijn dan wordt gedacht. Zelfs in het relatief nieuwe veld van de bio-elektrochemie, waarbij bacteriën uit geschikte voeding zoals afvalwater rechtstreeks elektriciteit maken, is al wel zoveel bekend dat het bijzonder lonend is om je hypothesen over hoe het mogelijk zou kunnen werken maar alvast eens vast te leggen in een model. Dit principe hebben we 'Early Modelling' genoemd.

.....

Early Modelling



.....

Figuur 13. Vroeg modelleren.

Het idee is dat zo'n vroeg model, hoe primitief en fout ook, je dwingt om systematisch over het volgende experiment na te denken. Komen model en data niet overeen, jammer voor je eerste geesteskind, maar goed voor de wetenschap, want nu is er ruimte voor verantwoorde verbetering van het model, en dus van het inzicht. Mogelijk dat koudwatervrees voor wiskundig modelleren veel Wageningse promovendi ervan weerhoudt om deze weg te bewandelen, maar daarom zijn onze colleges in Dynamisch Modelleren, en eigenlijk ons hele vakgebied, zo ongelooflijk waardevol voor een groot deel van de Wageningse gemeenschap.

Ik ben er trots op dat ik samen met Peter Leffelaar gelukkig aan hele generaties PhD studenten die beginselen wel hebben kunnen bijbrengen via onze succesvolle cursus 'The Art of Modelling'. Ook al was die cursus maar eens per twee jaar, hij voorzag duidelijk in een behoefte. Toch ware het beter als studenten in verschillende richtingen reeds in hun BSc fase zouden deelnemen aan ons vak Dynamisch Modelleren (v/h Modelvorming). Dat geldt zeker voor de technisch gerichte studierichtingen. Het vak is verplicht voor Agrotechnologen en de proces georiënteerde Biotechnologen, maar het is diep te betreuren dat het tot op de dag van vandaag niet gelukt is het vak op te nemen in het programma van de Milieutechnologen.

*Parameters en experimentontwerp*⁸

In die witte modellen waar ik het over had komen constanten voor die we moeten weten alvorens we ermee kunnen rekenen. Deze constanten worden in ons jargon aangeduid met de term parameters.⁹ Soms wordt gezegd dat een deel van die parameters meetbaar zijn. Nu zal dat wel kloppen als het om de afmeting van iets gaat, maar is het ook waar voor, bijvoorbeeld, de fotosynthese? Om fotosynthese parameters te meten isoleert men een blad, en wordt een dynamische meting uitgevoerd van bijv. het CO₂ verloop. De interpretatie van die meting gebeurt in feite met een dynamisch deelmodel, en de 'meting' is het resultaat van curve fitting. Dus van direct meten is eigenlijk geen sprake. Bovendien is het niet zo dat de waarden die je meet op het niveau van een blad zo één, twee, drie iets zeggen over ogenschijnlijk dezelfde parameters die voorkomen in een (discreet) model van gewasgroei. Om dat goed te kunnen doen is kennis nodig van systeemdynamica en simulatietechniek.

. . .

Dat men er vaak gaandeweg achter komt dat parameters in veel van onze systemen in feite de resultante zijn van onderliggende deelprocessen is eigenlijk vanzelfsprekend. We vonden een zeer grote variatie in parameterwaarden voor oogstvoorspellingsmodellen, met als resultaat een grote spreiding in de oogstvoorspelling zelf [35]. Het is natuurlijk vreemd dat het nodig is om voor één en hetzelfde gewas andere parameters te moeten gebruiken, afhankelijk van of het gewas in Noord-Holland staat of op de Filippijnen. Ik heb me er altijd over verbaasd dat in de literatuur artikelen te vinden zijn over de Belgische tomaat. Het betekent dat we nog onvoldoende grip hebben op de onderliggende factoren, zoals water en nutriëntvoorziening, bodemsoort, verschillen in cultivar, enzovoort. Dit inzicht is niet nieuw natuurlijk, en er wordt hard gewerkt om door deelmodellen helderheid te scheppen, maar vroeg of laat komen we altijd wel weer verder detail tegen, en is een beslissing nodig of verder gaan loont voor het doel of niet. Een opwindende ontwikkeling op dat gebied is de koppeling die men nu zoekt tussen fenomenologie en het gen niveau.

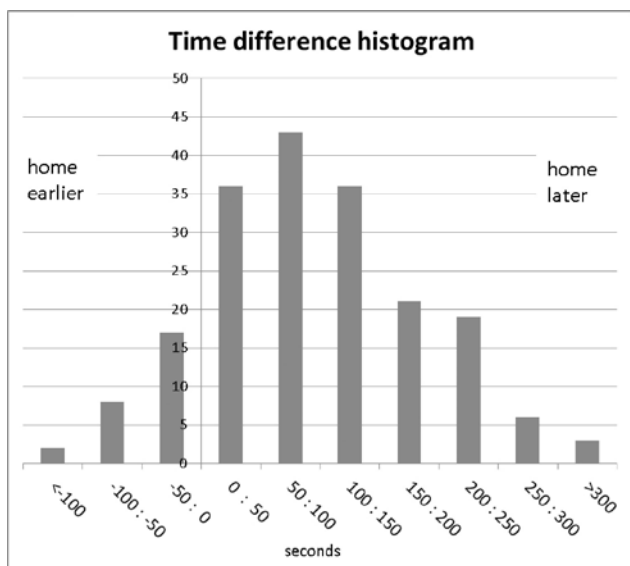
Ik veroorloof me nog een opmerking over tijdvariante parameters. Als parameters tijdvariant lijken te zijn, is dit een teken dat er meer achter zit. Proberen om empirische regels over de tijdsvariantie op te stellen is naar mijn mening in feite een ontsnappingsroute die symptomatisch is voor het gebrek aan mogelijkheden, wilskracht of inzicht om de modellering echt een stap verder te brengen.

Een interessant idee om experimenten voor parameterschatting efficiënter te maken is het concept Optimal Input Design, dat in mijn groep vooral door Karel Keesman en Hans Stigter is ontwikkeld [45, 46, 47]. In heel veel wetenschapsgebieden is het gebruikelijk om te experimenteren bij een groot aantal verschillende vaste condities. Het idee van optimal input design is om de omstandigheden juist dynamisch te laten variëren op een zodanige manier dat je maximale informatie krijgt over de parameters van het proces. Daarmee wordt veel onnodig ge-experimenteer voorkomen.

Intermezzo

Omdat dit verhaal nu wel een beetje erg detaillistisch dreigt te worden wil ik u, als intermezzo, even meenemen op een ander pad.¹⁰

Vaak ging ik op de fiets van mijn huis in Renkum naar mijn werkplek in Wageningen. Voor de mensen die de omgeving niet kennen: onderweg moet een uitloper van de Wageningse berg worden overwonnen, zodat we kunnen spreken over een dynamisch parcours. Als meet- en regelfreak heb ik de rijtijden bijgehouden. Toen ik na een paar maanden eens goed naar die gegevens keek viel het me op dat ik voor de terugweg stelselmatig meer tijd nodig had dan voor de heenweg. U kunt dit zien in bijgaand histogram. Van de kleine 200 keer waren er bijvoorbeeld 43 waarbij ik terug er 50-100 seconden langer over deed.



Figuur 14. Histogram van het verschil in fietstijd tussen terugweg en heenweg van huis naar werk.

Ik ging mij afvragen hoe dat zou kunnen komen. Een windeffect kon worden uitgesloten want de route naar Renkum is in oostelijke richting, zodat je met de overheersende zuidwesten wind juist zou verwachten dat de terugweg sneller zou gaan. Afgaande op vage verschillen in mijn gemoedstoestand na een dag intensief werken rijpte het vermoeden dat het mogelijk te maken zou hebben met een verschil in vermoeidheid; eenvoudiger gezegd: 's avonds ben je vermoeider dan 's morgens. Ik overwoog dat dit zou kunnen worden getest door een tijdje lang op de vakgroep te gaan slapen, en thuis te gaan werken, zodat ik het traject 's morgens richting Renkum, en pas 's avonds richting Wageningen zou afleggen. Ik begon zelfs uit te rekenen hoe vaak ik dit zou moeten doen om tot een statistisch verantwoorde conclusie te komen. Hoewel dit alles mij haalbaar leek, zag ik er ook wel de sociale en psychologische bezwaren van in. Het maken van een toetsbaar model zou een andere mogelijkheid kunnen zijn, maar dat zou vergen dat niet alleen de vorm van de berg, de fiets en de weg- en weeromstandigheden in beschouwing genomen zouden moeten worden, maar ook de menselijke krachtsinspanning, en, wat de zaak pas echt zou compliceren, ook de processen die leiden tot vermoeidheid. Omdat ook het meten van vermoeidheid geen sinecure zou zijn, kwam ik tot de conclusie dat deze complicaties teveel waren om al fietsend op te lossen. Kortom, het werd zaak om subsidie aan te gaan vragen.

Hoe dit aan te pakken? De eerste mogelijkheid die ik onder ogen zag was om een gooi te doen naar de paar aio-plaatsen die de onderzoekscholen jaarlijks te verdelen hebben. Gezien het feit dat mijn onderzoek zowel aspecten van fysica en dynamica als aspecten van het menselijk functioneren zou hebben, zou aan de gebruikelijke eis van het bijeenbrengen van verschillende disciplines gemakkelijk kunnen worden voldaan. Maar welke onderzoekschool dan? Van PE&RC¹¹ was niet veel te verwachten. We waren daar al vertegenwoordigd met kasklimaat en robots, en ik zag geen kans mijn fietsprobleem overtuigend in een van die thema's te persen. WIMEK¹² lag ook niet echt voor de hand, of ik zou het moeten gooien op het feit dat een fietser doordat hij niet met de auto gaat geen schadelijke belasting voor het klimaat veroorzaakt. Toch leek mij dit feit te dun voor een succesvol voorstel. VLAG¹³ dan misschien? Zeker kan worden betoogd dat er interessante voeding-technische aspecten aan de vraag zitten. Is er mogelijk een effect van het ontbijt, of heeft de terugfietsende fietser juist last van

. . .

de hongerklop? Maar gezien het feit dat dat soort onderzoek vooral empirisch is, waarbij je een groot aantal fietsende proefpersonen nodig zou hebben om tot een betrouwbaar resultaat te komen verwierp ik ook dit idee. Bovendien had ik eerlijk gezegd geen hoge pet op van de modelleergezindheid van de voedingsjongens. Nee, de enige onderzoekschool die misschien nog een kans zou kunnen bieden was WIAS¹⁴. Immers, er is mogelijk niet al te veel verschil tussen mens en dier wat betreft fysiologie en de gevolgen van stress op het welzijn. Maar helaas, dit was nou net de enige onderzoekschool waarin we niet vertegenwoordigd waren. De onderzoekscholen als bron van geld voor een aio vielen dus af.

Natuurlijk zou ik een aanvraag kunnen indienen bij NWO¹⁵. Het zou niet al te veel moeite kosten om het probleem te formuleren als een zuiver wiskundig probleem, waardoor het bij uitstek bij NWO zou passen. Alleen, de slaagkans bij NWO was minder dan 20%, en omdat wij geen deel uitmaakten van een werkgemeenschap, en men ons dus niet kende, beschouwde ik dit kanaal als vrijwel kansloos.

Wat te doen. De EU misschien? Met enige fantasie zou er altijd wel een thema te vinden zijn waarbinnen dit onderzoek zou passen. Fietsen is gezond, dus mij leek het niet moeilijk het belang voor de Europese volkeren aan te tonen, en als ik er een industrie bij zou kunnen betrekken zouden we via het innovatie adagium kunnen bijdragen aan de concurrentiekracht van de EU. Er was echter één grote moeilijkheid. Het opzetten van een EU project vergt dat je universiteiten, instanties en bedrijven in verschillende landen van de EU erbij betreft. Het kwam mij voor dat Denemarken en België als fietsnaties wel mee zouden doen, maar om kans te maken zou er toch ook een Zuid-Europees land bij moeten. Misschien dat de pas toegetreden Baltische staten soelaas konden bieden. Maar toen ik me een voorstelling probeerde te maken van het vele werk dat het coördinatorschap met zich mee zou brengen, werd mijn animo flink getemperd. Nee, het handigst zou zijn als ik met mijn idee aansluiting zou kunnen vinden bij een al lopend initiatief, maar hoe ik ook speurde, zo'n initiatief deed zich niet voor.

Rechtstreeks een subsidie vragen aan een kapitaalkrachtig bedrijf zou theoretisch ook kunnen, maar ik zag zo gauw geen bedrijf dat voldoende belang

. . .

zou hebben bij een aanzienlijke investering en een verplichting voor vier jaar. Maar het bedrijfsleven zou ik wel kunnen betrekken bij een aanvraag voor STW¹⁶. Blijfe gezichten bij onze directie zou dat niet geven, want STW levert op korte termijn bedrijfseconomisch verlies op, maar ik dacht de directie wel over de streep te kunnen trekken bij het vooruitzicht dat onze groep bij een succesvolle promotie na vier jaar alsnog een hogere promotievergoeding tegemoet kon zien. Maar hoe een industrie te vinden die het onderzoek ‘in kind’ of in geld zou kunnen ondersteunen? Mij leek dat het wel iets zou kunnen zijn voor fabrikanten van elektrische fietsen, want als zij met het te ontwikkelen model het batterijmanagement zouden kunnen optimaliseren zou dat een echte innovatie zijn. En ik kon ze mogelijk ook paaien met het gegeven dat de slaagkans bij STW systematisch op 40% wordt gehouden, zodat er een gerede kans was dat de tijd die mijn contact bij de fietsfabriek zou moeten besteden om zijn directie te overtuigen niet over de balk gesmeten was.

Dus, zo gezegd, zo gedaan. Ik formuleerde een eerste concept onderzoeksvoorstel, en begon stad en land af te reizen om bedrijven voor mijn idee te interesseren. Totdat ik op een avond bij de koffie het hele verhaal aan mijn vrouw vertelde. Na mij een poosje te hebben aangehoord onderbrak ze mij en zei: “Maar Renkum ligt toch hoger dan Wageningen?” Verbluft keek ik haar aan. Van verbijstering liet ik bijna mijn koffiekopje vallen. Natuurlijk, wat ze zei leek me heel plausibel: Renkum ligt immers stroomopwaarts! Hoe kon het mij overkomen dat ik zoiets simpels over het hoofd had gezien? Teleurgesteld gooide ik de volgende dag alle onderzoeksvoorstellen in de prullenbak¹⁷.

Waarom vertel ik u dit allemaal? Wetenschappers in mijn gehoor zullen zonder moeite hun dagelijkse werkelijkheid herkennen. En u, als leek, kunt wellicht uit deze schets opmaken waarom het wetenschappelijk bedrijf tegenwoordig zo gecompliceerd is. Acquisitie, slimmigheden bedenken, trucs verzinnen, snorkende verhalen schrijven, soebatten bij financiers en je manager, heel boeiend allemaal, maar het heeft meer met handelsgeest te maken dan met wetenschap. En als een project eenmaal binnen is dan is het nog niet over, want dan moet er tijd worden geschreven, en kwartaalrapporten gemaakt, en trainings- en opleidingsplannen, en financieringsoverzichten, en evaluatierapporten, plus de PR en de krant.

. . .

Begrijp me goed, ik ben er voor om verantwoording af te leggen over de besteding van het geld, maar het is werkelijk niet te begrijpen waarom vooral financierende overheden bedot willen worden met geschreven uren. Het eindresultaat en het verhaal daaromheen zou de financier toch het meest moeten interesseren, zou je denken. Veel van deze ‘accounting’, zowel intern als extern, komt naar mijn overtuiging voort uit gebrek aan respect voor de professionaliteit van universitaire medewerkers, en uit angst om ergens voor verantwoordelijk te worden gehouden.

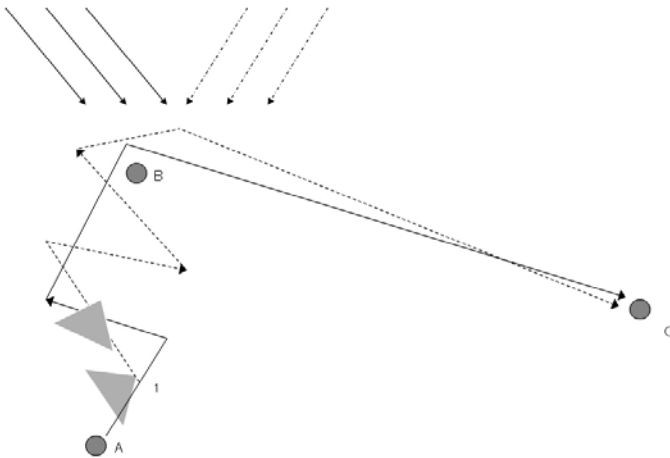
Regelen

Ik heb nog een reden om u dit verhaal te vertellen. Ik gebruik deze anekdote om te wijzen op een veelvoorkomend verschijnsel in techniek en wetenschap. Men werkt met enthousiasme aan een probleem, denk het opgelost te hebben, tot er een verbijstermoment komt, een geheel nieuw inzicht. Zoiets doet zich voor in de regeling van het kasklimaat, zoals ik hieronder zal proberen uiteen te zetten. Het geeft mij tevens de gelegenheid het derde element in het drieluik meten, modelleren en regelen kort te belichten: het regelen.

Het archetype van een regelprobleem in de agro-sector is de regeling van het kasklimaat. Hieraan werd in Wageningen al gewerkt vóór de leerstoel werd ingesteld [48, 49]. Aanvankelijk richtte het onderzoek zich op de vraag hoe een gewenste temperatuur en vochtgehalte zo goed mogelijk kon worden gerealiseerd. Deze vraag is in de wereldliteratuur nog steeds de hoofdstroom van het onderzoek. Tot er een moment kwam, waarop iemand zei: maar het gaat toch om de plant [50]?! Verbijstering. Natuurlijk! Het klimaat is maar een middel, de plant is het product, en dat moet centraal staan.

Zo begonnen we het probleem van het klimatiseren van de kas te zien als een optimaliseringsprobleem: het idee was om de kas zo te besturen en regelen dat aan het eind van de rit de tuinder het meeste geld in zijn portemonnee zou hebben. Maar om de teelt in de toekomst ook te kunnen volhouden zou het veel duurzamer moeten, en de sector maakte afspraken met de overheid om energieverbruik en CO₂ uitstoot sterk te verlagen.

Voor dit optimaliseringsprobleem hebben wij in Wageningen middels een flink aantal proefschriften een aantrekkelijke oplossing uitgewerkt. Om deze oplossing te begrijpen wil ik u vragen eerst naar bijgaand plaatje van een zeilwedstrijd te kijken.



Figuur 15. Analogie met kasklimaat regeling; te voren berekend optimaal zeiltraject bij bekende wind, en bijgestelde sturing als de wind schift (gestippeld).

Als we tevoren zouden weten wat de wind is, dan zouden we met een goed model kunnen berekenen welk traject gevaren moet worden om van startboei A zo snel mogelijk bij finishboei C te komen. Men zou nu kunnen denken dat je, eenmaal op het water, het beste dit traject zoveel mogelijk zou kunnen aanhouden, ook al zijn er variaties in de wind. Dit is in de procesindustrie de dominante aanpak: via terugkoppeling terugsturen naar het tevoren berekend optimaal traject. Dat kan als de verstoringen klein zijn. Maar hier kan de wind flink schiften, en bovendien is de wind niet een verstoring maar een energiebron. Anders gezegd,

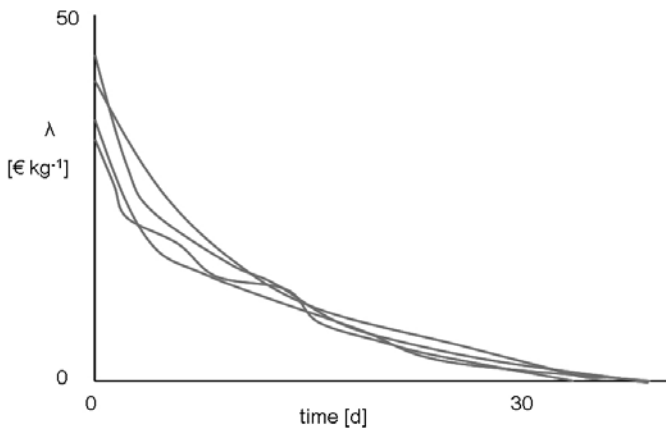
terugsturen naar het oorspronkelijke traject bij flinke veranderingen in de wind is onverstandig, en kan er zelfs toe leiden dat je stil komt te liggen of een boei mist. De richting die wordt opgelegd door de boeien moet aangehouden worden, maar de feitelijke koers moet worden aangepast aan de op dat moment heersende omstandigheden.

In de kasregeling doen we iets dergelijks: met nominaal (gemiddeld weer) berekenen we met een gewasmodel over de hele teelt een optimale oplossing. Op de tijdschaal van het gewas is de kas steeds in evenwicht met de omgeving¹⁸, waardoor we de kosten voor energie kunnen berekenen en kunnen afwegen tegen de verwachte gewasopbrengst. Deze procedure levert de benodigde trajectoriën van kastemperatuur en vochtgehalte om tot een optimaal resultaat te komen, en het regelen daarvan zou je kunnen over laten aan goed ontworpen regelaars. Maar dit zou inhouden dat te allen tijde naar deze trajecten toegestuurd zou worden, ook als de actuele weerssituatie aanzienlijk verschilt van het aangenomen gemiddelde verloop. Maar daarmee worden gunstige omstandigheden niet benut, en kost het extra geld als de omstandigheden minder gunstig zijn, zoals het zeilvoorbeeld liet zien.

Daarom hebben we in Wageningen een andere weg gekozen. Deze weg benut een andere uitkomst van de optimalisatie, en wel de zgn. co-state. De co-state vervult dezelfde rol als de globale richting van de boeien in het zeilvoorbeeld. In het geval van de kas kun je deze variabele zien als een soort schaduwprijs: door de berekeningswijze krijgen we op elk moment gedurende de teelt te zien wat de momentele waarde is van een extra eenheid biomassa die onderweg wordt geproduceerd [51]. Dit is dan af te wegen tegen de kosten die moeten worden gemaakt om een extra eenheid biomassa te produceren.

Het blijkt dat deze schaduwprijs vrij ongevoelig is voor het actuele weer [34]. We kunnen dan op de schaal van enkele dagen, dus on-line, een optimalisatie uitvoeren met als doelfunctie dezelfde stookkosten als in de lange termijn berekening, maar met de schijnbare waarde van het gewas nu aan de andere kant van de balans. Bovendien kunnen we op de schaal van een paar dagen werken met de actuele weersvoorspelling. Dat staat allemaal in het schema van Figuur 17 [52],

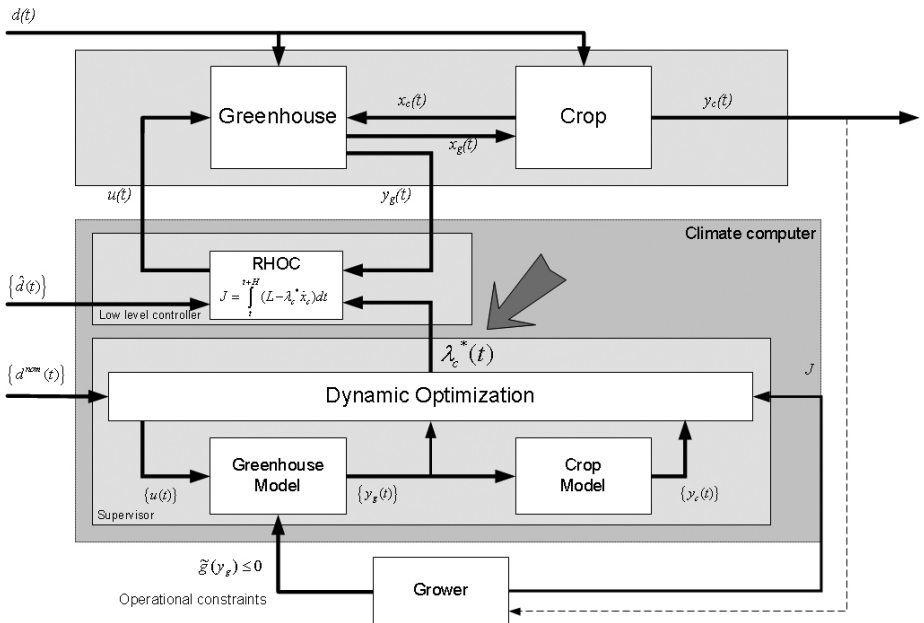
. . .



Figuur 16. Co-state (schaduwprijs) tijdens de teelt van sla.

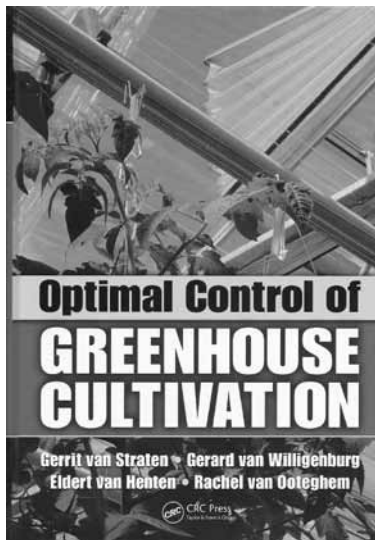
waarin de verbinding tussen de lange termijn optimalisatie (de globale richting), en de on-line regeling (de actuele koers) dus wordt gevormd door die schaduwprijs. En zo lukt het om een sturing van verwarming en ventilatie te berekenen die optimaal is. Het leuke is ook dat als de gasprijs verandert je maar één getalletje in het programma hoeft aan te passen, en alles is weer optimaal. Datzelfde gaat op voor verandering van de te verwachten veilingprijs van het product.

Met deze manier van regelen lukt het om dezelfde productie te halen met nog eens 15% minder gasgebruik op het toch al geoptimaliseerde gebruik in de Nederlandse glastuinbouw, ook in nieuwe energiezuinige concepten. Voor wie zijn neus ophaalt voor 15% energiebesparing: als je kosten bij een opbrengst van 2 €/kg tomaat van € 1,90 naar € 1,80 teruggaan, dan heb je dus niet 10ct maar 20ct winst, ofwel 100% meer¹⁹.



Figuur 17. Hiërarchisch regelschema waarbij de schaduwprijs λ de verbinding vormt tussen de seizoens-optimalisatie (onderste helft in het klimaatcomputer blok), en de on-line regeling.

Dit hele concept is in verschillende variaties uitgewerkt in een reeks proefschriften [4, 9, 10, 34] en heeft uiteindelijk geresulteerd in een boek [52]. Sommige onderdelen daarvan zijn al in de praktijk gebracht, en er zijn ideeën en projecten om het concept toepasbaar te maken voor de praktijk, waaraan ik ook na mijn pensionering nog een bescheiden bijdrage hoop te leveren.



Figuur 18. Boek Optimal Control of Greenhouse Cultivation.

Toekomst

‘Ein blick nach hinten ist immer auch ein Blick nach vorne’. Laat ik daarom nog even kort stilstaan bij de toekomst.

De universiteit denkt erover om mijn leerstoel niet op dezelfde wijze voort te zetten. Het laatste voorstel dat ik bij het schrijven van deze rede onder ogen heb gekregen rept van Biomass Refinery & Process Dynamics. Het lijkt mij persoonlijk dat dat twee verschillende terreinen zijn, waarvoor verschillende expertises nodig zijn. Het één is een toepassing van een discipline, nl. de Proceskunde, die we toch al in huis hebben, en het andere is een verbijzondering van de discipline waarvoor ik de afgelopen 20 jaar heb gestaan, en die succesvol toepasbaar is gebleken voor een breed spectrum van Wageningse problemen. Maar goed, ik ga er niet meer over. Ik heb geprobeerd u duidelijk te maken wat het belang is van onze discipline voor

Wageningen, en ik hoop oprecht dat er serieus plaats blijft voor de professionele beoefening van de systeemdynamica.

Facit

Hiermee kom ik aan het eind van mijn verhaal. Mijn mild ironische toon hier en daar heeft u misschien de indruk gegeven dat ik enigszins gemengde gevoelens koester tegenover Wageningen. Niets is minder waar. De toestand in Wageningen is volop in beweging, en dat toont een geweldige dynamiek. En ja, een enkele keer is het een bewogen toestand geweest met alle verhuizingen en organisatiewijzigingen. Maar ik verzeker u dat ik hier al die jaren met ongelooflijk veel plezier heb gewerkt, en daar ben ik zeer dankbaar voor. Ik had dit werk nooit kunnen doen zonder de toegewijde inzet van de medewerkers van mijn groep, en zonder de stimulans van afstudeerders en promovendi. Ik ben hen daarvoor veel dank verschuldigd. En voor zover u niet tot deze categorieën behoort, het feit dat u hier in de zaal zit betekent dat u op één of andere wijze deelgenoot bent geweest in dit proces. Of uw bijdrage daarin heel groot of heel klein is geweest, dat kunt u zelf wel bepalen, maar hoe groot of klein ook, ik wil u ieder hartelijk bedanken voor een geweldige tijd. Met recht kan ik zeggen: “Wageningen, never a dull moment!”.

Mijnheer de rector, ik heb gezegd.

Referenties

- [1] Plato. (2000). *The Dialogues of Plato, Vol III The trial and death of Socrates* [e-book]. Translated into English by B. Jowett, Electronic Text Center, Alderman Library, University of Virginia, USA.
- [2] T. G. Doeswijk, "Reducing prediction uncertainty of weather controlled systems," Proefschrift Wageningen, 2007.
- [3] Z. I. T. A. Soons, "Advanced monitoring and control in biopharmaceutical production," Proefschrift Wageningen, 2008.
- [4] S. L. Speetjens, H. J. J. Janssen, G. v. Straten, T. H. Gieling, and J. D. Stigter, "Methodic design of a measurement and control system for climate control in horticulture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 64, pp. 162-172, 2008.
- [5] S. L. Speetjens, "Towards model based adaptive control for the Watergy greenhouse : design and implementation," Proefschrift Wageningen, 2008.
- [6] T. Bakker, "An autonomous robot for weed control : design, navigation and control," Proefschrift Wageningen, 2009.
- [7] J. Bontsema, C. J. v. Asselt, and T. Groot, "Intra-row weed control," in *Bornimer Agrartechnische Berichte 2002 (2002) H. 31. - ISSN 0947-7314*, 2002, pp. 64-72.
- [8] E. J. van Henten, "Greenhouse climate management : an optimal control approach," Proefschrift Wageningen, 1994.
- [9] F. Tap, "Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production," Proefschrift Wageningen, 2000.
- [10] R. J. C. van Ooteghem, "Optimal control design for a solar greenhouse," Proefschrift Wageningen, 2007.
- [11] O. Körner, "Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation," Proefschrift Wageningen, 2003.
- [12] S. J. Temple, "Control of fluidized bed tea drying," Proefschrift Wageningen, 2000.
- [13] E. J. Quirijns, "Modelling and dynamic optimisation of quality indicator profiles during drying," Proefschrift Wageningen, 2006.

- [14] Hadiyanto, "Product quality driven food process design," Proefschrift Wageningen, 2007.
- [15] M. Djaeni, "Energy efficient multistage zeolite drying for heat sensitive products," Proefschrift Wageningen, 2008.
- [16] J. C. Atuonwu, G. Van Straten, H. C. Van Deventer, and A. J. B. Van Boxtel, "Model-Based Energy Efficiency Optimization of a Low-Temperature Adsorption Dryer," *Chemical Engineering and Technology*, vol. 34, pp. 1723-1732, 2011.
- [17] K. J. Keesman, D. Peters, and L. J. S. Lukasse, "Optimal climate control of a storage facility using local weather forecasts," *Control Engineering Practice*, vol. 11, pp. 505-516, 2003.
- [18] L. Lukasse, "Control and identification in activated sludge processes," Proefschrift Wageningen, 1999.
- [19] A. A. A. Abusam, "Development of a benchmarking methodology for evaluating oxidation ditch control strategies," Proefschrift Wageningen, 2001.
- [20] T. H. Gieling, "Control of water supply and specific nutrient application in closed growing systems," Proefschrift Wageningen, 2001.
- [21] A. J. H. Janssen, C. Buisman, G. Lettinga, G. v. Straten, J. Bontsema, J. G. Kuenen, and J. M. M. d. Zwart, "Biological treatment of spent caustics," Octrooiaanvraagnummer: 96202138.2-2104, 1996.
- [22] H. V. M. Hamelers, "A mathematical model for composting kinetics," Proefschrift Wageningen, 2001.
- [23] P. M. Slegers, R. H. Wijffels, G. v. Straten, and A. J. B. v. Boxtel, "Design scenarios for flat panel photobioreactors," *Journal of Applied Energy*, vol. 88, pp. 3342-3353, 2011.
- [24] G. van Straten, P. M. Slegers, L. G. van Willigenburg, R. Bosma, A. J. B. van Boxtel, and R. H. Wijffels, "Toward optimal control of flat plate photobioreactors: the greenhouse analogy?," in *Proceedings AgriControl 2010 IFAC International Conference*, Kyoto, Japan, 6-8 December 2010, Kyoto, Japan, 2010.
- [25] S. C. de Graaf, "Low nitrate lettuce cultivations in greenhouses : optimal control in the presence of measurable disturbances," Proefschrift Wageningen, 2006.

• • •

- [26] N. E. Stein, "A microbial fuel cell-based biosensor for the detection of toxic components in water," Proefschrift Wageningen, 2011.
- [27] D. Vries, "Estimation and prediction of convection-diffusion-reaction systems from point measurements," Proefschrift Wageningen, 2008.
- [28] R. Neeleman, "Biomass performance : monitoring and control in biopharmaceutical production," Proefschrift Wageningen, 2002.
- [29] T. Bakker, C. J. v. Asselt, J. Bontsema, J. Müller, and G. v. Straten, "Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field," *Biosystems Engineering*, vol. 109, pp. 357-368, 2011.
- [30] X. Jin, R. G. M. van der Sman, E. Gerkema, F. J. Vergeldt, H. van As, G. van Straten, R. M. Boom, and A. J. B. van Boxtel, "Investigation on the influence of pre-treatments on drying behaviour of Broccoli by MRI experiments," presented at the 7th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2011), Tianjin, China, 2011.
- [31] G. van Straten, "What can systems and control theory do for agricultural science?," *Automatika*, vol. 49, pp. 105-117, 2008.
- [32] J. Omony, L. H. de Graaff, G. van Straten, and A. J. B. van Boxtel, "Modeling and analysis of the dynamic behavior of the XlnR regulon in *Aspergillus niger*," *BMC Systems Biology*, vol. 5, 2011.
- [33] K. J. Keesman, *System Identification - An Introduction*, 1st Edition ed.: Springer, 2011, ISBN 978-0-85729-521-7, 323 pp.
- [34] E. J. van Henten and G. van Straten, "Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce," *J. Agric. Eng. Res.* 59 (1994) 19-31. 1994.
- [35] K. Metselaar, "Auditing predictive models : a case study in crop growth," Proefschrift Wageningen, 1999.
- [36] L. G. van Willigenburg and W. L. de Koning, "Optimal reduced-order compensation of time-varying discrete-time systems with deterministic and white parameters," *Automatica*, vol. 35, pp. 129-138, 1999.
- [37] L. G. van Willigenburg and W. L. de Koning, "Linear systems theory revisited," *Automatica*, vol. 44, pp. 1686-1696, 2008.
- [38] B. T. Tien, "Neural - fuzzy approach for system identification," Proefschrift Wageningen, 1997.

- [39] S. J. Temple and A. J. B. Van Boxtel, "Modelling of fluidized-bed drying of black tea," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 74, pp. 203-212, 1999.
- [40] J. A. Roubos, G. Van Straten, and A. J. B. Van Boxtel, "An evolutionary strategy for fed-batch bioreactor optimization; concepts and performance," *Journal of Biotechnology*, vol. 67, pp. 173-187, 1999.
- [41] I. L. López Cruz, "Efficient evolutionary algorithms for optimal control," Proefschrift Wageningen, 2002.
- [42] I. L. Lopez Cruz, L. G. Van Willigenburg, and G. Van Straten, "Efficient Differential Evolution algorithms for multimodal optimal control problems," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 3, pp. 97-122, 2003.
- [43] D. W. G. v. Kraalingen, C. Rappoldt, and H. H. v. Laar, "The Fortran simulation translator, a simulation language," *European Journal of Agronomy*, vol. 18, pp. 359-361, 2003.
- [44] J. Goudriaan, "A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis," *Agricultural and Forest Meteorology* 38 (1986) 249-254, 1986.
- [45] K. J. Keesman and J. D. Stigter, "Optimal parametric sensitivity control for the estimation of kinetic parameters in bioreactors," *Mathematical Biosciences*, vol. 179, pp. 95-111, 2002.
- [46] J. D. Stigter and K. J. Keesman, "Optimal parametric sensitivity control of a fed-batch reactor," *Automatica*, vol. 40, pp. 1459-1464, 2004.
- [47] J. D. Stigter, D. Vries, and K. J. Keesman, "On adaptive optimal input design: A bioreactor case study," *AIChE Journal*, vol. 52, pp. 3290-3296, 2006.
- [48] A. J. Udink ten Cate, "Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates," Proefschrift Wageningen, 1983.
- [49] G. P. A. Bot, "Greenhouse climate : from physical processes to a dynamic model," Proefschrift Wageningen, 1983.
- [50] H. Challa, "Integration of explanatory and empirical crop models for greenhouse management support," *Acta Horticulturae* 507 (1999), pp. 107-115, 1999.
- [51] G. van Straten, L. G. van Willigenburg, and R. F. Tap, "The significance of crop co-states for receding horizon optimal control of greenhouse climate,"

• • •

Control Engineering Practice, vol. 10, pp. 625-632, 2002.

- [52] G. van Straten, L. G. van Willigenburg, E. J. van Henten, and R. J. C. van Ooteghem, *Optimal control of greenhouse cultivation*. New York USA: CRC Press, 2010, ISBN 9781420059618, 326 pp.

Annotaties

- 1 Let me apologise to my foreign students and other non-Dutch speaking people in the audience for not presenting this farewell address in English. To express the finer nuances of my assertions, Dutch was the only choice. An English version is available via the SCO website www.sco.wur.nl/UK/. As a compromise, figure texts are in English.
- 2 Sommige collega's zien het geheel van proces en regelaar als het regelsysteem. Ik geef er de voorkeur aan een functioneel onderscheid te maken.
- 3 Ik wijs er op dat het draaien aan een stuur niet gelijk staat aan het besturen van een auto. Bij besturen wordt er wel degelijk terugkoppeling gebruikt om de stuurstand bij te stellen als de bocht te wijd of te krap uitvalt.
- 4 Process Dynamics in Nederland is aan de UT verdwenen. Aan de TUE zijn er alleen deeltijdbenoemingen. Bij de TUD wordt het behartigd door het Delft Centre for Systems and Control, maar niet specifiek voor de procesindustrie, en dat is ook zo in Wageningen.
- 5 Ik moet daarbij onwillekeurig denken aan het feit dat voordat het naambord met de nieuwe naam Alliantec voor het samenwerkingsverband tussen ons en IMAG op de gevel van het gebouw kon verschijnen, het IMAG alweer was opgegaan in Agrotechnology and Food Innovations, een naam die thans ook al niet meer bestaat.
- 6 Het zou eigenlijk beter zijn om als tegenhanger van een "black box" model niet te spreken over een "white box" model, maar over een "transparent box" model.
- 7 Het feit dat deze modellen werken in afwijkingsvariabelen van een nominale toestand zorgt daar boven op voor veel onbegrip en misverstand, zoals we in ons onderwijs hebben ervaren.
- 8 Dit deel van de tekst is een integraal onderdeel van mijn verhaal, maar is vanwege de beperkt beschikbare tijd niet uitgesproken.

- 9 In veel vakgebieden, bijvoorbeeld in het waterbeheer, wordt de term parameters gebruikt voor wat wij variabelen zouden noemen.
- 10 Ik ontleen het basisidee van deze anekdote – hoewel geheel anders ingevuld – aan een lezing die prof.dr.ir. B.P.Th. Veltman eens bij een jubileum van de Technologiestichting STW heeft gehouden.
- 11 Production Ecology and Resource Conservation
- 12 Wageningen Instituut voor Milieu en Klimaatstudies
- 13 Voeding, Levensmiddelentechnologie, Agrobiotechnologie en Gezondheid
- 14 Wageningen Institute of Animal Sciences
- 15 Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
- 16 Stichting Technische Wetenschappen (Technologiestichting STW)
- 17 Achteraf had ik dat beter niet kunnen doen. Uit een later uitgevoerde meting met GPS en na raadplegen van stafkaarten bleek dat de hoogtes van mijn huis en die van mijn werkplek precies gelijk waren. Het probleem is derhalve nog niet opgelost.
- 18 Er zijn nog wat haken en ogen aan deze benadering, want de gewasverdamping en CO₂ opname door fotosynthese horen bij het gewas, maar reageren vrijwel direct op verandering in zonnestraling. Dit kan worden opgevangen door het deelmodel van deze snelle processen op te nemen in het deelmodel van de kas.
- 19 Bij een reële schatting van 30% aandeel van energie in de kosten betekent 15% besparing ca. 10 cent minder uitgaven.



De meet- en regeltechniek zorgt ervoor dat systemen zich gedragen zoals wij het willen. Het best lukt dat als het dynamisch gedrag wordt gemodelleerd in de toestandruimte. Een vorm van modelleren die in de groene context van Wageningen nog weinig expliciet is, maar die juist in systemen met een biologische component vele mogelijkheden voor analyse en begrip biedt. 'Early modelling' stimuleert het onderzoek, en leidt tot modellen die kunnen worden gebruikt om robots, bioreactoren en kassen optimaal te laten beantwoorden aan de eisen van deze tijd.