

# Span of control

van den Bosch, P.P.J.

Gepubliceerd: 01/01/2013

## *Document Version*

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

### **Please check the document version of this publication:**

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

[Link to publication](#)

### **General rights**

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

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

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Afscheidscollege  
prof.dr.ir. Paul  
van den Bosch  
6 september 2013



/ Faculteit Electrical Engineering

**TU** / **e**

Technische Universiteit  
**Eindhoven**  
University of Technology

# Span of Control

Where innovation starts

Afscheidscollege prof.dr.ir. Paul van den Bosch

---

# Span of Control

Uitgesproken op 6 september 2013  
aan de Technische Universiteit Eindhoven



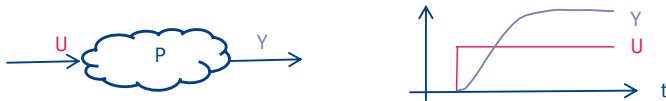
# Inleiding

Vandaag ga ik proberen u deelgenoot te maken van mijn fascinatie voor het vakgebied Regeltechniek. Hierin ben ik aan de universiteit de afgelopen veertig jaar met veel plezier werkzaam geweest. Mijn doel is u iets van die fascinatie te laten zien en te laten voelen. Ook ga ik proberen enkele karakteristieken zichtbaar te maken van het onderwijs en van een loopbaan als leerstoelhouder aan een universiteit. Omdat u, mijn publiek, niet uniform bent in voorkennis, moet ik mij didactisch in veel bochten wringen om mijn boodschap te kunnen overdragen. Voor vakgenoten heb ik dat al gedaan via colleges, publicaties en voordrachten. Ik beperk mij daarom tot globale beschrijvingen en observaties en ik gebruik niet-technische voorbeelden. Door het universele karakter van ons vakgebied met begrippen als terugkoppeling/feedback, model, systeem, meten, regelen en besturen, is mijn vakgebied breed toepasbaar, dus ook om processen in de natuur, in de maatschappij, in het leven en in je eigen handelen te analyseren en beter te begrijpen. De titel, Span of Control, duidt op het bereik dat je zinvol kunt beschrijven, begrijpen, regelen of besturen. Een te grote Span of Control leidt meestal tot problemen.

# Vakgebied Regeltechniek

## 1 Methoden

Aan mijn ouders heb ik nooit goed duidelijk kunnen maken wat ik aan het doen was. Het voorbeeld van de kamerthermostaat die de temperatuur ongeveer constant houdt in een woning is niet inspirerend. Daar hoef je geen hoogleraar voor te worden. Cruise control in een voertuig is al iets spannender, net zoals de soms onverklaarbaar grote snelheidsvariaties in een bijna met voertuigen verzadigde weg of de effecten van medisch of overheidsingrijpen die pas op langere termijn zichtbaar worden. Deze voorbeelden hebben een aantal overeenkomsten. Een daarvan is de aanwezigheid van dynamica. Dynamica is te illustreren aan de hand van het gedrag van een proces  $P$ .



Figuur 1

Proces  $P$  en zijn stapresponsie  $Y$

Als een ingang  $U$  van een proces  $P$  verandert, dan zal dat gevolgen hebben op de uitgang  $Y$  van datzelfde proces. Als de CV-ketel wordt aangezet, stijgt pas na enige tijd de temperatuur in de woning. Als je een penicilline kuur neemt na een bacteriële infectie, dan neemt de koorts pas in de loop van dagen af. Die tijd tussen het begin van de verandering van de ingang tot dat de uitgang weer tot rust is gekomen, wordt bepaald door de dynamica van het proces.

Dynamische processen hebben een gemeenschappelijke eigenschap. Die eigenschap is door Bilderdijk literair verwoord [3] en het beschrijft de kern van ons vakgebied Regeltechniek:

***In het heden ligt het verleden  
In het nu wat komen gaat***

Hoewel goed verwoord, en intuïtief begrijpelijk, is er nog de onzekerheid van het woordje het. Wat ligt er dan in het heden, dat is gevormd door het verleden en dat de toekomst bepaalt? Bij mensen denk je dan aan genen, karakter, capaciteiten en competenties. In de Regeltechniek hebben we daar een mooi begrip voor, namelijk de 'toestand', die we aangeven met de letter X. De toestand kennen, levert veel informatie over het proces. In ons vakgebied is de toestand de minimale hoeveelheid informatie die nodig is om samen met de ingang U en kennis van het proces P, de uitgang Y te kunnen berekenen. Bij een rijdende auto kan de toestand bijvoorbeeld zijn snelheid, zijn positie en de temperatuur van de motor zijn. De eigenschappen van het proces P gaan we nu wiskundig formuleren met een model M dat we van het proces P hebben gemaakt. M representeert daarmee de voor ons relevante kennis van P.



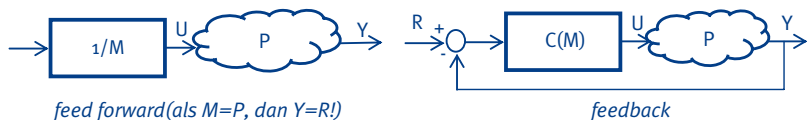
Figuur 2

Modelvorming van proces tot model

Met slechts zes letters [M, P, R, U, X, Y] zijn nu de belangrijkste activiteiten in de Regeltechniek eenvoudig te illustreren.

## Regelen

We willen dat de uitgang Y van het proces P een gewenste referentie R volgt. Als we P precies kennen ( $M = P$ ) en er zijn geen verstoringen, dan is regelen zeer eenvoudig: Kies  $U = M^{-1} \cdot R$ . Dan geldt  $Y = P \cdot U = P \cdot M^{-1} \cdot R = R$ ! Dat noemen we 'feed forward'. Als we het proces P niet goed genoeg kennen en er zijn storingen, dan moeten we metingen van de uitgang gebruiken om te kunnen zien of ons doel is bereikt. Dat noemen we dan terugkoppelen of feedback. Daartoe ontwerpen we een regelaar C gebaseerd op kennis van M,  $C(M)$ . Deze regelaar berekent op basis van het verschil tussen de referentie R en de gemeten uitgang Y de gewenste ingang U. Feedback (meten) en feed forward (weten) zijn de werkpaarden in ons vakgebied.

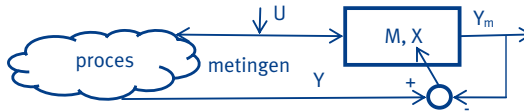


Figuur 3

Regelen met feed forward en feedback

### Toestand schatten

We willen de toestand  $X$  kennen van een proces, want de toestand bevat meer informatie van een proces dan alleen zijn uitgang. Op basis van de ingang  $U$  en het verschil tussen de gemeten uitgang van het proces en de berekende uitgang van het model kunnen we  $X$  berekenen:

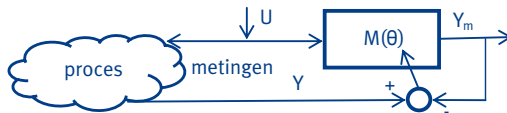


Figuur 4

Toestand schatten op basis van metingen van  $U$  en  $Y$

### Parameter schatten

We veronderstellen dat het model  $M$  afhankelijk is van een aantal parameters, aangeduid met  $\theta$ .  $M$  zou bijvoorbeeld een model van een auto kunnen zijn met  $\theta$  zijn massa. De massa, en dus  $\theta$ , wordt dan mede bepaald door de massa van de inzittenden en van de te vervoeren bagage. De massa kan dus bij elke rit anders zijn. Op basis van het verschil tussen de berekende uitgang van het model en gemeten uitgang van het proces voor hetzelfde ingangssignaal  $U$  kunnen we  $\theta$  berekenen.



Figuur 5

Schatten van parameters  $\theta$  op basis van metingen van ingang  $U$  en uitgang  $Y$

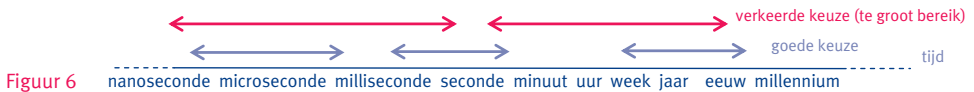
### Model schatten

Ik wil nu aandacht besteden aan een lastig maar uitdagend onderwerp in ons vakgebied, namelijk het maken van een model  $M$  op basis van voldoende fysisch inzicht van een proces  $P$  (Fig. 2). Het is een intellectuele uitdaging zonder veel wiskundige hulpmiddelen, gebaseerd op voldoende kennis van het proces dat we willen modelleren én van het doel waarvoor het model gebruikt gaat worden. Eén ding weten we zeker, het model zal altijd een beperkte beschrijving zijn van het proces  $P$  ( $M \subset P$ ). Het mag, sterker, het móet afwijken van  $P$ , want we zijn nooit geïnteresseerd in alle aspecten van  $P$  maar alleen in dat deel dat voor ons belangrijk is. Het beste model is het eenvoudigste model dat alleen de relevante zaken voldoende goed beschrijft. De kleur en de prijs van een auto zijn niet relevant als we zijn brandstofverbruik willen berekenen.



De belangrijkste eerste stap is dan ook het bepalen van de systeemgrens (wat wel en wat niet mee te nemen). Deze eerste keuze is bepalend voor het eindresultaat. Er zijn enkele hulpmiddelen. Ik zal er 2 noemen:

**1 - Dynamica, of de tijdschaal.** Deze moet begrensd zijn tot ongeveer 5 ordes. Dat wil zeggen dat de verhouding tussen de traagste en de snelste verschijnselen ongeveer  $10^5 = 100.000$  is. Als meer ordes nodig zijn, is het een niet goed gesteld probleem dat vrijwel altijd leidt tot problemen bij analyse, synthese en simulaties. Een model maken van de ademhaling dat zowel zeer snelle chemische reacties als de evolutie probeert te beschrijven, overschrijdt een zinvolle Span of Control.



Figuur 6  
Span of Control van een model

**2 - Modelrepresentatie.** Bij modelvormen wordt de fysica van een proces P omgezet in wiskundige beschrijvingen van het model M. De keuze van een geschikte wiskundige beschrijving is belangrijk. Een begrip daarbij is 'causaliteit': een bepaald effect heeft een gevolg. Fysica kan het beste worden beschreven met acausale interacties [6, 28]. Oorzaak en gevolg zijn niet te scheiden. Daarom passen beschrijvingen zoals 'acausale bondgrafen' of 'behaviors' beter bij de fysica dan de causale regeltechnische modellen, zoals toestandsbeschrijvingen en overdrachtsfuncties. Ik heb dat zelf op de harde manier geleerd bij het modeleren van een ideale diode met een toestandsmodel. Dat was verrassend lastig en daardoor zeer leerzaam. Het lijkt een paradox: door het complexe fysische gedrag van een diode te beschrijven met een passieve ideale schakelaar werd het model complexer! Voor fysische processen met een acceptabele Span of Control is het mogelijk gebruik te maken van toestandsmodellen. De toestand representeert dan de energie- en/of massabuffers van het proces. De interactie tussen componenten vindt plaats via vermogen- of massastromen. Dankzij dit uniforme model kan ik eerstejaars van vele studierichtingen zeer inzichtelijk laten zien hoe je toestandsmodellen kunt afleiden van automotieve, biomedische, elektronische, elektrische, natuurkundige, scheikundige of mechanische processen of elke combinatie ervan. Het is elk jaar weer een waar genoegen als ik zie dat deze boodschap door de meeste eerstejaars studenten wordt begrepen en zonder fouten wordt toegepast.

Modellen zijn universeel bruikbaar. Het zijn beschrijvingen van gecondenseerde kennis. Een mooi voorbeeld is het volgende niet-technische model. Er zijn en worden boeken (Thora, Bijbel, Koran, ..) vol geschreven over hoe je je kunt en moet verhouden tot je medemens. Die zijn gebaseerd op opvattingen, aannamen en doorleefde ervaringen. Toch kan een zeer eenvoudig model de essentie van ethisch handelen in de meeste gevallen voldoende goed kan beschrijven. Het voldoet aan de twee basiseisen: bruikbaarheid en relevantie maar, toegegeven, het verstrekt niet de dagelijkse leefregels.

Ethisch model [1]

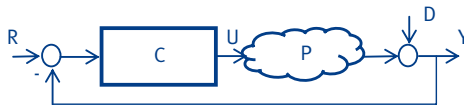
***Wat jij niet wilt dat U geschiedt  
doet dat ook een ander niet***

## 2 - Formules in de Regeltechniek

Ons vakgebied van de Regeltechniek en Systeemtheorie kent zeer vele krachtige en elegante formules. Bij drie mooie formules wil ik kort stilstaan, omdat ze voor mij enkele essentiële zaken van ons vakgebied illustreren die breder toepasbaar zijn.

### 1 - Terugkoppeling

We willen dat de uitgang Y van een proces de referentie volgt ondanks storingen (D) en eventuele fouten in het model M dat we van het proces P hebben gemaakt. Dan moeten we de uitgang meten.



Figuur 7

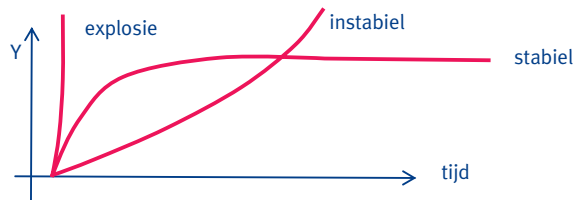
Regeling van het proces P met regelaar C

Als we dan de uitgang uitrekenen van het regelschema van figuur 7, volgt:

$$Y = \frac{P * C}{1 + P * C} * R + \frac{1}{1 + P * C} * D$$

Door C heel groot te kiezen, krijgen we  $Y \approx R$  en voor  $C \rightarrow \infty$  zelfs  $Y = R$  voor onbekende P en D! Ondanks toleranties en verstoringen doet de uitgang wat we willen! Fascinerend is om te zien dat regeltechniek zo eenvoudig oogt. Enig probleempje

is dat je C niet altijd voldoende groot kunt kiezen. Ontwerpen is daardoor compromissen sluiten geworden. Te grote waarden van C kunnen leiden tot instabiliteiten. Dat is een probleem. Daarom een kort uitstapje naar stabiliteit, een fundamenteel begrip in de regeltechniek. De Russische geleerde Lyapunov heeft zijn condities voor stabiliteit al in de negentiende eeuw mooi beschreven en dat begrip is ruim een eeuw lang zo gebleven. In onze groep is afgelopen jaren met succes gewerkt aan minder strenge condities die leiden tot betere regelaars.



Figuur 8

Stabiele en instabiele responsies

Thermische, mechanische en elektrische processen zijn meestal stabiel. Een kernreactie bij kernsplijting niet. Daarbij komen neutronen vrij. Hoe meer neutronen, hoe sneller de reactie verloopt, en dus hoe meer neutronen, waardoor de reactie nog sneller verloopt, kortom een kernexplosie. Priestland gebruikt in zijn uitdagende boek 'Merchant, Soldier, Sage' [23] ook het begrip stabiliteit van de maatschappij. Hij laat zien en maakt plausibel, dat een maatschappij die wordt gedomineerd door de handelaar en bankier per definitie instabiel is. De systeemcrisis die we nu doormaken is volgens hem onvermijdelijk. De rol van de handelaar is zeker belangrijk met grote positieve effecten op het gebied van efficiency in productie en distributie van producten en diensten. Echter, zonder tegenkrachten (terugkoppeling) van andere groepen, ontspoord een dergelijk maatschappij en is dus, volgens zijn redenering, instabiel. Saillant is dat hij de eerste maatschappij waarbij de handelaar een zichtbaar grotere rol is gaan spelen, toeschrijft aan Nederland in onze gouden eeuw.

Door de toepassing van geschikte middelen uit de Regeltechniek kunnen we ook instabiele processen stabiliseren. Behalve stabiel, kunnen we processen ook snel en nauwkeurig maken. Helaas is er een bovengrens aan wat we met Regeltechniek kunnen bereiken. Dat wordt mooi uitgedrukt in de Bode sensitivity integraal. Lokaal verbeteren kan, maar dan zal als consequentie het systeemgedrag op een andere plek verslechteren. Dus we moeten de gebieden kiezen waar verbetering nodig is en de onvermijdelijke negatieve gevolgen in een gebied plaatsen waar het

geen kwaad kan. Dat noemen we het waterbed effect. De tweede beperking van feedback zit in het meten van de uitgang  $Y$ . Als de meting niet voldoende goed is, is directe terugkoppeling geen optie.

## 2 - Optimaliseren

Bijna elk technisch probleem kan worden geformuleerd als iets dat kosten met zich meebrengt, waarbij we kunnen kiezen uit een aantal variabelen en rekening moeten houden met een aantal eisen. Bij optimaliseren noemen we de te kiezen variabelen de parameters  $\theta$ , de kosten worden uitgedrukt als kostenfunctie  $J(\theta)$  en de eisen als beperkingen  $h(\theta)$ . Als we vervolgens die waarden  $\theta^{opt}$  willen berekenen die, rekening houdend met de eisen, de laagste kosten geven, kunnen we dat elegant formuleren als:

$$\theta^{opt} = \underset{\theta}{\operatorname{arg\,min}} J(\theta) \\ h(\theta) \leq 0$$

Een voorbeeld is het minimaliseren van de brandstofkosten van een voertuig als deze een goed gedefinieerd traject moet rijden.  $J(\theta)$  representeert de brandstofkosten en  $h(\theta)$  zijn de randvoorwaarden zoals het te volgen traject en de eigenschappen van het voertuig [20].

Educatief illustratief is dat optimaliseren kan worden teruggevoerd tot het vinden van de minst slechte oplossing en dat die oplossing dan ook gelijk de beste oplossing is. Vaak wordt gedacht dat optimaal goed is. Dat is niet zo. Het is een relatieve maat, geen absolute. Er zijn hele slechte optimale oplossingen omdat het optimalisatieprobleem niet goed is geformuleerd. Stel we willen een regeling maken voor een CV die leidt tot het minste gasverbruik. Dan is de optimale regelaar van het zo geformuleerde probleem: niets doen. Het gasverbruik is dan 0, minder kan echt niet!

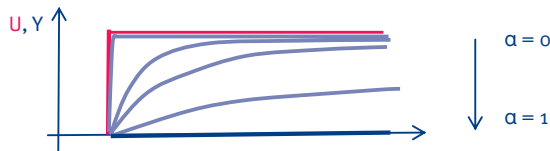
Regeltechniek is meestal het vinden van het beste compromis. Niet alles kan, maar we kunnen wel proberen het zo goed mogelijk te doen. Dat leidt tot een optimalisatieprobleem. De echte uitdaging is om het optimalisatieprobleem als een convex probleem te formuleren. Dan is de formulering lastiger, maar de oplossing eenvoudiger, want we kunnen een unieke oplossing garanderen. Dankzij de techniek van optimaliseren is de regeltechniek heel erg krachtig geworden.

### 3 - Filteren

Een dynamisch systeem gedraagt zich als een filter. De waarde van de uitgang op het huidige tijdstip ( $k$ ) hangt af van zijn waarde op het vorig tijdstip ( $k-1$ ) en van de waarde van de huidige ingang. Dat wordt voor een eenvoudig geval getoond in de volgende formule:

$$Y_k = \alpha * Y_{k-1} + (1 - \alpha) * U_k$$

Voor verschillende waarden van  $\alpha$  zijn in figuur 9 de responsies geïllustreerd op een stapvormig ingangssignaal  $U$ .



Figuur 9

Responsie  $Y$  afhankelijk van de waarde van  $\alpha$

Als we deze formule toepassen op het verwerven van nieuwe kennis, stelt  $Y$  onze kennis voor op tijdstip  $k$  en  $U$  is een andere mening uit onze omgeving:

- Voor  $\alpha$  klein vertrouwt je niet op je eigen kennis, maar volg je de buitenwereld. Dat is vermoeiend, maar het biedt een goede kans om bij te leren. Een lage waarde van  $\alpha$  is aan te raden voor jongeren, maar is vermoeiend als je iets op internet opzoekt waar alles en iedereen elkaar tegenspreekt.
- Voor  $\alpha$  groot is je eigen oordeel belangrijker geworden dan dat van de buitenwereld. Je hoeft dus niet meer zoveel te luisteren. Wel zo prettig, maar lastig of gevaarlijk als je ernaast zit. Een redelijk grote  $\alpha$  is nodig als je zin en onzin van elkaar probeert te scheiden op internet, tv of krant.
- Voor  $\alpha = 1$ , ben je volledig geïsoleerd van je omgeving. Alle oordelen zijn vooroordelen. De eigen wijsheid is verworden tot eigenwijsheid. Een vrije pers en vrije discussies, visitaties en de harde praktijk zijn nodig om de waarde van  $\alpha$  kleiner dan 1 te houden.

Dit mechanisme begrijpen in de techniek of voor jezelf helpt. Zeker door de factor  $\alpha$  aan te passen aan de situatie. Doceren vergt een hogere waarde van  $\alpha$  dan leren.

**Stand van zaken**

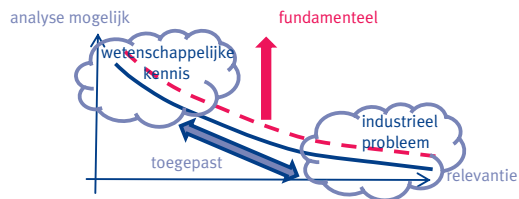
Nederland behoort samen met Zweden en Australië tot de wereldtop op het gebied van de Regeltechniek en Systeemtheorie. Dat is mede te danken aan de grote internationale rol die o.a. Jan Willems, Huib Kwakernaak, Piet Eyckhoff en Okko Bosgra internationaal hebben gespeeld en die hun opvolgers nu spelen. Dat is ook te danken aan onze landelijke onderzoeksschool DISC die het succes in stand houdt. Terugkijkend zie ik dat we als dwerg op de schouders van deze en andere reuzen [2] hebben mogen staan om, samen met een getalenteerde staf en knappe PhD's, een bijdrage te leveren in ons vakgebied.

# Onderzoek

Op een technische universiteit is het goed het onderscheid te kennen tussen fundamenteel en toegepast onderzoek. Fundamenteel onderzoek zoekt een verklaring voor een klasse van verschijnselen. Die klasse kunnen we zelf kiezen met in het achterhoofd dat het wel eens nuttig kan worden. Toegepast onderzoek zoekt een oplossing voor een concreet, vaak industrieel probleem [10]. Daarbij moeten de wensen van de industrie naar een regeltechnische probleemformulering worden omgezet die aan twee essentiële eisen moet voldoen:

1. relevant zijn en blijven voor de industriële vraagstelling
2. analyseerbaar zijn met beschikbare hulpmiddelen (al dan niet een beetje aangepast)

Als aan de eerste eis niet wordt voldaan, is een oplossing niet relevant voor de industrie, maar kan het academisch toch zeer uitdagend zijn. Als aan de tweede voorwaarde niet wordt voldaan, kan simulatie mogelijk enig inzicht geven, maar analyse is onmogelijk. Het vinden van een formulering die aan beide eisen voldoet, is de uitdaging en geeft een grote voldoening. Met behulp van fundamenteel onderzoek vergroten we de klassen van problemen die wel kunnen worden opgelost [6, 12, 14, 17, 19, 25].



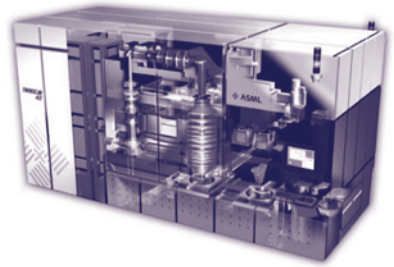
Figuur 10

Fundamenteel en toegepast onderzoek

## Industriële toepassingen

Om de abstractie van ons vakgebied een gezicht te geven, laat ik hier enkele industriële processen zien waaraan we, soms grote, bijdragen hebben gegeven:

**Waferscanners:** de evolutie van PCs, notebooks, tablets, mobiele telefonie, SSD, etc. wordt gedragen door o.a. de productiemachines voor de elektronische schakelingen. Deze zijn uniek in hun nauwkeurigheid (nanometers) en productiesnelheid. Samen met de collega's van EPE en ASML hebben we hier belangrijke fundamentele en praktische oplossingen uitgewerkt [9, 11, 19, 22].



**Energievoorziening:** door de gewenste koppeling van de energienetten in de EU is een van de grootste dynamische systemen ontstaan, met forse uitdagingen voor de regeltechniek. Toenemende marktwerking, gebrek aan opslag en de komst van minder voorspelbare wind- en zonne-energie maken dit terrein zeer uitdagend. Vooral de overlap tussen economie, techniek en de regelgeving van de overheid maakt onconventionele oplossingen noodzakelijk. Wij hebben hier samen met de collega's van EES en APX, KEMA en TenneT fundamentele en praktische oplossingen uitgewerkt en voorgesteld [15, 17].



**Elektronenmicroscopen:** nog nauwkeuriger zijn elektronenmicroscopen, waarmee we nu al aparte atomen kunnen afbeelden. Samen met FEI hebben wij bijgedragen aan het beter begrijpen van hysteresis in het compromis tussen snelheid en nauwkeurigheid van de opnamen [4].

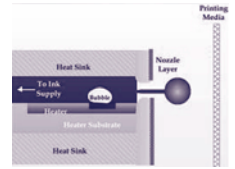


**Energiemanagement voertuigen:** het reduceren van het brandstofverbruik is een door de overheid gestimuleerde ontwikkeling. Door uitbreiding van het probleem naar ook het thermisch gedrag en emissies, hebben we samen met onze collega's bij CST en met Ford en Daf waardevolle bijdragen gegeven [20, 27].

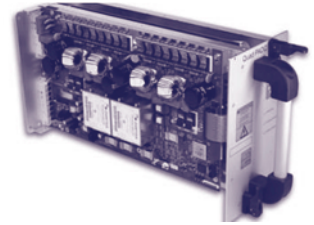




**Professionele printers:** we hebben bijgedragen aan het verbeteren van de printsnelheid en printnauwkeurigheid in samenwerking met Océ Technologies, mede door een beter begrip van de essentiële dynamische processen in een printer [10, 24].



**Vermogensversterkers:** met vermogenselektronica kunnen we verliesarm elektrisch vermogen sturen. Daarom speelt elektrische energie een toenemende rol in automatisering en in de voertuigtechniek. Door de gevraagde snelheid en de sterke niet-lineariteiten van de vermogenselektronica worden zeer zware eisen gesteld aan de toegepaste regeltechniek. Omdat onze MPC-regelaar werkt op 100 kHz, kunnen we nu vermogensversterkers steeds nauwkeuriger regelen. Dat hebben we samen met EPE en Prodrive laten zien.



Door die successen voelen we ons als regeltechnici soms heel even de Masters of the Universe. Maar bescheidenheid is op zijn plaats. Succes heeft vele vaders. Rondlopen op bijvoorbeeld de Technology Day van ASML leert dat er heel erg veel bij komt kijken om de uiteindelijke prestaties te halen. Maar het blijft een feit dat de regeltechniek door het generieke en integrerend karakter een belangrijke rol speelt in het uiteindelijke compromis van het ontwerp. Regeltechniek staat toe op een systematische en kosteneffectieve manier onzekerheid en productietoleranties te reduceren. Dat maakt betere en goedkopere producten mogelijk.

### Uitdagingen in ons vakgebied

We beschikken over mooie en elegante theorieën om complexe systemen goed te kunnen analyseren en te ontwerpen. Maar er zijn een aantal relevante gebieden waar onze theorie nog echt tekort schiet. Ik bespreek drie gebieden omdat ze volgens mij nog steeds behoren tot de belangrijkste uitdagingen in ons vakgebied. We hebben er zelf aan gewerkt, maar de oplossing nog niet volledig gevonden.

**1 - Gedistribueerde regelingen:** Systemen worden steeds meer verknoopt, zoals het internet, de energienetten in Europa of verkeersnetten in grote steden en agglomeraties. Het besturen en beheersen van dergelijk systemen is een probleem. Ik zal dat probleem toelichten aan de hand van energienetten. In theorie zijn alle storingen in het hele synchrone EU-net overall merkbaar. Kortom het is een sterk gekoppeld systeem, waarbij met hoogspanningslijnen de landelijke netten in

de EU aan elkaar zijn gekoppeld. Het lijkt een droom dit hele systeem centraal te mogen regelen om de hoogste efficiëntie en betrouwbaarheid te halen. Zelfs als we zeer snelle communicatiemiddelen en zeer krachtige computers zouden hebben, is het de vraag of dat de beste oplossing is. Ik denk van niet. Een dergelijk centrale oplossing kan op papier optimaal zijn, maar is dat niet in de praktijk. Het centraal verwerken van miljoenen metingen, het berekenen van duizenden stuursignalen en het gegarandeerd betrouwbaar moeten houden van commerciële gegevens is niet verstandig en gaat ver buiten een redelijke Span of Control. Beter is het na te denken over gedistribueerde oplossingen. Ieder deel kan dan zijn eigen lokale doel nastreven en communiceert alleen met zijn burens. Door geschikte prikkels wordt er voor gezorgd dat, als elk deelsysteem zijn eigen doel nastreeft, het globale optimum voor het totale systeem kan worden bereikt. In de techniek moet je dan stabiliteit en optimaliteit garanderen. In de afgelopen jaren hebben we belangrijke bijdragen geleverd bij het gedistribueerd regelen van het Europese energienet, maar het onderzoek is zeker nog niet afgerond [15, 17]. De gevonden oplossingen, geschikte prikkels of stimulansen aan alle deelnemers, zijn gedeeltelijk generaliseerbaar naar overheidsbeleid voor niet-technische systemen. Die prikkels moeten dan het moreel risico (moral hazard) en het gratis meeliften (free lunch) vermijden. Die prikkels zijn volgens Priestland in onze huidige maatschappij, bij de handelaren en bankiers, te zwak [23]. Die prikkel is bijvoorbeeld ook onvoldoende zichtbaar bij het afsluiten van een hypotheek, bij het afspreken van medische behandelingen en bij de aanvraag van zorg. De betrokken partijen hebben de voordelen van de transactie, maar de kosten worden gesocialiseerd, dus worden vooral gedragen door anderen (overheid, burens). Dat lijkt en is geen houdbare strategie voor collectieve voorzieningen.

**2** - Toestandschatters verzamelen de relevante gegevens die nodig zijn voor observatie of regeling. In complexe systemen zijn zij van groot belang. In analogie met gedistribueerde regelingen wordt al lang gezocht naar een gedistribueerde versie van deze schatters. Ook op dit gebied hebben we de afgelopen tijd bijgedragen [25]. Echter, alle beschouwingen tot nu toe veronderstellen de aanwezigheid van een globale toestand. Dat is onnatuurlijk en maakt de Span of Control van de schatter te groot. Het is nodig dat we een theorie gaan afleiden waar die aanname niet meer nodig is.

**3** - Tien jaar geleden had ik de hoop en de verwachting dat het ons zou lukken een brug te slaan tussen modellen van de fysica en die van de informatica. Die brug is zeer relevant. Bijna elk (fysisch) product wordt aangestuurd door software ondergebracht in een kleine processor. In de dagelijkse omgeving van bedrijven is de

communicatie tussen de fysische en software-afdelingen problematisch, juist omdat die brug ontbreekt. Helaas moet ik nu constateren dat we, ondanks elegante pogingen via het gebied Hybride Systemen [14, 18, 21], onvoldoende ver zijn gekomen. De modellen van de fysica en van de informatica zijn te verschillend gebleken met vrijwel geen overlap. Simulatie van beide is mogelijk, maar analyse is tot op heden alleen voor zeer eenvoudige voorbeelden gelukt.

Alle drie problemen zijn relevant. Voor de eerste twee voorzie ik dat oplossingen mogelijk zijn. Voor het laatstgenoemde probleem durf ik dat nu niet meer te zeggen. Misschien moeten we dat ook niet willen en ligt het buiten onze Span of Control?

# Onderwijs

Na de zeer globale behandeling van ons vakgebied wil ik met u filosoferen over de rol van het onderwijs aan de universiteit. Ondanks alle aandacht voor onderzoek, zeker vanuit de vakgenoten, benoemingscommissie, visitatiecommissies en het bedrijfsleven, is het opleiden van jonge mensen toch het primaire bestaansrecht. Een universiteit zonder veel onderzoek is denkbaar maar zonder onderwijs niet. Deze observatie lijkt evident, maar is in de dagelijkse praktijk minder herkenbaar.

Onze bestuurders zoals het College van Bestuur en de Faculteitsbesturen weten dat onderwijs belangrijk is. Een slechte beoordeling in een keuzegids of negatief in het nieuws komen, zoals Hogeschool InHolland, heeft vaak op korte en lange termijn negatieve gevolgen op de instroom en daardoor direct op de beschikbare financiële middelen van de universiteit. Echter, de docenten die het onderwijs verzorgen, hebben ook andere belangen. In hun universitaire loopbaan moeten zij namelijk ook aantonen dat ze vergelijkbaar en liefst beter zijn dan collega's in binnen- en buitenland. Dat blijkt o.a. uit het aantal geaccepteerde publicaties in gerenommeerde tijdschriften. Die publicaties van origineel en goed onderzoek en verworven projecten komen op het CV en gaan een leven lang mee. Ze zijn direct gekoppeld aan de persoon. Onderwijsactiviteiten zijn vaak alleen tijdelijk herkenbaar en minder of geheel niet zichtbaar op het CV. Een docent ervaart dus veel prikkels om onderzoek een hogere prioriteit te geven. Voor de bestuurders vormt dat een dilemma.

Dus worden er voor onderwijs, en niet voor onderzoek, bureaucratische maatregelen voorgesteld om de balans te herstellen, zoals docenttrainingen, BKO-certificaten en voorschriften die in de weerbarstige praktijk niet zijn op te volgen. Of deze maatregelen de balans herstellen, is een goede vraag. Vele studies geven aan [5] dat de kwaliteit van het onderwijs niet wordt bepaald door competenties van de docent of de infrastructuur, maar door de persoon van de docent. Studenten worden niet aangesproken door een verzameling competenties maar door een motiverende docent die ze al dan niet bereid zijn te volgen. Uiteraard helpen competenties mee, maar deze zijn niet voldoende. Ook onderwijsmodellen, die regelmatig veranderen, zijn niet dominant belangrijk [5]. Veranderen op zich biedt de mogelijkheid ingesleten slechte gewoontes op te ruimen, maar het biedt

geen blijvende garanties op verbetering en vergt wel omschakelkosten. Mijn conclusie: het geven van kwalitatief goed onderwijs moet lonend zijn voor de docenten, dus zij dienen de juiste prikkels of bestuurlijke terugkoppeling te krijgen. Om mijn pleidooi voor goed onderwijs effectief te maken, stel ik voor de komende jaren een prijs beschikbaar voor de, mede door studenten te bepalen, beste Bachelordocent van de faculteit Electrical Engineering. De studenten hebben ook al een naam voor deze prijs bedacht: de PPJ-onderwijsprijs.

De onderwijshulpmiddelen zijn ook veranderd. Zelf heb ik de ontwikkeling doorlopen van krijtje en bord, overhead met sheets en nu de beamer met PowerPoint en recent op onze TU/e met het SmartBoard gespeeld. Na al die jaren heb ik ontdekt dat de techniek wederom ondergeschikt is aan de docent. Elke docent heeft zijn eigen, individuele stijl die past bij zijn persoon en zijn wijze van lesgeven. En ik ben weer terug bij het begin, het krijtje. Mijn aanpak als docent is in de eerste plaats de studenten te motiveren mijn betoog te volgen en vervolgens in het college alleen de hoofdlijnen en de concepten te behandelen en de studenten, tijdens ingelaste periodes in het colleges, zelf te laten werken/worstelen met die concepten bij het oplossen van eenvoudige opgaven. De hoofdlijnen tonen gaat voor mij het beste met een groot bord en het simpele krijtje. De redenering wordt stap voor stap ontwikkeld, wordt toegelicht en verschijnt in een rustig tempo op het bord. Maar bovenal, de behandelde stof blijft staan. Als er voldoende bordruimte is, en je houdt er als docent rekening mee, dan staat na een college een mooi verhaal op het bord. Ik denk dat dat beter blijft hangen dan de voorbij flitsende PowerPoint plaatjes. Ik prijs me dan ook gelukkig met collegezaal Pt1.05. Ouderwets, maar wel vier grote bordes. In moderne gebouwen wordt het beschikbare bordoppervlakte evenwel geminimaliseerd tot zo'n 'white board'-je met



Figuur 11

Uitleg ontwerp in frequentiedomein met bord en krijtje in Pt1.05

weigerende pennen. Uiteraard realiseer ik me dat andere docenten hun doel ook kunnen bereiken met andere hulpmiddelen.

Toen ik recent in de oude collegezalen van Padua (Galileo Galilei), Salamanca (Fray Luis de Leon) en Coimbra stond, kon ik me voorstellen hoe de docenten van die tijd hun gehoor met hun woord en lichaamstaal wisten te boeien en beïnvloeden, maar ook de ergernis van de toenmalige machthebbers konden opwekken. De macht en kracht van het woord zijn groot. Die kun je ook bij het onderwijs goed gebruiken. Ik doe dan ook niet mee met de klaagzang dat de studenten slechter zijn geworden. Hun motivatie, ambitie en intelligentie is niet anders dan vroeger. Ze zijn jong en op de top van hun leervermogen, maar er zijn ook zeer veel afleidingen. De wiskundekennis van het VWO is mogelijk minder, de goeden hebben verleerd hard te werken, ... en toch lukt het bevlogen docenten ze te boeien en ze te laten groeien en bloeien tot de generatie die onze AOW gaat verdienen.

Met een continue veranderende technologie denk ik dat onze studenten het meest zijn gebaat bij een generieke opleiding met af en toe diepgang om de schoonheid en kracht van echt begrijpen een keer te leren ervaren en waarderen. De keuze van onze universiteit voor een brede bachelor lijkt mij dan ook een juiste.

# Rol als hoogleraar- leerstoelhouder

Als laatste wil ik nog reflecteren over de essentiële rol van leerstoelhouder. Ik ben dat 18 jaar geweest, heb veel naar anderen gekeken hoe zij dat deden en ontdekt dat het geen gemakkelijke, eigenlijk een onmogelijke, maar desondanks toch bevredigende rol kan zijn.

Laten we eens kijken naar de Span of Control van de bestuurslagen op een universiteit. Het Ministerie/VNSU overlegt met 10 CvBs, een CvB overlegt met zijn 10 decanen. Een decaan overlegt met de 10 leerstoelhouders. De Leerstoelhouder overlegt met zijn 10 stafleden. Een staflid overlegt met zijn studenten en promovendi. Dat lijkt aardig te kloppen. De Span of Control is overal netjes verdeeld. De Romeinen deden dat in hun legers ook al met hun indeling in legioen, cohort, centuria en contubernium. En zij zijn een paar eeuwen redelijk succesvol geweest, behalve dan in een klein dorpje in Bretagne [13]. Dus een verdeling met steeds een factor 8 tot 10 lijkt goed te zijn. Maar er is toch een probleem. Ik zal proberen dat te verwoorden. Er is een verschil tussen model en praktijk (proces). Iedere bestuurslaag creëert zijn eigen bestuursmodel van zijn werkelijkheid. Hoe hoger, hoe abstracter. Als je vergeet dat er een verschil is tussen model en praktijk ontstaat er een probleem. In de regeltechniek heb ik laten zien dat je dat probleem kunt voorkomen door constant te meten. In bestuurlijk jargon is dat luisteren. Maar als je teveel luistert, komt je eigen model in de knel. Dat is vervelend. Dus er is een bestuurlijke tendens minder te luisteren en door te gaan zoals het zou moeten zijn. Geen feedback (luisteren), maar feed forward (eigen gelijk) gebruiken. Ik zal twee voorbeelden noemen waar het verschil tussen model en praktijk groot is en soms te groot dreigt te worden:

**Aantal werkbare uren.** Modelmatig is het aantal uren waarvoor je wordt aangesteld duidelijk. Ik mocht zelf kiezen of dat 40 of 38 uur per week was. Meer uren vragen van je medewerkers kan en mag niet. Echter, wil je als medewerker meedoen met de internationale norm dan lukt dat niet met die 40 uur per week. Iets meer is niet erg, zeker niet als je werk je hobby is. Maar ook voor getalenteerde mensen komt er nog een aanzienlijk aantal uren bij. De inzet is en moet ook groter zijn dan de modelmatig gevraagde inzet. Bij beoordelingen gaat het niet meer over de getoonde inzet maar over de gerealiseerde prestaties. Die nemen nog steeds

toe door efficiencyverbeteringen (internet, e-mail, elektronische bibliotheken, etc.), maar ook een toenemend gebruik van privé-tijd. Niet je absolute prestatie, maar je relatieve prestatie ten opzichte van collega's wereldwijd telt. Met andere woorden, net als in de globale wereldmarkt voor mobieltjes, bepaalt de succesvolste de norm. Als bestuurder moet je dat weten (dus luisteren) en niet vertrouwen op het modelmatige getal van 40 uur per week. Dus soms moet je noodzakelijke dingen toch niet vragen aan je overbelaste staf, maar zelf doen of negeren. Zelf heb ik ook op de meeste avonden, vaak onder het luisteren naar de Canto Ostinato [16], mijn werk gedaan, maar ook enkele overlevingsstrategieën toegepast. Als teveel van je wordt gevraagd, en dat gebeurt constant, dan biedt dat de vrijheid zelf te beslissen welke taken niet meer worden gedaan. Een gecontroleerde vorm van bestuurlijke ongehoorzaamheid. Wat ook helpt, is gebruik te maken van de wet van de verminderende meeropbrengst. Perfectie is onhaalbaar. Dus als je jezelf een klein percentage fouten maken toestaat, kun je met aanzienlijk minder tijd toe om een artikel, college, rapport of voordracht voor te bereiden.

**Financiële projectorganisatie:** ik heb vele goede en toegewijde facultaire directeuren gekend die hebben geholpen de financiële afhandeling van onze groep inzichtelijk te krijgen. Na elke ronde discussies was de verzuchting dat het financiële systeem van de universiteit helaas niet kon voldoen waaraan ik als leerstoelhouder behoefte had. Maar, volgend jaar, (*mañana*), dan zou het op orde zijn. Ik heb het nog niet mee kunnen maken. Wel was er wederzijds begrip voor het verschil tussen bestuurlijk of financieel model en de praktijk. En dan kun je samen tot werkbare oplossingen komen. Echter, de huidige trend is om het model dominant te verklaren, zonder verdere flexibiliteit. Een voorbeeld. Een project wordt vaak vastgesteld voor de duur van drie jaar. Tijdens die periode kunnen kosten worden gedeclareerd. Echter, de kosten voor dat project die gemaakt zijn buiten die periode, zijn binnen de TU/e niet meer declarabel. Dus voorbereiding, schrijven van voorstellen, zoeken van promovendi voorafgaande aan het project en kosten na afloop en de kosten van de promovendus in zijn laatste jaar kunnen niet meer worden gedeclareerd. Dat is bestuurlijk logisch, want er was en er is dan geen project. Het project bevat wel de middelen om de voorafgaande en na-ijlende kosten te dekken, maar ze zijn sinds kort niet meer toegankelijk. Tja, dan wordt financieel plannen een praktisch probleem.

Ter illustratie enkele globale financiële cijfers van onze groep. De kosten van vast en tijdelijk personeel, investeringen, reizen etc. bedroegen ongeveer 2 miljoen euro per jaar. De directe bijdrage van de faculteit op basis van onze onderwijs en onderzoekprestaties was ongeveer vierhonderduizend euro per jaar, dus 20%.



De rest, 80%, moesten we als groep zelf verwerven met goede voorstellen bij het CvB, STW, EU en bedrijven. Als leerstoelhouder leid je een soort bedrijfje. Een goede, behulpzame financiële ondersteuning die ook rekening houdt met de weerbarstige praktijk, helpt enorm. Een iets betere verdeling tussen de bestuurslagen van het onvermijdelijk verschil tussen financieel model en praktijk zou hier op zijn plaats zijn. Anders wordt de Span of Control voor een leerstoelhouder te groot. Dus niet alleen besturen met feed forward, maar graag ook met feedback.

Een te grote Span of Control levert een serieus dilemma voor de leerstoelhouder. Als de bovenste bestuurslagen het financieel model als richtlijn nemen en de groep staat in de praktijk, dan kan de leerstoelhouder de conflicten intern oplossen of ze, net als hogere bestuurslagen, wegdefiniëren op zijn niveau en bij de echte uitvoerders (stafleden, promovendi) leggen. Het laatste is het eenvoudigste, het eerste vraagt extra tijd, energie, overleg, geschipper en veel interne conflicten. Ik heb gekozen voor de eerste, tijdrovende aanpak en daarmee de stafleden gedeeltelijk kunnen vrijwaren van de bureaucratische regels en richtlijnen. Je zou dat een dienend leiderschap kunnen noemen. Als groep hebben we daardoor redelijk goed kunnen presteren, zowel in onderwijs als in onderzoek, terwijl de jonge stafleden gedeeltelijk zijn behoed voor de bestuurlijke waan van de dag. Maar het kost wel kruim.

Is het nog wel leuk? Mijn antwoord is, dat omdat onze groep geen probleem was voor onze bestuurders, ik alle vrijheid van handelen heb gekregen. En deze autonomie is voor mij de grote bron van blijvende motivatie geweest. Een relevante vraag is welke prikkels of mechanismen in de toekomst deze motivatie kunnen blijven voeden.

# Dankwoord

Ik heb mogen werken met zeer getalenteerde studenten, afgestudeerden, promovendi, stafleden en collega's. In een faculteit waar, ongebruikelijk voor een universiteit, weinig vermijdbare ruzies zijn geweest. In een vakgebied (Elektrotechniek) dat bijdraagt aan zeer vele relevante technologische ontwikkelingen, maar vooral in het fascinerende vakgebied Regeltechniek. Het is een mooi bouwwerk, conceptueel erg sterk, toepasbaar op vele terreinen omdat modellen, sturen en meten/luisteren essentiële onderdelen zijn van het menselijk bestaan. Het was en is voor mij het mooiste vakgebied om in te werken. Ik heb de vrijheid die mij werd gegund als leerstoelhouder zeer gewaardeerd. De universiteit, faculteit en medewerkers hebben het mij mogelijk gemaakt mijn ambities en capaciteiten te matchen met de rol van leerstoelhouder en nu als gewoon parttime hoogleraar. Daarmee was en is een voorwaarde vervuld voor evenwicht, noem het geluk. Dat is niet een hoge Hirsch of Feynman-index [29], geen eer, genot of geld, maar meer een toestand van tevredenheid, evenwicht of rust zoals o.a. door Spinoza zo sereen is verwoord [26] en voorgeleefd. Ik denk die tevredenheid te hebben gevonden en ervaren. En ik heb geprobeerd ook anderen met dat grote goed in aanraking te laten komen.

De eerste helft van mijn academische loopbaan startte in de groep Regeltechniek van de faculteit Elektrotechniek van de Technische Universiteit Delft. Dankzij de leiding heb ik mij kunnen ontwikkelen in een vrij klimaat van student tot uiteindelijk hoogleraar. Ik heb daar veel geleerd, niet alleen van de techniek en toepassingen maar ook de waarde van eruditie en menselijke relaties leren inzien. Mijn dank gaat zeker uit naar mijn waardevolle leermeesters uit die tijd Van Nauta Lemke en Honderd. Maar ook naar collega Okko Bosgra van de faculteit Werktuigbouwkunde.

De tweede helft van mijn loopbaan heb ik mogen doorbrengen aan de Technische Universiteit Eindhoven aan de faculteit Electrical Engineering in de groep Control Systems, tot voor kort als leerstoelhouder. Het is een fijne menselijke en wetenschappelijke omgeving. De overgang van Delft naar Eindhoven heeft zeer stimulerend gewerkt. Mijn dank gaat dan ook uit naar mijn waardevolle collega's en promovendi in Eindhoven. Ik waardeer zeer de proactieve ondersteuning van Barbara Cornelissen en Will Hendrix, die het leerstoelhouderschap gedurende 18 jaar mede

mogelijk hebben gemaakt. Met genoeg zien ik, nu vanaf de zijlijn, de voortgaande groei in onze groep onder leiding van mijn opvolger Paul Van den Hof.

De faculteit Electrical Engineering is een plezierige omgeving geweest voor onze groep, met prettige collega's met wie we vruchtbaar hebben samengewerkt, met name noem ik Elena Lomonova, Wil Kling en Jan Bergmans. Dankzij een goede samenwerking met de nationale collega's hebben we DISC vormgegeven. Daarom kunnen we de erfenis van onze grote voorgangers levend houden en verder uitbouwen. Het is een groot goed, dat het verdient nog lang te worden gecontinueerd.

We hebben vele gewaardeerde samenwerkingsprojecten gehad met bedrijven. Het was steeds een bron van inspiratie om nieuwe dingen te leren, out-of-the-box te leren denken en het compromis te vinden tussen relevantie en oplosbaarheid.

Maar mijn belangrijkste bron voor ideeën, normen en waarden vormden toch de discussies met mijn ouders, broers en zussen en, later, ook in ons gezin. Die hebben mij mede gevormd tot wat ik nu ben. Peter, Marco en Sandra ik heb het altijd leuk gevonden met jullie problemen op jullie werk mee te denken. Ik herken veel overlap in interesses en werkwijzen. Genetica werkt blijkbaar toch. Tenslotte, mijn belangrijkste referentie, Tineke. Je hebt geprobeerd de ongelimiteerde vraag van de universiteit naar nog meer tijd een beetje te beteugelen. Dat is ons niet altijd gelukt. Maar ik beloof je, ik zal en kan er nu zelf voor zorgen. Laten we de tijd die ons rest op een andere, maar ook uitdagende manier, gaan gebruiken. Ik verwijs graag naar Neil Diamond die, beter dan ik als technicus, kan uitdrukken wat de waarde is van samen te zijn, in het nummer 'The power of two' [8].

Ik zou willen afsluiten met wederom een verwijzing naar Neil Diamond die op een van zijn laatste CD's in het nummer 'Hell Yeah' [7] terugkijkt op zijn loopbaan en op een muzikale manier en met veel meer, niet technische, woorden zegt: het was de moeite waard.

Ik heb gezegd.

# Referenties

1. Karen Armstrong. *De grote transformatie; het begin van religieuze tradities*, De Bezig Bij, 2005
2. Uitspraak toegeschreven aan Bernard de Chartres, Frans filosoof rond 1100 en Newton (1643-1727)
3. Gedicht toegeschreven aan Bilderdijk (1756-1831)
4. Patrick van Bree, *Control of Dynamics and Hysteresis in Electromagnetic Lenses*, PhD thesis TU Eindhoven, 2011
5. Pedro De Bruyckere en Casper Hulshof, *Jongens zijn slimmer dan meisjes en andere mythes over leren en onderwijs*, Lannoo Campus, Culemborg, 2013
6. Pawel Bujakiewicz, *Maximum weighted matching for high index differential algebraic equations*, PhD thesis TU Delft, 1994
7. Neil Diamond, *Hello Yeah*, CD 12 Songs, Sony, 2005
8. Neil Diamond, *The power of two*, CD Home before dark, Sony, 2008
9. Chenyang Ding, *Vibration Isolation Control of a Contactless Electromagnetic Suspension System*, PhD thesis TU Eindhoven, 2013
10. Mohamed Ezzeldin Mahdy Abdelmonem, *Performance Improvement of Professional Printing Systems, from theory to practice*, PhD thesis TU Eindhoven, 2012
11. Michal Gajdusek, *Controlling a contactless planar actuator with manipulator*, PhD thesis TU Eindhoven, 2010
12. Rob Gielen, *Stability analysis and control of discrete-time systems with delay*, PhD thesis TU Eindhoven, 2013
13. René Goscinny, *Astrix de Galliër*, Hachette, 1961
14. Maurice Heemels, *Linear complementarity systems; a study in hybrid dynamics*, PhD thesis TU Eindhoven, 1999
15. Ralph Hermans, *Distributed control of deregulated electrical power networks*, PhD thesis TU Eindhoven, 2012
16. Simeon ter Holt, *Canto Ostinato*, componist (1923-2012)
17. Andrej Jokic, *Price-based optimal control of electrical power systems*, PhD thesis TU Eindhoven, 2007
18. Alexandar Juloski, *Observer design and identification methods for hybrid systems; theory and experiments*, PhD thesis TU Eindhoven, 2004

19. Andelko Katalenic, *Control of reluctance actuators for high-precision positioning*, PhD Thesis TU Eindhoven, 2013
20. John Kessels, *Energy management for automotive power nets*, PhD thesis TU Eindhoven, 2007
21. Mircea Lazar, *Model Predictive Control of Hybrid Systems -Stability and Robustness*, PhD thesis TU Eindhoven, 2006
22. Nelis van Lierop, *Magnetically levitated planar actuator with moving magnets*, PhD thesis TU Eindhoven, 2008
23. David Priestland, *Merchant, soldier, sage; a new history of power*, Allen Lane, London, 2012
24. Heico Sandee, *Event-driven control in theory and practice*, PhD thesis TU Eindhoven, 2006
25. Joris Sijs, *State estimation in networked systems*, PhD thesis TU Eindhoven, 2013
26. Baruch Spinoza, *Ethica, (1632-1677)*
27. Edwin Tazelaar, *Energy management and sizing of fuel cell hybrid propulsion systems*, PhD thesis TU Eindhoven, 2013
28. Andre Veltman, *The fish method, interaction between AC-machines and switching power converters*, PhD thesis TU Delft, 1994
29. Herman Beijerinck, *The unbearable lightness of teaching...*, afscheidsrede, TU Eindhoven, 2011.

# Curriculum Vitae

**Prof.dr.ir. Paul van den Bosch is sinds september 1993 voltijdhoogleraar Meten en Regelen bij de faculteit Electrical Engineering van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e). Op 6 september 2013 houdt hij zijn afscheidsrede. Hij blijft als deeltijdhoogleraar verbonden aan de TU/e.**

Paul van den Bosch (1948) studeerde Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Delft, waar hij met lof afstudeerde. Daarna werkte hij korte tijd voor het bureau van de Rector en vervolgens als wetenschappelijk medewerker in de groep Regeltechniek. Hij promoveerde op het onderwerp 'Landelijke optimalisatie van de productie van elektrische energie'. Aandachtspunten in zijn onderzoek waren computer aided design, simulatie en optimalisatie. In 1988 werd hij in Delft benoemd tot voltijdhoogleraar in de Regeltechniek.

Sinds 1993 is hij werkzaam als voltijdhoogleraar en leerstoelhouder in de groep Control Systems van de faculteit Electrical Engineering aan de TU/e. In de nieuwe faculteit Biomedische Techniek werd hij tevens benoemd tot deeltijdhoogleraar. Bij Control Systems heeft hij het onderzoek mede gericht op elektronische, elektromechanische, energie en automotieve systemen in samenwerking met de industrie. Samen met stafleden begeleidde hij als promotor een vijftigtal promovendi en vele honderden afstudeerders. Hij doceerde veel verschillende vakken, de laatste jaren vooral in het bacheloronderwijs.

## Colofon

### Productie

Communicatie Expertise  
Centrum TU/e

### Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

### Ontwerp

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

### Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-3441-8  
NUR 992

Digitale versie:  
[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)

**Bezoekadres**

Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

**Postadres**

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11  
[www.tue.nl](http://www.tue.nl)



Technische Universiteit  
**Eindhoven**  
University of Technology