

Onzekerheid als opgave

Eykhoff, Pieter

Gepubliceerd: 01/01/1965

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.

ONZEKERHEID
ALS OPGAVE

DR. IR. P. EYKHOFF

ONZEKERHEID ALS OPGAVE

REDE
UITGESPROKEN BIJ DE
AANVAARDING VAN HET AMBT VAN
GEWOON HOOGLERAAR IN DE ELEKTROTECHNIEK
AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL
TE EINDHOVEN
OP VRIJDAG 9 APRIL 1965
DOOR
DR. IR. P. EYKHOFF

*Mijne heren curatoren, mijne heren leden van de senaat,
Dames en heren, leden van de wetenschappelijke staf,
Dames en heren van de technische en administratieve staf,
Dames en heren studenten, en voorts
Gij allen die door Uw aanwezigheid blijk geeft van Uw belangstelling,*

Zeer gewaardeerde toeboorders,

De traditie van de inaugurele rede bij ons wetenschappelijk onderwijs kan wellicht in verband worden gebracht met de gebruiken aan de universiteiten in de middeleeuwen. Bij het ontvangen van de magistersbaret als teken van de opneming in de kring van docerenden, hield de nieuweling een formele inaugurele lezing, waarna hij verwelkomd werd in de gemeenschap van zijn collega's.

Voor een technicus, levend in de twintigste eeuw, is zo'n mogelijke, traditionele band over een tijdvak van 800 jaren wat verwarrend. Door de uiterst snelle ontwikkeling van de natuur- en technische wetenschappen is hij te zeer in beslag genomen door het element van verandering. Veelal heeft hij te rekenen met een periode van slechts enkele jaren tussen het tijdstip waarop een fundamentele ontdekking wordt gedaan en het ogenblik waarop deze ontdekking resulteert in een zeer belangrijke industriële toepassing. De ontwikkeling van de transistor en andere halfgeleider-elementen in de elektrotechniek kan hierbij als voorbeeld dienen. Het is niet meer de snelheid van de ontwikkeling waarmee hij te maken heeft, maar de snelheid waarmee die snelheid zelf verandert: – the rate of the rate of change. Er is een grote spanning tussen het historisch perspectief en de huidige snelheid van verandering. Ik wil U niet verhelen dat deze gedachte het moeilijk maakte om uit de veelheid van mogelijkheden een geschikt onderwerp te kiezen voor de overdenkingen van hedenmiddag.

Bij deze openbare aanvaarding van mijn opdracht om onderwijs te geven in de meet- en regeltechniek alsmede de informatietheorie zouden we bijvoorbeeld kunnen nagaan hoe de regeltechniek zich heeft ontwikkeld in de historie. Via eenvoudige voorbeelden uit het verleden zou ik U dan kunnen voeren langs een aantal moderne, spectaculaire toepassingen van de regeltheorie. Deze toepassingen kunnen we vinden op een groot aantal terreinen waaronder de automatische beheersing van industriële processen, de lucht- en ruimtevaart, de hulpapparatuur ten behoeve van medische diagnoses en operaties, het instrumentarium voor wetenschappelijke onderzoeken, om slechts enkele mogelijkheden uit de zeer grote verscheidenheid te noemen.

Ook zou ik kunnen trachten U een beeld te schilderen dat, in bonte mengeling, een aantal spectaculaire facetten van de automatisering omvat. Het intensieve gebruik van metingen en terugkoppelingen kan dit onderwerp rechtvaardigen. Daarbij is het een niet-te-onderschatten voordeel dat wij allen bij tijd en wijle ons verstandelijk met de maatschappelijke invloed van de automatisering bezig houden, of ons er emotioneel bij betrokken weten. Om dicht bij de hogeschool te blijven: wat dunkt U bijvoorbeeld van de invloed van automatisering op het (technisch-)wetenschappelijk onderwijs door de introductie van onderwijsmachines en geprogrammeerde instructie?

Een derde mogelijkheid is meer filosofisch te werk te gaan en ons af te vragen hoe, op welke wijze en in welke mate, het natuur- en technisch-wetenschappelijk onderzoek gepaard gaat met de introductie van nieuwe begrippen of met het geven van een nieuwe inhoud aan reeds lang gebruikte woorden. Naast de ontwikkeling van het begrip energie kunnen we beschouwen hoe in de zeer recente tijd het begrip informatiehoeveelheid is ontstaan en hoe dit een rol speelt in de theorie van de informatieverwerking, de informatieoverbrenging en de regeltechniek. De steeds toenemende moeilijkheid om een brug te slaan tussen nieuwe, geavanceerde begrippen enerzijds en ervaringen in ons alledaagse leven anderzijds, vormt ongetwijfeld een probleem. Vele nieuwe begrippen zijn nauwelijks te beschrijven in de uitdrukkingsmiddelen van de dagelijkse omgangstaal. Dit probleem heeft niet alleen wetenschappelijke en educatieve aspecten, maar in wijder verband raakt het ook de verantwoordelijkheid van de natuuronderzoeker en de technicus: verantwoordelijkheid ten aanzien van voorlichting van het grote publiek en ten aanzien van het gebruik of misbruik dat gemaakt wordt van zijn scheppingen.

In de vierde plaats zou ik met U kunnen nagaan op welke wijze het arsenaal van wiskundige kennis en technieken van de beoefenaren der regel- en informatietheorie zich in het jongste verleden heeft ontwikkeld en ook thans nog in volle ontwikkeling is. Deze uitbreiding van toepasbare wiskundige technieken is uiteraard van grote invloed op het technisch-wetenschappelijk onderwijs en op de groeiende noodzaak van „post-academic study”. Indien wij voor het technisch-wetenschappelijk onderwijs als doel stellen dat het aan de maatschappij mensen aflevert die „. . . . door wetenschappelijke grondslag van hun studie hun gehele leven in staat zullen zijn de vooruitgang van kennen en kunnen op hun vakgebied uit de literatuur te blijven volgen” dan is het moeilijk om de zwaarte van de opdracht aan dit onderwijs te overschatten.

Ondanks het belang en de aantrekkelijkheid van de onderwerpen die zojuist werden aangeduid, geef ik er toch de voorkeur aan om hedenmiddag de aandacht te bepalen tot één zeer wezenlijk begrip dat in de meet- en regeltechniek zowel als in de informatietheorie een essentiële rol speelt. Onder het motto „*Onzekerheid als opgave*” wil ik trachten aan te geven dat enerzijds onzekerheid een motief kan zijn voor technisch handelen en dat anderzijds ons technisch handelen een dankbaar gebruik kan maken van onzekerheid. Zodoende hoop ik op eenvoudige wijze iets te kunnen aanduiden van de sfeer van het onderwijs en onderzoek waartoe ik geroepen ben.

Van oudsher heeft de mens onvrede gehad met het gebrek aan zekerheid waarvoor zijn fysieke omgeving hem stelde. Terwille van zijn voedselvoorziening door middel van de landbouw hebben in oude culturen waarnemingen van de sterrenhemel moeten dienen om bijvoorbeeld regenperioden en periodieke overstromingen te voorspellen. Het gebruik van waarnemingen tezamen met ervaring ten behoeve van predictie, het voorspellen van een gebeurtenis, is dus alles behalve modern. In zekere zin geldt dit ook voor de cyclus observeren – ingrijpen – opnieuw observeren – zonodig weer ingrijpen enzovoort, zij het dan ook dat de technische middelen voor dit ingrijpen-zich vooral in de recente historie buitengewoon ontwikkeld hebben.

Geleid door de wens om te weten en om de onzekerheden in zijn bestaan te verminderen heeft de mensheid een indrukwekkend gebouw van natuur- en technische wetenschappen opgebouwd. Bekijken we

dit gebouw met enige aandacht dan kan het niet anders of we komen onder de indruk van de belangrijke functie die het getal, het kwantitatieve aspect vervult. Reeds meer dan 23 eeuwen geleden is Plato vanuit zijn overpeinzingen over het wezen der dingen gekomen tot een uitspraak over het belang van het getal. In de betrekkingen tussen getallen ligt de sleutel tot het gehele mysterie van de natuur. . .

Desondanks heeft het zeer lang geduurd aler dit kwantitatieve aspect los kwam uit de filosofische sfeer en aanleiding gaf tot metingen en waarnemingen waarop de huidige natuur- en technische wetenschappen zijn gebaseerd.

Op grond van waarnemingen vormt de onderzoeker zich een fysisch inzicht in het probleem dat hij bestudeert en vanuit dat inzicht tracht hij een theorie te formuleren. Deze theorie moet een model zijn voor een deel van de fysische werkelijkheid. Geleid door dit model worden nieuwe experimenten ontworpen. De resultaten van deze experimenten zullen de theorie bevestigen, een verandering noodzakelijk maken of ze kunnen zelfs de theorie verwerpen. Al is de theorie nog zo fraai en bevredigend voor het intellect, het zijn ten slotte de experimentele resultaten die in deze interactie van theorie en experiment domineren. We mogen dus stellen dat de waarneming en het experiment, alsmede het uitdrukken van het resultaat in getalwaarden, zeer wezenlijke bestanddelen van de natuurwetenschappen vormen. Spreken we van waarnemingen, dan houdt dit meestal in dat we de omstandigheden niet in de hand hebben, zoals bijvoorbeeld in de astronomie.

Het uitvoeren van een experiment betekent in de meerderheid van de gevallen dat een aantal belangrijke condities ten aanzien van de omgeving wèl beheerst en geregeld kunnen worden. Daaruit volgt dat het experiment steeds opnieuw uitgevoerd kan worden. De numerieke resultaten ervan zullen overeenstemmen met de theorie indien deze juist is en indien de onvermijdelijke storingen in aanmerking zijn genomen. De storingen vertolken als het ware de onnauwkeurigheid, de *onzekerheid* in de uitkomst van het experiment als gevolg van de omstandigheden die niet in de hand gehouden kunnen worden of die eventueel nog niet vallen onder de beschrijving door de theorie. Deze bijkomstige effecten kunnen kwantitatief worden beschreven met behulp van de statistiek. Sinds het midden van de 19de eeuw is door de natuurkundigen in toenemende mate ook een beroep gedaan op de waarschijnlijkheidsrekening en de statistiek voor de beschrijving van fundamentele fysische relaties. In dit verband kunnen worden ge-

noemd: de afleiding van de gaswetten uit de snelheidsverdeling van moleculen door Maxwell omstreeks 1860; het werk van Boltzmann van omstreeks 1877 waardoor de niet-omkeerbaarheid van thermische processen in verband gebracht wordt met de energie-distributies van moleculen; het werk van Planck, omstreeks 1900, op het gebied van de quantumtheorie. Een belangrijk deel van de natuurkunde is daarmee doordrongen van numerieke relaties gebaseerd op waarschijnlijkheids-overwegingen. In onze eeuw is zelfs de fundamentele onbepaaldheid in het meten kwantitatief vastgelegd door de relatie van Heisenberg. Wellicht is met dit numeriek vastleggen van onze onzekerheid het genoemde belang van het getal tot een grens genaderd

In het licht van deze ontwikkeling in de fysica is het wat merkwaardig dat in de techniek de toepassing van de waarschijnlijkheidstheorie eerst omstreeks de jaren '40 veld heeft gewonnen. Tot dat tijdstip waren technische toepassingen van deze theorie voornamelijk beperkt tot de evaluatie van steekproeven en tot beschouwingen over telefooncentrales en wachttijdproblemen. Vooral onder invloed van het werk van Kolmogorov, Wiener, Shannon en anderen is echter in de laatste decennia ook in de techniek de probabalistische beschouwingswijze zeer op de voorgrond getreden.

Thans zou ik enkele *technische* situaties de revue willen laten passeren waarin de onzekerheid een belangrijke rol speelt. Een van de meest elementaire is wel die waarin we te maken hebben met „ruisachtige” signalen. Deze signalen krijgen in het vakjargon het adjectief stochastisch mee. Via het Grieks *στοχαστις* ligt hieraan „gissing” ten grondslag. Zulke stochastische signalen onttrekken zich door hun wisselvallig karakter aan een gedetailleerde mathematische beschrijving. Zelfs indien we een dergelijk signaal over een groot tijdinterval geregistreerd hebben, dan zal het praktisch nog niet mogelijk zijn om een mathematische uitdrukking te vinden die op elk tijdstip de waarde van dat signaal beschrijft. Dit in tegenstelling tot de zogenaamde deterministische signalen, grootheden die op elk moment van de tijd ondubbelzinnig uit een mathematische uitdrukking volgen en waarvan de sinusfunctie technisch wel het meest interessante voorbeeld is. Van deze golflijn is de gehele historie op eenvoudige wijze te beschrijven en ook ten aanzien van de ontwikkeling van deze functie in de toekomst treedt geen enkele onzekerheid op.

Zoals immer in de natuur- en technische wetenschappen is een goed begin, dat wil zeggen een goede vraagstelling, het halve werk. Slechts wanneer wij afzien van een poging om de waarde van een stochastisch signaal op elk ogenblik te beschrijven, verkrijgt men zinvolle antwoorden die ook nog technisch bruikbaar zijn. Voor zulk een aangepaste beschrijving van stochastische signalen vrage men dus niet naar de grootte van zo'n signaal op een bepaald tijdstip, maar naar de waarschijnlijkheid dat deze grootte tussen twee waarden in ligt. Deze *onzekerheid* in de beschrijving moeten we dan maar voor lief nemen. Willen we meer gedetailleerde informatie hebben, dan zoeken we dat niet in de kennis omtrent de grootte van het signaal op een bepaald ogenblik, maar in de relatie tussen de waarschijnlijkheden van de grootte op het ene ogenblik en de grootte op een eerder of een later tijdstip. Hebben we eenmaal een dergelijke beschrijving van een signaal, dan blijkt het zelfs mogelijk te zijn om over het verloop van dat signaal in de naaste toekomst voorspellingen te doen zij het ook . . . met onzekerheid; een onzekerheid die toeneemt naarmate we verder in de toekomst trachten te voorspellen.

U vraagt, waarde toehoorder, waarom we ons moeite geven om deze kennelijk ongrijpbare stochastische signalen toch zo goed mogelijk te grijpen? Laat mij U verzekeren dat vele nuttige en vele storende verschijnselen in de techniek een stochastisch karakter hebben.

Ten aanzien van storingen kunnen we denken aan de ruis die onder meer optreedt in elektronische schakelingen als gevolg van de warmtebeweging van de elektronen en ten gevolge van het kwantum karakter van de elektrische stroom in de elektronenbuizen en transistoren. Deze storende verschijnselen zijn een afspiegeling van het stochastisch karakter van fysische wetten. Ze stellen onder meer een grens aan de technisch-zinvolle of technisch-realiseerbare versterking.

Niet alleen deze onnuttige verschijnselen maar ook de signalen die voor ons nuttige informatie bevatten, hebben principieel een element van *onzekerheid* in zich. Zal deze onzekerheid er niet zijn, zal er géén element van verrassing inzitten, dan levert de ontvangst van zo'n signaal ons geen nieuwe informatie omdat we het immers van te voren konden voorspellen. Hiermede raken we al aan de informatietheorie, die ons een middel verschaft om in kwantitatieve zin over informatie te spreken. We gaan thans voorbij aan de wijze waarop deze informatie-maat geïntroduceerd wordt, maar mede aan de hand van de voorgaande beschouwing zal het wellicht duidelijk zijn dat, hoe

minder we een signaal van te voren kunnen voorspellen, des te meer informatie ermee overgebracht kan worden. A priori-onzekerheid is de quintessens van communicatie.

Of de informatie die in een signaal besloten ligt nuttig is of niet, hangt af van de situatie en het gezichtspunt. De stem uit een luidspreker op een stationsperron kan nuttige informatie overbrengen, maar een dienstmededeling is voor ons niet-relevant en fungeert alleen als stoorsignaal indien we op dat perron een gesprek trachten te voeren; de ruis uit de interstellaire ruimte fungeert als storing bij de telecommunicatie, maar voor de radioastronoom is hij de drager van de informatie die van belang is.

In een groot aantal technische situaties zullen we moeten trachten de nuttige en de storende signalen zo goed mogelijk te scheiden. Dat kan worden bereikt met behulp van filters; filters die ontworpen worden door gebruik te maken van de a priori-kennis omtrent deze beide signalen: het nuttige en het storende signaal.

Uit deze opmerkingen zult U, waarde toehoorders, reeds een probleem hebben herkend. We zagen immers dat a priori-onzekerheid de quintessens van communicatie is. Nu wordt gesteld dat a priori-kennis nodig is om zo goed mogelijk een nuttig signaal van een storend signaal te ontdoen. Wilt U een illustratie hiervan dan gebruiken we als signaal weer de eerder genoemde sinusfunctie, waarbij we nu ruis als storing laten optreden. Door de grote a priori-kennis omtrent de sinusfunctie kunnen we met behulp van filters deze heel goed ontdoen van de ruis. Helaas we kunnen er echter geen informatie mee overdragen omdat elke onzekerheid ontbreekt. Gaan we de sinusfunctie zodanig wijzigen dat er met dat signaal wel informatie kan worden overgebracht (modulatie) dan zullen de mogelijkheden voor het filteren weer slechter worden.

De scheiding van nuttige en storende signalen geeft aanleiding tot interessante theoretische problemen en praktische oplossingen. Al naar de omstandigheden spreken we van optimaal filteren en van optimale signaal-detectie. Ook patroon-herkenning is daarmee nauw verwant. We gaan hier niet nader in op deze aspecten doch we volstaan met een niet-technisch voorbeeld.

Heeft U zich wel eens gerealiseerd welk een filter-theoretische prestatie wordt geleverd door een moeder die onmiddellijk reageert op een enkel kreetje uit de kinderkamer, ondanks de symfonie waar ze tot op dat ogenblik naar luisterde?

Tot dusverre hebben we alleen signalen beschouwd en de onzekerheid die optreedt in de beschrijving van die signalen. Laten we nu eens onze aandacht richten op de invloed van storende signalen die op een systeem inwerken. We kunnen verwijzen naar een grote verscheidenheid van technische en niet-technische situaties waarin deze beïnvloeding voorkomt. Een voorbeeld dat gemakkelijk aanspreekt, is wellicht dat van een rijdende auto die onderhevig is aan sterke windstoten in dwarsrichting. Als gevolg van de *onzekerheid* ten aanzien van het tijdstip waarop een windstoot optreedt en ten aanzien van zijn sterkte kunnen we niet voorspellenderwijs maatregelen nemen. Neen, slechts wanneer de invloed zich reeds doet merken als een afwijking van de gewenste baan, kunnen we op effectieve wijze ingrijpen. Op grond van onze waarnemingen zullen we corrigerend optreden om zo goed mogelijk ons doel, het rijden van een bepaalde baan, te bereiken. Dit samenspel tussen mens en auto kan worden opgevat als een zogenaamd teruggekoppeld proces. In technische termen is het ingangssignaal voor dit proces de gewenste positie en richting voor het volgen van een bepaalde baan; het uitgangssignaal is de werkelijke positie en richting van het voertuig. De bestuurder zal de gewenste en de werkelijke grootheden met elkaar vergelijken, met andere woorden het ingangs- en uitgangssignaal met elkaar in verband brengen, en op grond van deze informatie bijsturen. Dit is de essentie van terugkoppeling: dat continu of intermitterend het resultaat vergeleken wordt met het doel en dat er op grond van die vergelijking wordt ingegrepen.

We zouden zeer veel technische voorbeelden van zo'n teruggekoppeld systeem kunnen geven. Als een vrij willekeurige selectie noemen we: de regeling van de grootte en de frequentie van de spanning die wordt opgewekt in een elektriciteitscentrale en waarbij de storingen worden gevormd door de veranderingen in het door de gebruikers gevraagde vermogen; het regelmechanisme van een radiotelescoop dat zorgt voor een juiste oriëntering van het gevaarte ondanks windstoten en andere weersinvloeden; de stabilisatie van een passagiersschip met behulp van beweegbare vinnen; vele toepassingen waarbij temperatuur, druk of een andere fysische grootheid moet worden geregeld ondanks storingen van buitenaf. Deze laatste categorie toepassingen vertoont een bijzonder breed spectrum dat zich uitstrekt van de eenvoudige thermostaat van het strijkijzer of de centrale verwarming tot aan gecompliceerde industriële systemen. Naast deze technische zijn er nog een groot aantal biologische voorbeelden aan te wijzen,

waarvan de oogpupil-responsie op invallend licht wel een van de duidelijkste is. Ook aan de sociologie en economie kunnen voorbeelden worden ontleend.

Dit is uiteraard niet de plaats en tijd om in te gaan op de theoretische aspecten en problemen die zich bij het aanbrengen van terugkoppeling kunnen voordoen. Het moge voldoende zijn te vermelden dat er instabiliteit kan optreden indien de terugvoer van informatie van uitgang naar ingang niet op de juiste wijze en in de juiste mate geschiedt. De autobestuurder verschaft U daarvan een voorbeeld indien hij sterk overcompenseert en daardoor met zijn voertuig over de baan slingert. Het was slechts de bedoeling tot uitdrukking te brengen dat terugkoppeling gebruikt kan worden ter vermindering van de onzekerheid, die veroorzaakt wordt door niet-te-voorspellen storingssignalen op een systeem.

U vraagt, waarde toehoorders, in welke mate de onzekerheid van het hier beschouwde type kan worden beperkt? Welnu, in de praktijk blijkt vaak geen onbeperkte reductie mogelijk te zijn. Bij het ontwerpen van een teruggekoppeld systeem moet immers rekening worden gehouden met de reeds genoemde kans op instabiliteit en met andere technische en economische eisen die aan dat systeem worden gesteld. Daarbij brengt de aard van de storende signalen met zich mede, dat het niet zinvol is de kwaliteit van het ontworpen systeem te beoordelen aan de hand van één specifiek voorbeeld van een storend signaal; wegens de meergenoemde onzekerheid zal voor het optimale ontwerp rekening moeten worden gehouden met een groot aantal verschillende signalen. In technische termen: het ontwerp moet optimaal zijn in de zin van een minimale fout over een ensemble, een verzameling, van situaties.

We hebben nu aandacht geschonken aan de onzekerheid in stochastische signalen en aan de onzekerheid die dergelijke signalen oproepen als ze inwerken op een systeem.

Een derde soort onzekerheid ontmoeten we daar, waar de eigenschappen, karakteristieken of parameters van een technisch systeem zelf op onvoorziene wijze kunnen veranderen.

Om aan deze ongewisheid het hoofd te bieden maakt men eveneens een dankbaar gebruik van terugkoppeling, dus van het vergelijken van informatie over het resultaat van een ingreep met de informatie over het gestelde doel. Wilt U wederom een voorbeeld ontleend aan het verkeer, dan kunt U denken aan een auto op een golvende weg die

we met een constante, bijvoorbeeld de maximaal-toegelaten, snelheid willen laten rijden.

Vanuit een bepaald gezichtspunt kunnen we aan het systeem auto-plus-weg variërende eigenschappen toekennen; de relatie tussen de snelheid en de stand van de gaspedaal zal niet constant blijven.

In technische termen is het ingangssignaal voor dit systeem de gewenste waarde van de snelheid; het uitgangssignaal is de werkelijke waarde van de snelheid, aangegeven door de snelheidsmeter. Op grond van het verschil tussen deze twee grootheden zal de automobilist de stand van de gaspedaal corrigeren. Ook hier hebben we weer dezelfde cyclus van terugkoppeling: observeren - corrigeren - opnieuw observeren enz.

Het voorbeeld is niet fraai. Betere technische voorbeelden zijn te vinden in: elektronische schakelingen waarin onderdelen kunnen verouderen of veranderen met de omgevingstemperatuur en waarin ondanks door terugkoppeling gezorgd kan worden dat de eigenschappen van het gehele systeem goed constant blijven; het regelmechanisme van een radiotelescoop dat zorgt voor een juiste oriëntering ondanks grotere mechanische weerstand bij lage omgevingstemperaturen; industriële processen waarin veroudering of vervuiling optreedt enz.

Wederom kunnen we vragen naar de grenzen waarbinnen het aanbrengen van terugkoppeling een effectief hulpmiddel is voor het bestrijden van de invloed van parametervariëaties. Een nadere beschouwing leert dat hierdoor de onzekerheid in bepaalde parameters die van primair belang zijn, verminderd kan worden, ten koste van een vergrote onzekerheid in minder belangrijke parameters.

In het voorgaande is sprake geweest van onzekerheid in de aard van de signalen die uit de omgeving op een systeem inwerken en van onzekerheid in de eigenschappen van het systeem zelf. Indien deze storende invloeden nu zó groot zijn of van een zodanig karakter dat ze niet meer door een eenvoudige terugkoppeling in voldoende mate kunnen worden verminderd, dan kan men overgaan op nieuwere technieken zoals adaptieve en optimaliserende systemen. De essentie van deze nieuwere concepten ligt hierin, dat door een uitgebreidere instrumentatie méér informatie over het systeem of zijn omgeving wordt verzameld, dat wil zeggen dat *onzekerheid* wordt gereduceerd. Met behulp van deze extra informatie kan het regelcircuit worden aangepast aan de veranderende eigenschappen van het systeem.

Bij een *adaptief* systeem ligt de interesse primair in het dynamische gedrag. Een sprekend voorbeeld is een automobilist die, zodra hij merkt dat door een bejzeld wegdek de eigenschappen van het systeem auto-plus-weg veranderd zijn, zijn wijze van rijden aanpast aan de nieuwe situatie. Een meer technisch getint voorbeeld is dat van een vliegtuig, waarvan de dynamische eigenschappen sterk afhankelijk zijn van vlieghoogte, ijsafzetting, brandstofgewicht en dergelijke. Een adaptief systeem zal ervoor zorgen dat, door automatische veranderingen, het dynamische gedrag van dit vliegtuig zo goed mogelijk onafhankelijk zal zijn van al die wisselende factoren.

Bij een *optimaliserend* systeem gaat primair de aandacht uit naar economisch getinte criteria. Hoe dit economisch optimum gedefinieerd is, zal in sterke mate afhangen van het specifieke probleem. Laten we wederom het autorijden als voorbeeld nemen en stellen dat we zo zuinig mogelijk willen rijden van A naar B. Als de tijdsduur van de rit er niet toe doet, zal op elk moment dié snelheid moeten worden gekozen, die ons het grootste aantal kilometers per liter benzine geeft. Daar deze optimale snelheid afhankelijk is van de windkracht en -richting, het wegdek en de belasting van de auto, is de opgave wezenlijk niet eenvoudig. Dit geldt in een nog veel grotere mate voor de optimaliserende regeling van industriële processen en van een aantal onderling gekoppelde elektrische centrales. Het aantal belangrijke factoren, het aantal meetbare verschijnselen en het aantal te regelen grootheden leidt tot een gecompliceerd probleem. Daarbij blijkt dat ook de formulering van het economisch optimum vaak verre van eenvoudig is.

Wederom is het niet de bedoeling in te gaan op de problematiek van deze systemen. Indien het aspect van de *onzekerheid* over het te regelen systeem en zijn omgeving duidelijk is, dan is dat voor ons doel voldoende. Nogmaals: de essentie van deze nieuwere systemen is het aanbrengen van een uitgebreidere instrumentatie waarmee méér informatie over het systeem of de omgeving kan worden verzameld. Of het inderdaad mogelijk zal zijn die informatie te verkrijgen, hangt uiteraard van de omstandigheden af. Indien we bijvoorbeeld iets te weten willen komen over de parameters die het dynamische gedrag van het systeem bepalen, dan mag dat systeem niet in de rusttoestand verkeren. In zo'n geval kan worden overwogen of het wenselijk is een extra testsignaal te introduceren.

Neemt U maar wéér de automobilist in gedachten die op een rechte weg rijdt en die niet zeker is van de gladheid van de weg. Enige onzekerheid omtrent de eigenschappen van het wegdek kan nu worden weggenomen door deze stationaire toestand kortstondig te verstoren door het heen en weer draaien van het stuurwiel of door het bewegen van de gaspedaal. De waarneming van het gedrag van het voertuig kan iets van de gewenste informatie verschaffen. Hoe groter in dit niet-ongevaarlijke experiment de aangebrachte storing is, des te beter is het mogelijk de onderzochte eigenschappen te bepalen. Waarde toehoorders, wellicht ziet U hierin een inconsequentie. Eerder in dit betoog werd gesproken over het onderdrukken van de invloed van storingen; thans wordt aanbevolen om, zo nodig, opzettelijk een storing aan te brengen. De gedachte die hierachter zit, is uiteraard het afwegen van het effect van twee invloeden: de onzekerheid ten aanzien van de eigenschappen van het systeem en de onzekerheid ten gevolge van de extra storing.

Waar het beste compromis ligt tussen het storend ingrijpen en het lerend observeren, zal afhangen van de beschouwde toepassing: een industrieel proces, een vliegtuig, een biologisch regelmechanisme.

Ik hoop dat het U uit het voorgaande in voldoende mate duidelijk is, dat het thema van dit betoog niet ten onrechte werd gekozen. We zagen dat de mate van onzekerheid in een signaal de mogelijkheid van informatieoverdracht bepaalt. We zagen eveneens dat storende signalen of veranderende eigenschappen van een systeem een onzekerheid kunnen introduceren. De invloed daarvan kan in belangrijke mate gereduceerd worden door terugkoppeling. In gecompliceerdere situaties kan het wenselijk zijn om door een uitgebreidere instrumentatie een systeem te maken met meer mogelijkheden. Al naar de functie maakt men daarbij onderscheid in adaptatie, optimalisering en parameterschatting.

We zien ons geplaatst voor de taak om onzekerheid in het gedrag van technische systemen te bestrijden. Intuïtief zal men inzien dat die bestrijding des te effectiever kan zijn, naarmate er meer a priori-kennis over het systeem en zijn omgeving voorhanden is.

In een bepaalde situatie zou dus het beste resultaat bereikt worden indien alle relevante a priori-informatie is gebruikt bij het ontwerp en de instelling van het systeem?

Dit zou juist zijn, indien economische aspecten buiten beschouwing

konden blijven. In dat geval kunnen met analoge en digitale reken-eenheden systemen worden opgebouwd die het theoretisch maximaal bereikbare zo goed mogelijk benaderen. Omdat echter dit economische aspect in technische situaties ten volle meetelt, zal tenslotte een compromis moeten worden gevonden tussen het theoretisch mogelijke en het economisch verantwoorde.

Met de snelle technologische veranderingen op het gebied van rekenmachines zal dit compromis stellig verschuiven in de richting van een betere benadering van het theoretisch mogelijke.

Bij het zoeken naar het theoretisch mogelijke in een bepaalde situatie kunnen we diverse theorieën te hulp roepen, bijvoorbeeld: de optimum filter- en predictietheorie (Wiener), de communicatietheorie (Shannon), het dynamisch programmeren (Bellman), de „dual-control“-theorie (Fel'dbaum). Voor het vinden van een technisch compromis waarin ook de kosten, de betrouwbaarheid enz. tot hun recht komen, zijn we echter aangewezen op vereenvoudigende benaderingen. Er verschijnt weliswaar een overvloed van publikaties van theoretische aard, desondanks moet er nog veel onderzoek worden gedaan alvorens het verband kan worden aangegeven tussen de mate van vereenvoudiging van het systeem en de achteruitgang van de eigenschappen ten opzichte van de theoretisch bereikbare. Voor het opstellen van zo'n vereenvoudigende, benaderende oplossing van een technisch probleem zal een beroep moeten worden gedaan op de kennis, het inzicht en op het ongrijpbare „ingenieuze“ in de ingenieur.

Op deze wijze zal de ingenieur, die zich zekerheden heeft verworven over de geschetste onzekerheden, een bijdrage kunnen leveren voor toepassingen op een groot aantal terreinen waarvan we in het begin van deze rede al een zeer beperkt aantal noemden: de beheersing van industriële processen, de lucht- en ruimtevaart, hulpapparatuur ten behoeve van medische diagnoses en operaties, instrumentarium voor wetenschappelijke onderzoeken enz.

Zodoende zal die ingenieur een bijdrage kunnen leveren niet alleen tot de *welvaart* in economische zin, maar eveneens tot het meer ethisch-geladen begrip *welzijn*.

Dames en heren,

Bij de officiële aanvaarding van mijn ambt wil ik gaarne mijn dank uitspreken jegens *Hare Majesteit de Koningin* voor Haar besluit mij te benoemen tot hoogleraar aan deze technische hogeschool.

Mijne heren curatoren,

Weest overtuigd van mijn grote erkentelijkheid voor Uw beslissing om mij voor deze nieuwe leerstoel aan de afdeling der elektrotechniek voor te dragen. Ik realiseer mij dat in dit benoemingsvoorstel verwachtingen zijn vertolkt ten aanzien van wetenschappelijk onderzoek en onderwijs, die de inzet van mijn gehele persoon vragen. Het naar vermogen vervullen van die verwachtingen zal mij een vreugde zijn.

Mijne heren leden van de senaat,

Ik reken het tot een eer en een groot voorrecht mij Uw collega te mogen noemen. De aard van de meet- en regeltechniek en de informatietheorie brengt met zich mee dat er contactmogelijkheden zijn ten aanzien van een wijd uiteenlopende verscheidenheid van problemen. Naast ontmoetingen in de senaat en contacten bij het onderwijs zal het me een vreugde zijn om nauwere betrekkingen met een aantal Uwer op te bouwen door gezamenlijke arbeid aan interdisciplinaire problemen.

Mijne heren leden van het wetenschappelijk corps van de afdeling der elektrotechniek,

De afgelopen maanden heb ik reeds een intensief contact met U gehad. Uit dit contact is een gevoel van bewondering gegroeid voor datgene wat U tot dusverre hebt opgebouwd. Daarbij denk ik niet alleen aan het onderwijs en de mogelijkheden voor wetenschappelijk onderzoek, maar evenzeer aan de plezierige, eensgezinde sfeer die ik in Uw afdeling ontmoette. De bijdragen daartoe van wijlen professor Jonker en wijlen professor Knol als wetenschappelijk werker, docent en als mens wil ik daarbij dankbaar in herinnering brengen.

Door de snelle ontwikkeling van de elektrotechniek is de taak van het wetenschappelijk corps verre van eenvoudig. Ik ben me ervan bewust dat deze taak slechts dan op bevredigende wijze verricht kan worden, wanneer dit geschiedt op basis van een goede collegiale samenwerking.

U, *mijne heren hoogleraren*, dank ik voor Uw vertrouwen, dat blijkt uit het initiatief tot het voorstel van mijn benoeming. Ik beschouw het

als een erezaak dit vertrouwen naar vermogen te honoreren. Daarbij zullen Uw adviezen, al dan niet gevraagd, door mij op prijs worden gesteld.

U, *mijne heren wetenschappelijk medewerkers*, wil ik laten weten dat het mij verheugt dat de wet op het wetenschappelijk onderwijs het mogelijk maakt om met de benaming „wetenschappelijk corps” aan te duiden, dat voor het goed functioneren van onderzoek en onderwijs Uw bijdrage ten enenmale onmisbaar is geworden. Ik prijs me gelukkig, dat ik binnen het kader van het technisch-wetenschappelijk onderwijs en in interacademiaal verband heb mogen meedenken over de taakstelling en problemen van de wetenschappelijke staf. Ik wil U de verzekering meegeven dat, naar mijn mening, optimale resultaten van ons werk slechts bereikt kunnen worden indien de eerder genoemde goede collegiale samenwerking inderdaad het gehele wetenschappelijk corps omvat.

Hooggeleerde Mulders, hooggeleerde Rademaker,

Gaarne geef ik uiting van mijn hooggespannen verwachtingen ten aanzien van de samenwerking met U als naaste vakgenoten. De contacten van de afgelopen maanden sterken me in deze verwachtingen. Ik ben er zeker van dat een beroep op Uw inzicht, kennis en ervaring nimmer tevergeefs zal zijn.

Hooggeleerde Huydts, hooggeleerde Breedveld, hooggeleerde Van Soest,

Op zeer verschillende wijze heeft elk van U een wezenlijke bijdrage geleverd tot mijn wetenschappelijke vorming en vorming als mens. Vergun het mij om, zonder thans te trachten deze specifieke bijdragen onder woorden te brengen, U van deze plaats oprecht te danken voor Uw adviezen, Uw vertrouwen en vriendschap.

Mijne heren leden van het Ontmoetingscentrum voor meet- en regeltechniek van de technische hogeschool te Delft,

Bij diverse gelegenheden zijn waarderende woorden gewijd aan Uw samenwerking. Ook ik deel die waardering en ik denk met veel genoegen terug aan de contacten met U. Gaarne spreek ik de wens uit dat er ook in de toekomst vele goede contacten met U zullen zijn.

I would like to use this inaugural address to extend my sincere thanks to the National Academy of Sciences of the U.S.A. The opportunity I had for an extended period of study and research under very favorable

circumstances has contributed very much to my professional characteristics.

Also my greetings and thanks go to the friends at the faculty of the University of California, Berkeley, who offered such a stimulating environment during those years. I want to express my hope that the professional and personal contacts with colleagues in the U.S.A. and in several other parts of the world will not suffer from this my new appointment. It is my sincere hope that such contacts also may contribute to mutual understanding in this our divided world.

Dames en heren van de technische en administratieve staf,

Uw bijdrage tot het functioneren van deze hogeschool kan men zich niet wegdenken. Gaarne reken ik bij voortdoring op Uw advies, hulp en toewijding bij de uitvoering van onze gezamenlijke opdracht.

Dames en heren studenten,

De traditie wil dat in deze slotwoorden Uw plaats de laatste is. Dit is zeer ten onrechte want, naast het wetenschappelijk onderzoek, is het Uw vorming die zin geeft aan ons handelen.

Het thema van deze rede was „Onzekerheid als opgave”. Het is voornog Uw opgave om *zekerheden* op te bouwen, mede door Uw studie; zekerheden in de vorm van technisch-wetenschappelijk inzicht, analytische vaardigheid, intellectuele zelfstandigheid en het vermogen om een nieuw probleem op originele wijze te benaderen. Tezamen met de ontplooiing als mens vraagt dit de inzet van Uw gehele persoonlijkheid. Het vraagt de openheid om zelf ontdekkingen te doen; ontdekkingen die in vele gevallen al generaties her voor de eerste keer werden gedaan, maar die elk van ons tijdens de studie opnieuw moet doen om een zekerheid toe te voegen aan ons arsenaal van kennis en inzicht. Met een woord van Sophocles, in een vertaling van Burgersdijk:

„Door hand'len moet gij 't weten;
want al meent gij 't ook
te weten, weten is 't niet,
zoo de proef ontbreekt”.

Mèt alle andere leden van het wetenschappelijk corps wil ik U bij dit proces gaarne behulpzaam zijn, waar mogelijk door het effenen van het pad en het wijzen op fraaie doorkijkjes in het berglandschap van theorie en experiment. Het zal mij een vreugde zijn om tezamen met een aantal van U in wetenschappelijk spuurwerk te zoeken naar nieuwe zekerheden.

In zijn geschrift „Geschonden wereld” constateert Huizinga, sprekend over de eerste helft van de twintigste eeuw, „ . . . een zeer algemeen verbreid gebrek aan vaste doelstelling in het persoonlijk leven, een tekort aan positieve gerichtheid . . . ”. In weerwil van alle discussies over de studieduur vraag ik mij af of hier niet een veel wezenlijker probleem gesignaleerd wordt, dat mede de studieduur beïnvloedt. In elk geval, dames en heren studenten, zijn het niet alléén zekerheden van technische aard die ons aller aandacht waard zijn.

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Ondanks de onzekerheden die U hedenmiddag zijn voorgeschoteld – weest ervan verzekerd dat Uw aanwezigheid en Uw aandachtig gehoor zeer op prijs gesteld zijn. Ik moge U daarvoor danken.

Ik heb gezegd.