



### **Doelgroep**

*Determinatiegraad van het technisch onderwijs. Studierichtingen: elektriciteit, elektronica, mechanica en elektromechanica.*

*Hoger secundaire afdelingen van het TSO en het BSO.*

*Hoger Secundair onderwijs van het korte en het lange type.*

*MTS en HTS.*

### **Dank**

*Onze dank gaat op de eerste plaats naar de talrijke gebruikers van de handboeken van het technisch fonds "die Keure". Uw enthousiast onthaal en uw opbouwende kritieken waren zoveel aansporingen om op de ingeslagen weg verder te gaan. Bovendien bedanken we de bedrijven Siemens, H & B, Fischer & Porter, Fisher, Eckardt, Yokogawa, ABB-Kent, Foxboro, Rustrak Camflex, Cegelec, Taylor, Krohne, Leeds & Northrup voor hun illustratiemateriaal.*

*Het tekenwerk kwam tot stand door de gewaardeerde medewerking van Jos Nuyes.*

*Graag vermelden wij hierbij nog de uitgever voor de prettige samenwerking en voor de verzorgde uitvoering van dit leerboek.*

*Jef Hay, Maasmechelen*

## PROLOOG

### DE GESLOTEN REGELKRING IN DE EVOLUTIE

Observeren, vergelijken met een gekozen norm, de afwijking corrigeren, weer observeren ... vormt een gesloten denkpijpe die in de evolutie ons gemaakt heeft tot wat we nu zijn.

Meer dan tien miljard jaar geleden ademde Hij de oerknal uit. Energie, fundamentele bouwstenen en krachten werden, met een aantal spelregels, de kosmos ingejaagd. De bouwstenen vormen de talrijke atoomsoorten in spiraalvorm en sterren. Atomen bundelen zich in talrijke combinaties tot moleculen. Grote losgerukte massa's vormen de planeten. Een van deze planeten is de aarde 4,5 miljard jaar geleden.

Aanvankelijk bestaat de aardatmosfeer uit waterdamp, methaan, ammoniak en waterstof. Er was echter weinig leven in de brouwerij en Hij besloot een computerprogramma te schrijven waarin de nodige gegevens verwerkt werden voor het scheppen van nieuwe species. Hij gebruikte hiervoor enkele complexe moleculen als bits, namelijk de basen adenine, cytosine, guanine en thymine, afgekort A, C, G en T. Hij schreef zijn programma in een lange ladder. De stijlen van de ladder werden gevormd door suiker en fosfaat en hielden het geheel aan elkaar. De trappen zijn combinaties van A, C, G en T. Een eerste opdracht in het programma was: copieer jezelf. Het DNA was geboren. Elke opdracht in het programma vormt een geheel, het gen, dat kan overgedragen worden naar de volgende generatie. Om het programma af te scherpen werd het opgenomen in een structuur, de cel genoemd, die zichzelf in stand kan houden door moleculen uit haar omgeving op te nemen.

Gelijke duplicaten maken was een eentonige bedoening. De Programmeur had echter een "randomgenerator" of een foutengenerator voorzien. Bij het maken van kopieën ontstaan afwijkingen in het programma, mutaties, nieuwe genen met andere opdrachten. Drie miljard jaar geleden begint een nieuwe generatie cellen koolstofdioxide te verwerken en zuurstof af te leveren in de atmosfeer. Groepen van cellen ontwikkelen zich tot een enorm aantal variaties in de plantenwereld. Het zag er reeds prachtig uit, maar Hij was nog niet tevreden.

De levende organismen van deze plantenwereld ondergingen de omgeving, maar konden niet ingrijpen. Om de omgeving beter te gebruiken voor het in stand houden van de soort moet men in staat zijn zelfstandig in te grijpen, maar dan moet men die omgeving in eerste instantie kunnen waarnemen. Dus zijn er sensoren nodig en om te kunnen vergelijken met hetgeen men wenst moet een centrale verwerkingseenheid gemaakt worden. Correcties kunnen tenslotte enkel uitgevoerd worden als men kan beschikken over instelorganen.

Heeft Hij af en toe de foutengenerator beïnvloedt zodat de juiste mutaties ontstonden voor een nieuw element in de evolutie : het gesloten regelsysteem?

In ieder geval ontstonden de eerste zenuwstrengen met aan het ene uiteinde een sensor die licht kan waarnemen en aan het andere uiteinde een orgaan dat

een activiteit kan opwekken, met elkaar verbonden door een elektrische transmissielijn. Voor de eerste keer kunnen organismen hun omgeving "zien".

De zintuigen of de sensoren perfectioneren zich. De centrale verwerkingseenheden evolueren tot complexe hersenstructuren. Allerhande ledematen fungeren als instelorganen. Veel biologische functies, zoals het constant houden van de lichaamstemperatuur worden geautomatiseerd. Door mutaties en natuurlijke selectie ontstaan ontelbare levende wezens die allen dezelfde opdracht hebben : de soort in stand houden door te observeren, elke dreiging op de gewenste norm te corrigeren. De gesloten regelkring was de revolutionaire vondst die nieuwe species in staat stelde beter te reageren op de storingen in de omgeving. Diegenen die het best aangepast waren, bleven overleven, de andere stierven uit.

Onder de druk van levensomstandigheden en klimaat gaat 4 miljoen jaar geleden een van de primaten in zuid-oost Africa op zijn achterste poten lopen. Het regelsysteem voor het bewaren van evenwicht perfectioneerde zich. Deze specie had zijn handen vrij om gereedschappen te maken, voeding van ver te halen en te brengen. Sinds hij rechtop ging lopen, tot vandaag, verviervoudigde het hersenvolume. Het strottenhoofd zakte zodat klanken voor communicatie ontstonden. Hij begon zijn omgeving te domineren. De norm levensbehoud stuurde het regelsysteem zoals een automatische piloot.

Vele hominiden zagen het daglicht, verspreidden zich over de wereld en velen stierven uit. Van één soort dragen nu nog alle rassen op aarde een gemeenschappelijk DNA, het mitochondriaal DNA dat enkel doorgegeven kon worden langs de vrouwelijke lijn. Het is terug te vinden tot ongeveer 200.000 jaar geleden in Africa. De eerste mutatie werd dus gedragen door een vrouw, de mitochondriale "Eva" genoemd. Alle andere species verdwenen en werden vervangen door nakomelingen van deze "Eva". Was dit de uiteindelijk best aangepaste soort? Vond Hij deze biologische constitutie voldoende gevorderd voor een nieuwe, deze keer geestelijke dimensie?

In ieder geval ontstonden nieuwe norminstellingen. Deze specie kon abstract denken over verleden, heden en toekomst. Hij legde bloemen op de graven en stelde zich dus vragen over zijn herkomst en het waarom van de dood. Hij begon te genieten van het mooie in de kunst. Deze specie werd "mens" genoemd. Een culturele en technologische periode begint. Geen enkele andere diersoort plukt vandaag de dag een bloemetje als attentie voor zijn soortgenoot of zomaar voor de schoonheid.

Deze mens wordt niet meer gestuurd door een automatische piloot. Hij kan zijn normen zelf kiezen tussen individualisme en solidariteit, tussen egoïsme en sociaal gedrag, tussen goed en kwaad. Er ontstaat een behoefte aan religies om te helpen bij het maken van een keuze. Enkele duizenden jaren geleden ontdekt hij zelf het gesloten regelsysteem en begint het te gebruiken voor de productie van goederen. Het automatisch constant houden van fysische grootheden leidt tot het levenscomfort van vandaag.

Laat ons deze "regeltechniek" eens grondig instuderen

...

**BLOK 7**

**P- EN PI-REGELAAR IN OPEN KRING**

1. Proportionele regelaar	122
2. Procentuele proportionele band	123
3. Verband tussen versterking en proportionele band	124
4. Proportionele regelaar met voorinstelling	125
5. Stapantwoord bij een P-regelaar	126
6. Instelknoppen voor de P-regelactie	127
7. Integrerende regelaar	128
8. Stapantwoord van een I-regelaar	129
9. Formules voor de I-regelaar	130
10. Integratietijd $T_i$	131
11. Integraalvoorstelling van de I-regelaar	132
12. PI-regelaar	133
13. Maatgetal voor de I-actie in een PI-regelaar	134
14. Genormaliseerde formules voor de PI-regelaar	135
15. Samenvatting	136
16. Opdrachten	137

**BLOK 8**

**PD- EN PID-REGELAAR IN OPEN KRING**

1. Snelheid waarmee grootte verandert	142
2. Differentiërende regelaar	143
3. PD-regelaar en stapsprong	144
4. PD-regelaar en lineaire afwijking	145
5. PD-regelaar met voorinstelling voor P-regelaar	146
6. Genormaliseerde formules van PD-regelaar	147
7. PID-regelaar en stapsprong	148
8. PID-regelaar en lineaire afwijking	149
9. PID-regelaar en oscillerende afwijking	149
10. Samenvatting	150
11. Overzicht continue regelaars	152
12. Opdrachten	153

**BLOK 9**

**REGELAAR EN PROCES IN GESLOTEN KRING**

1. Statische instelling van P-regelaar en proces	156
2. Berekening van de statische instelling afwijking	157
3. Dynamische responsies van regelaar-proces	158
4. Wisselwerking van proces en regelaar	159
5. Stapresponsie van P-regelaar en proces	160
6. P-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde	161
7. P-regelaar en proces: storingsantwoord	162
8. I-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde	163
9. I-regelaar en proces: storingsantwoord	164
10. PI-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde	165
11. PI-regelaar en proces: storingsantwoord	166

12. PD-regelaar en proces: storingsantwoord	167
13. PID-regelaar en proces: storingsantwoord	168
14. Praktisch meten van dynamische responsie	169
15. Effect van instelknoppen op systeem	170
16. Opdrachten	171

**BLOK 10**

**OPTIMALISEREN VAN REGELKRINGEN**

1. Oscilleren van regelaar en proces	174
2. Optimaal uitregelen	175
3. Relatie soort regelaar en type proces	176
4. Criteria voor de kwaliteit van het uitregelen	177
5. Instelparameters van regelaar en proces	178
6. Ontleding van opgenomen stapantwoorden	179
7. Instelwaarden en stapantwoorden op een storing	182
8. Opdrachten	183

**BLOK 11**

**INSELREGELS**

1. Instelregels als procesparameters gekend zijn	186
2. Instelregels als procesparameters niet gekend zijn	187
3. Instelregels van niet-zelfregelende processen	188
4. Afregelprocedure van Taylor	189
5. Probeer- en verfijnmethode	190
6. Afregelvoorstellen volgens Leeds & Northrup	191
7. Instelvoorschriften van Foxboro	196
8. Instelvoorschriften volgens Pressler	197
9. Instelvoorschriften volgens Schäfer	198
10. Instelvoorschriften voor processen zonder zelfregeling	199
11. Instelvoorschriften voor processen van hogere orde	200
12. Engelse woordenlijst	201
13. Opdrachten	202

**BLOK 12**

**MEERVOUDIGE REGELKRINGEN**

1. Instrumentatieschema	206
2. Stroomopwaarts- en stroomafwaarts regelen	208
3. Split range-regeling	209
4. Cascaderegelingen	210
5. Verhoudingsregeling of ratio control	214
6. Voorwaartskoppelende regeling	216
7. Feedforward met feedback	218
8. Opdrachten	220
9. Terminologie N - E - D - F	221

**BLOK 13**

**ADDENDUM**

# Inhoud deel 1

## BLOK 1

### HET BEGRIIP REGELEN

1. Het wateruurwerk van Ktesibios	8
2. Niveauregeling van Heron	9
3. Niveauregeling door een persoon	10
4. Eenvoudige centrale verwarming	11
5. Centrale verwarming met vierwegskraan	12
6. Elektronische aan/uit-regeling	13
7. Servosysteem - volgsysteem	14
8. Toerentalregeling met gelijkstroommotor.	15
9. Elektronisch gestuurde temperatuurregeling	16
10. Opdrachten	17

## BLOK 2

### OPBOUW VAN REGELKRINGEN

1. Regelkring met modules	22
2. Blokschema met gestandaardiseerde regelkring	24
3. Functies van een regelkring	25
4. Open en gesloten regelsysteem	26
5. Soorten regelingen	28
6. Tegengesteld werkende regelaars	29
7. Continue-regelaar tegenover aan/uit-regelaar	30
8. Gedrag van regelkringen	31
9. Regelkringen in industriële processen	32
10. Controlezaal	33
11. Internationale benamingen	34
12. Opdrachten	35

## BLOK 3

### TECHNOLOGIE VAN REGELKRINGEN

1. Standaardsignalen	38
2. Soorten standaardwaarden	39
3. Pneumatische regelaar	40
4. Hydraulische regelaar	41
5. Elektronische regelaars	42
6. Meet- en registratiesystemen	46
7. Signaalvormers	48
8. Regelklep	49
9. Corrigerend orgaan	51
10. Klepaandrijvingen	52
11. Soorten kleppen	54
12. Overzicht corrigerende organen	57
13. Opdrachten	58

## BLOK 4

### SENSOREN IN REGELKRINGEN

1. Indeling van sensoren	60
2. Temperatuursensoren	61
3. Verplaatsingssensoren	64
4. Druksensoren	69
5. Debietsensoren	71
6. Niveausensoren	75
7. Overzicht van sensoren	79
8. Meetzenders of transmitters	80
9. Opdrachten	82

## BLOK 5

### EIGENSCHAPPEN VAN PROCESSEN

1. Statisch gedrag van een proces	84
2. Standaardwaarde	86
3. Dynamisch onderzoek van een proces	87
4. Zelfregelende en niet-zelfregelende processen	88
5. Proces met dode tijd	89
6. Stapresponsie van nulde-orde-proces	90
7. Stapresponsie van eerste-orde-proces	92
8. Stapresponsie van tweede- en hogere-orde-proces	94
9. Orde van grootte van dode tijden en tijdconstanten	95
10. Stapresponsie met oscillerend karakter	96
11. Stapresponsie van niet-zelfregelend proces	97
12. Opnemen van stapantwoord van een proces	99
13. Regelbaarheid van processen	100
14. Aanpassen van regelaar aan proces	101
15. Opdrachten	102
16. Procesgrootheden en hun eenheden	104

## BLOK 6

### AAN/UIT-REGELKRINGEN

1. Aan/uit-regelkring met bimetaal	106
2. Drukregeling in waterleiding	107
3. Niveauregeling in opslagtank	108
4. Drukregeling in vat van luchtcompressor	109
5. Spanningsregeling in een auto	110
6. Elektronische aan/uit-regelaar	111
7. Aan/uit-regelaar bij eerste-orde-proces	112
8. Amplitude en periode bij aan/uit-regeling	113
9. Belang van hysteresis	114
10. Aan/uit-regelaar met hysteresis	115
11. Aan/uit-regelaar met hysteresis + eerste-orde-proces met dode tijd	116
12. Amplitude en periode bij aan/uit-regelaar met hysteresis + eerste-orde-pr. met dode tijd	117
13. Aan/uit-regelaar bij proces van hogere orde	118
14. Vergelijking aan/uit-regelaar met proportionele regelaar	119
15. Opdrachten	120

Enkel voor klasgebruik.