

# OP SPEURTOCHT NAAR PROCESSEN

## Vroege Geschiedenis van de Cybernetica

door

Prof. Dr. A. A. Verveen\*

Fysiologen onderzoeken organismen: structuren, die zichzelf reproduceren, groeien, zichzelf repareren, verstorende invloeden compenseren en zich verdedigen;

die voedingsstoffen en gegevens uit hun omgeving opnemen en verwerken en die op hun omgeving inwerken op wijzen, die wij doelgericht kunnen noemen;

kortom, organisaties, die een relatief grote mate van stabiliteit vertonen, zowel in een in verandering zijnde omgeving als tijdens eigen activiteit.

De grote ingewikkeldheid in bouw en in werking van biologische organismen en hun relaties tot vergelijkbare structuren, waardoor zij deel zijn van weer meer ingewikkelde organisaties, onderscheidt hen van de klassieke onderwerpen van onderzoek in de fysica en in de chemie. Overeenkomst is er met de, zij het nog relatief eenvoudige, automaten en met de mens-machine systemen<sup>1</sup> in de technische wetenschappen, waartoe ook de geneeskunde kan worden gerekend.

Deze voordracht is gewijd aan de nog grotendeels ongeschreven geschiedenis van de systeemleer en haar betekenis voor de fysiologie, te beginnen met de oudste tak van wetenschap, de techniek en wel in haar nog voor-bewuste vorm. Rathenau stelt dit heel duidelijk (citaat uit Schmidt, 1954, p. 119):

„Mechanisierung ist nicht aus freier, bewusster Vereinbarung . . . entstanden, sondern unbeabsichtigt, ja unbemerkt erwachsen . . . ein unwillkürlicher Prozess, ein dumfer Naturvorgang.”

Het gebruik van werktuigen is voor de fysioloog van belang, omdat processen die zich in het organisme afspelen, daarbij in mindere of meerdere mate via structuren in de buitenwereld verlopen en daardoor voor ons zichtbaar worden.

\*Deze voordracht die op 6 januari 1969 te Den Haag voor de Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde „DILIGENTIA” werd gehouden is een bewerking van de rede bij de aanvaarding van het ordinariaat in de fysiologie aan de faculteit der Geneeskunde van de Rijksuniversiteit te Leiden op 23 februari 1968.

Werktuigengebruik komt in de dierenwereld bij enkele zeer verschillende soorten voor. Zo stampet de graafwesp *Ammophila* met een steentje het zand over haar nest aan. Darwin's spechtvink *Cactospiza* haalt met behulp van een takje insecten uit spleten.

Onze naaste neven, de chimpansees, maken in tegenstelling tot de eerder genoemde dieren een bijzonder gevarieerd gebruik van werktuigen. Jane Goodall nam waar, dat ze met stenen naar belagers gooien, gekauwde bladeren als sponzen gebruiken om water uit diepe poeltjes te halen, van takjes de bladeren afstropen en zich er dan mee krabben, en met reeds vóór het termietenseizoen zorgvuldig klaargemaakte twijgjes, termieten uit hun hopen halen. Uit Kortlandt's studies van in savannen levende chimpansees blijkt, dat deze dieren knotsen maken, die ze gebruiken in de strijd tegen grotere roofdieren. In hoeverre het gebruik van de hefboom, de oermachine, door deze dieren zelf is uitgevonden, dan wel door hun voorouders van de onze is afgekeken, is nog een open vraag. De grote variatie pleit voor hun originaliteit. Van een Japanse aap is het echter bekend, dat deze de gewoonte voedsel voor de maaltijd te wassen, van de mensen had overgenomen. Een gewoonte, die zich na verloop van tijd niet meer beperkte tot de bij het desbetreffende dorp levende kolonie, maar zich over heel Japan onder deze apen verspreidde.

Het maken en gebruiken van werktuigen door mensachtigen en mensen maakte reeds in prehistorische tijden een opmerkelijke ontwikkeling door, die culmineerde in de produktie van stenen werktuigen in de neolithische culturen van Amrat en Gerze in Egypte kort voor de Eerste Dynastie (Hawkes, 1963, p. 237 en 324). Meer gecompliceerde machines zoals de speerwerper-en-speer en de pijl-en-boog dateren reeds uit het Jong-Palaeolithicum (Forde, 1954, p. 161; Hawkes, l.c., p. 145). Wij kunnen deze beschouwen als de oudste in-één-open-keten-werkende machines. Eenvoudige automaten, die niet door de mens op gang werden gebracht, zijn ook al heel oud. De dierenval dateert mogelijk uit het begin van het Neolithicum (Forde, l.c., p. 168; Hawkes, l.c., p. 158). Deze verschilt niet essentieel van onze muizenval, waar de muis een stukje kaas van de trekker haalt, die daardoor losschiet, waardoor een deurtje achter de muis dichtklapt of een dodende balk op het dier valt.

Nadat de mens omstreeks 5000 v. C. externe krachtbronnen leerde gebruiken om zich voort te bewegen — met behulp van het zeilschip (op de Euphrates, cultuur van al'Ubaid, Hawkes, l.c., p. 328) of het door dieren of slaven getrokken voertuig — werd hij zich het stuurproces bewust en gaf het een naam. Het is in dit verband opvallend, dat onze woorden *sturen* en *storen*, die op hetzelfde proces betrekking hebben, beide afkomstig zijn van dezelfde oud-germaanse stam *steu* (cf. De Vries, 1958).

In Griekenland ontwikkelde zich na de veroveringen van Alexander de Grote (334-323 v. C.) binnen het korte tijdsbestek van enkele eeuwen een bloeiende techniek. Deze techniek, die mogelijk is geïnspireerd door het vele dat de Grieken op hun tochten zagen, vond zijn hoogtepunt in de Grieks-Alexandrijnse School, die omstreeks 300 v. C. door Ptolemaeus I was opgericht. De in Hero's *Encyclopedie* (100) vermelde automatische tempeldeur-opener (fig. 1) is beroemd, evenals de daarin

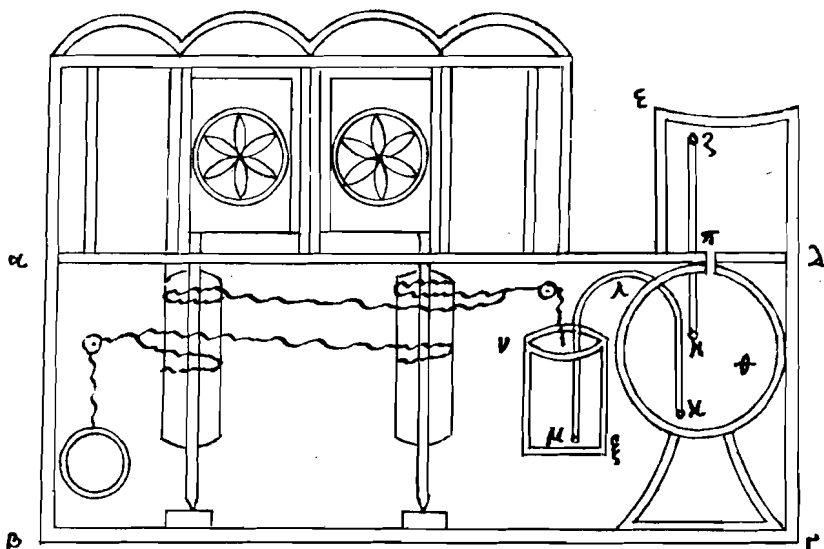


Fig. 1 Hero's automatische tempeldeur-opener

Wanneer het vuur op het rechts boven afgebeelde altaar werd ontstoken, verwarmde dit de lucht in het altaar. Deze warme lucht dreef het (niet getekende) water uit het vat in de emmer  $\mu$ , die daardoor zakke. De touwen rond de assen van de tempeldeuren ontrolden zich dan, waardoor de deuren open gingen. Hierbij werden de touwen, die aan het links onder afgebeelde gewicht zaten, rond de assen van de deuren gewonden. Was het vuur op het altaar uitgebrand, dan koelde de lucht erin af. Het water werd dan uit de emmer in het vat gezogen en de deuren sloten zich.

(Met toestemming van de Bibliotheecaris der Rijksuniversiteit te Leiden overgenomen uit het Handschrift *M.S. Scal. 45*, fol. 37v)

beschreven wijwater-automaat, die na het inwerpen van een muntstuk van vijf drachmen een afgemeten hoeveelheid wijwater over de handen van de tempelbezoekers deed stromen (*M. S. Scal. 45*, Leiden, fol. 27r; Schmidt, 1899, p. 113). Onze koffie-automaat heeft een respectabele leeftijd. Uit de beschrijvingen in Hero's *Encyclopedie* valt af te leiden, dat de meeste apparaten werden gebruikt om eenvoudige liederen, die de tempels bezochten, te imponeren of dienden tot het genoegen van de zeer rijken.

In Europa raakten deze technieken in het vergeetboek door de a-technische instelling van Rome (zowel tijdens als na het Romeinse Keizerrijk). Bagdad nam de functie van Alexandrië over en bereikte het hoogtepunt onder de bekende Kalief Harûn-al-Rashid (786-809). De prestaties van de Grieken bleven voor een groot deel behouden, dank zij Perzische en later Arabische vertalingen van Griekse manuscripten (Millas-Vallicrosa, 1963). De magiërs uit Europa danken hun roem naast hun kennis van de kruidenkunde misschien wel voornamelijk aan deze technieken, die incidenteel vanuit het Oosten en uit Spanje het christelijke Europa binnen kwamen.

In de *Encyclopedie* van Hero en in de werken van Philon van Byzantium (3e-2e eeuw v. C.) zijn naast beschrijvingen van eenvoudige automaten ook volledig ontwikkelde zelf-werkzame automaten te vinden (Rademaker, 1960): tegengekoppelde systemen, die het water- of wijnniveau in bekkens (fig. 2) of het olieniveau in lampen (Philon: cf. Schmidt l.c., p. 488) op peil hielden. De *regeltechniek* is dus heel oud.

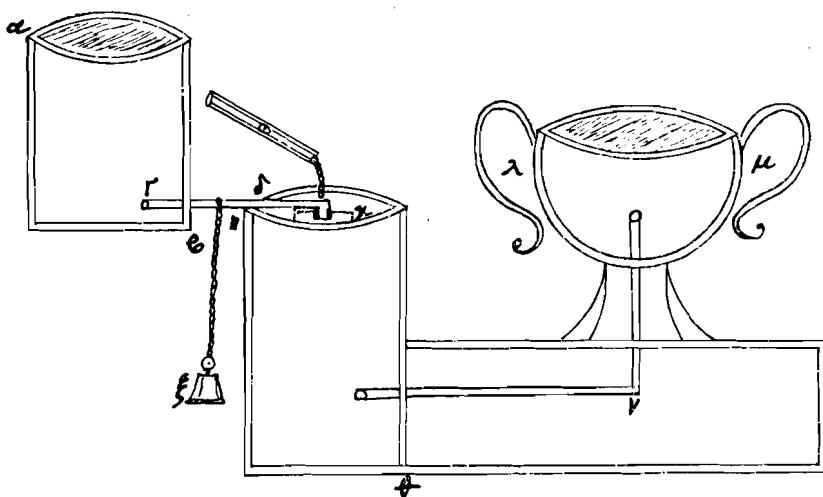


Fig. 2 Hero's systeem voor de regeling van het wijnniveau

De gasten konden hun wijn scheppen uit de rechts getekende kelk. Deze stond in verbinding met het, voor de gasten onzichtbare, vat in het midden. Linksboven is het reservoir getekend, waaruit wijn door een buis in het vat kon stromen. In dit vat bevond zich een op de aanvoerbuis passende drijver. Hefboom en ketting (door een kopieerfout niet verbonden) verhinderden het wegdrijven ervan. Daalde het wijnniveau, dan daalde de drijver, zodat wijn uit het reservoir kon stromen. Dit had tot gevolg, dat de drijver steeg en tenslotte de aanvoerbuis weer afsloot.

(Met toestemming van de Bibliothecaris der Rijksuniversiteit te Leiden overgenomen uit het handschrift *M.S. Scal. 45*, fol. 26r)

In Europa ontmoeten wij min of meer incidenteel optredende uitvindingen of heruitvindingen van regelapparaten pas na 1300. (pag. 128). Zo wordt de eerste uitvinding van de regeling van vloeistofniveaus toegeschreven aan James Watt, in de 18e eeuw (Bateman, 1945, p. 622); terwijl in 1893, meer dan 2000 jaar na de oorspronkelijke uitvinding, Maybach patent verkreeg op een vloeistofniveau-regelaar voor de verbrandingsmotoren van Daimler (Field, 1958, p. 168), de nu in alle auto's aanwezige carburator!

Waar kwam het systeem voor de automatische regeling van vloeistofniveaus vandaan? De studie van de geschiedenis van de tijdmeting verschaft ons het antwoord op deze vraag.

Vóór 1500 v. C. ontwikkelden de Egyptenaren, om onafhankelijk van de stand van de hemellichamen de tijd te kunnen meten, de eerste klokken (Leach, 1954, p. 123; Price, 1957, p. 601). Dit waren vazen met een klein gat in de bodem. Zij vulden deze met water en maten de sinds de vulling verstreken tijd, door het peil van de zakkende waterspiegel af te lezen. Hiermee creëerden zij de continue, ononderbroken, in ons jargon *analoge*, tijdmeting. De Grieken lieten het water uit dit uitstroom-vat in een tweede vat lopen, het instroom-vat. Zij maten in dit laatste vat de hoogte van de stijgende spiegel. Omdat door de daling van het waterniveau de druk bij de uitstroom-opening lager werd en de uitstroom-snelheid daardoor verminderde, veranderden zij de vorm van het uitstroom-vat: het werd een amphora (Schmidt, 1912, p. 41). Omstreeks 250 v. C. bracht Ktesibios in het eerste vat een overloop aan en hij liet uit een aanvoerleiding een overmaat aan water in dit vat stromen (Price, l.c., p. 601-603). Met dit open systeem verkreeg hij een redelijk stabiele waterspiegel (ten koste van een blijvend verlies aan water). Verder plaatste hij in het instroom-vat een drijver, de vlotter, met een verticale stok erop, die de verstreken tijd aanwees. Dit systeem was ook gebruikt in de Toren der Winden te Athene, die omstreeks 50 v. C. werd gebouwd. Het overlopende water voedde een fontein in de toren. De wijzerplaat van de klok werd in zijn geheel rondgedraaid – de uitvinding van de draaiende wijzer dateert uit de 14e eeuw v.C. – door een gewicht, dat aan één eind van een rond de as van de plaat gewonden kabel hing. Het andere eind van deze kabel was aan de vlotter van het instroom-vat bevestigd. Door het gelijkmatige stijgen van deze vlotter zakte het gewicht en draaide de as van de klok gelijkmatig rond. Dit is de z.g. anaphore klok van Ktesibios (Vitruvius IX, 9).

Een werk over klokken van Archimedes van Syracuse (187-212 v. C.), waarvan geen origineel bekend is, werd via het Perzisch door el-Gazari (1181-1206, Wiedemann, 1915, p. 32-48) in het Arabisch vertaald. In dit werk – waarvan de Universiteits Bibliotheek twee hand-

schriften bezit: *Codex Orientalis 117* en *656* – vinden wij het eenvoudigste regelsysteem, dat maar denkbaar is.<sup>2</sup> Aangezien Philon ook naar een werk van Archimedes over klokken verwijst (Schmidt, 1899; p. 460; Wiedemann und Hauser, 1918, p. 164), mogen wij aannemen, dat Archimedes de uitvinder is van het eerste regelsysteem (fig. 3). Hij

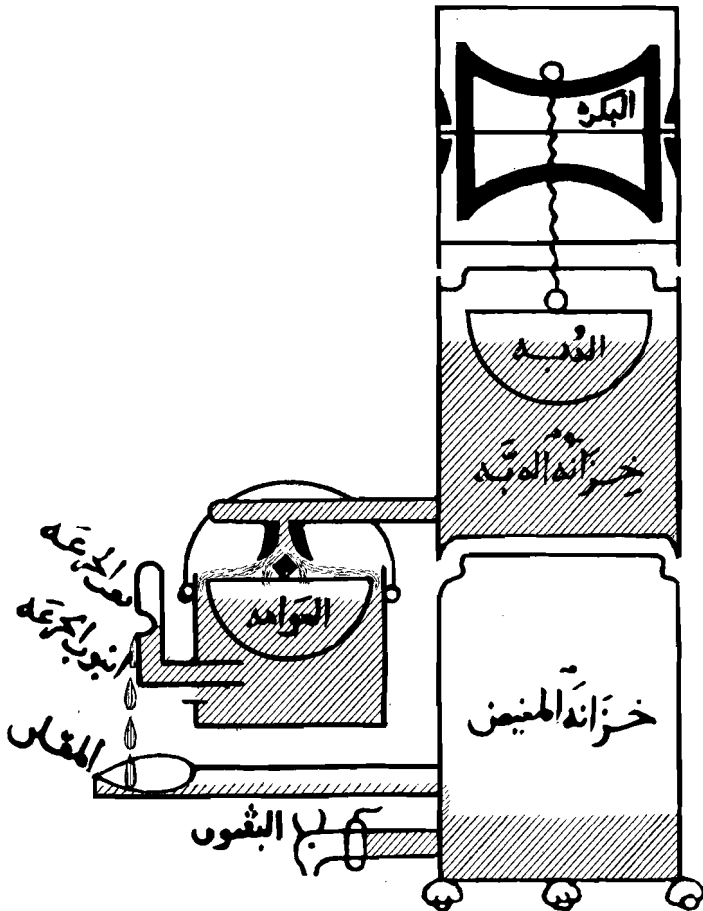


Fig. 3 De waterklok van Archimedes

De tekening is, via C. de Vaux (1891, p. 298), ontleend aan een handschrift van el-Gazari. Het verloop van het water is er apart ingetekend, om de leesbaarheid te vergroten. Het middelste compartiment is het reservoir, het vat links het uitstroom-vat, het compartiment rechts-onder het instroom-vat. Dat de uitstroom-buis niet passend in het uitstroom-vat is getekend, is een kopieerfout. In oudere handschriften, zoals *Cod. Or. 117* te Leiden, is dit type nog in goede vorm te vinden. Omdat de desbetreffende figuren in kleur zijn getekend, leenden deze zich niet voor reproductie.

kwam op de gedachte ook in het uitstroom-vat een vlotter te plaatsen, die – en dat is het geniale – de opening van de aanvoerleiding sloot wanneer het niveau steeg en opende, wanneer dit daalde. Hiermee werd het waterniveau in het uitstroom-vat constant gehouden, waardoor de uitstroom-snelheid gelijkmatig bleef (en het watergebruik economisch werd). Nu kon men de aanvoerleiding aansluiten op een reservoir (*Cod. Or. 117*, fol. 7-10, 24). Evenals de vlotter in het instroomvat door te stijgen andere mechanismen in gang kon brengen, kon een dalende vlotter in het reservoir daarvoor worden gebruikt. Op vele wijzen maakten de Grieken en later de Arabieren de verstreken tijd zichtbaar en hoorbaar in tal van klokkenspelen. Er waren klokken, die poppetjes bewogen, op fluiten bliezen of metalen ballen in bekkens lieten vallen.

Zoals hiervoor reeds werd vermeld, werd het regelsysteem van Archimedes ook in andere apparaten toegepast. Waarschijnlijk kwamen de Arabieren enige eeuwen later op het idee de vlotter een kraan in de aanvoerleiding te laten bedienen (waardoor het systeem onafhankelijk werd van een eventuele overdruk daarin). Wij zullen de werking van deze regelsystemen toelichten aan de toverbeker van Benû Musa (9e eeuw), die voor verschillende doeleinden werd gebruikt (fig. 4; Wiedemann, 1907, p. 343).

Dronk het vee in de wei water uit de beker, of vulde de gast van de rijke zijn drinkglas eruit met wijn, dan daalde het vloeistofniveau in de beker en dus ook in het vat, waar zich een vlotter in bevond. Door te dalen gaf de vlotter, een sensor, deze verstoring van de toestand van het proces door aan een stelsel van stangen. Dit stelsel, de eigenlijke regelaar, opende de kraan. Daardoor stroomde er vloeistof uit de aanvoerleiding of het reservoir in het vat. Het niveau steeg en door het stelsel van drijver en stangen werd de kraan, het corrigerend apparaat of de effector, gesloten zodra de gewenste toestand weer was bereikt. Deze toestand werd niet alleen gehandhaafd bij verstoringen, die door het drinken uit de beker optraden, maar dit systeem corrigeerde ook het effect van verdamping en van eventuele lekkages. Dat het stelsel van stangen de regelaar, het regel-apparaat bevat, zal U duidelijk worden wanneer U bedenkt, dat een verplaatsing van de ene stand over de andere inhoudt, dat het vloeistof-niveau anders zal komen te liggen. De streefwaarde of streeftoestand van het systeem wordt daardoor anders ingesteld.

Met de ontwikkeling van dit systeem is de vroege geschiedenis van regelsystemen bepaald niet afgesloten. Wij zullen de geschiedenis van de tijdmeting daartoe verder vervolgen: een lijn, die van Alexandrië en Bagdad naar China liep en zich pas omstreeks 1300 in Europa voort zou zetten.

Waterklokken konden allerlei mechanismen in gang zetten, mits deze

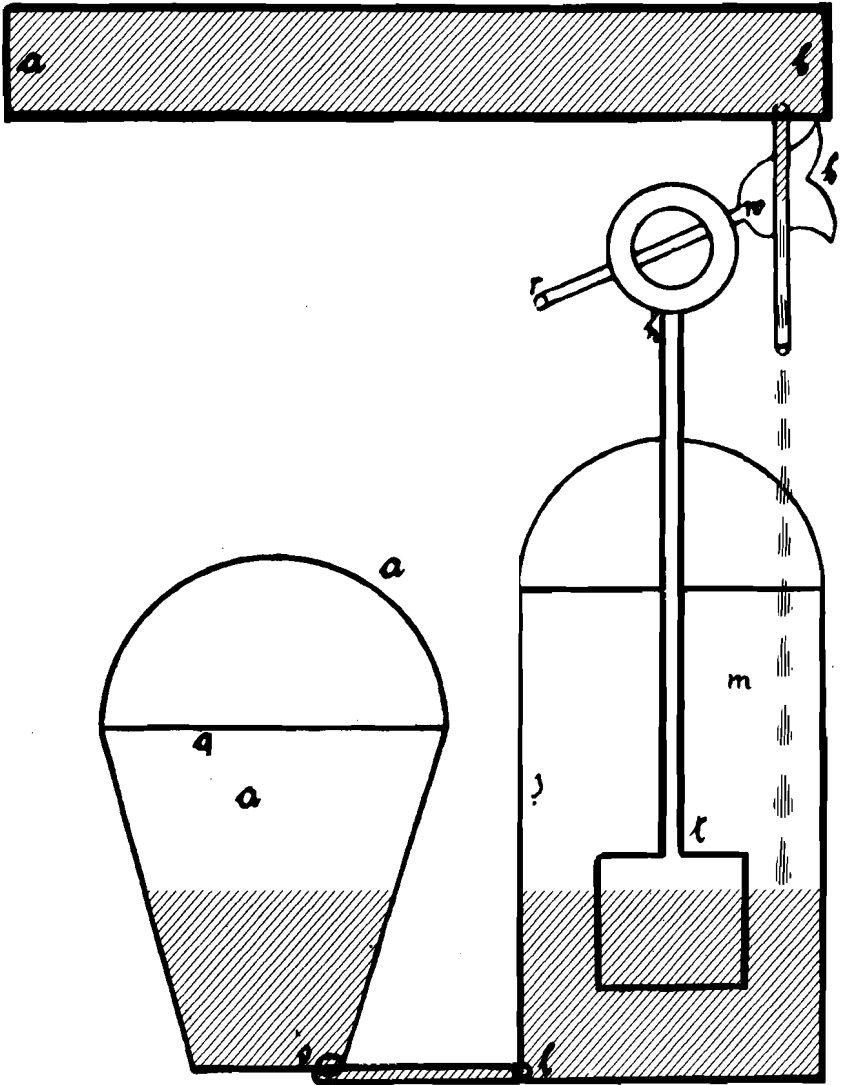


Fig. 4 De Toverbeker van Benû Musa

Via Wiedemann (1907, p. 343) ontleend aan een handschrift uit Berlijn. Ook hier is de tekening onveranderd weergegeven, behalve het water.

machinerie licht werd gehouden. De Chinezen<sup>3</sup>, die de waterklokken ook kenden, gebruikten grote planetaria als onderdeel van hun bestuursapparaat. Deze reuzenklokken konden niet door waterklokken worden aangedreven. Dit ging wel door het water uit een waterklok in de vat-



vormige schoepen van een verticaal wiel te laten stromen. Zodra zo'n schoep een bepaald gewicht had bereikt, raakte zij los van een balans. Door het gewicht van het water draaide het wiel en bracht de volgende schoep onder de waterstraal, terwijl de vorige leegliep. Dit systeem werd omstreeks het jaar 100 door Chang Heng (78-142) ontwikkeld (Needham, 1965, p. 483-488). Wij kunnen Chang Heng daarom beschouwen als de uitvinder van het aftellen van de tijd: de discontinue, in ons jargon *digitale*, tijdmeting. Het speelse trommelwerk van de Grieken is weliswaar ook als een vorm van digitale tijdmeting te beschouwen, maar Chang Heng's uitvinding had historische gevolgen. Zijn mechanisme, een eenvoudige automaat, was echter nog te onnauwkeurig. Het richten van een stevige waterstraal op een turbine voldeed ook niet, omdat het wiel daardoor een versnelde draaiing kreeg. De draaisnelheid van het gehele systeem moest immers worden aangepast aan de langzame en gelijkmatige omwentelingssnelheid van de sterrenhemel.

Dit probleem was voor Keizer Hsüan Tsung van de T'ang dynastie (685-762) aanleiding om in 721 de Boeddhistische monnik I-Hsing de opdracht te geven een meer accuraat systeem te ontwerpen (Needham, l.c. p. 471-476). I-Hsing, een van de meest vooraanstaande universele natuurkundigen van zijn tijd, vond in samenwerking met Liang Ling Tsan, die toen bibliothecaris was, de oplossing van dit probleem. In 724 construeerde I-Hsing de start-stop of aan-uit regeling, het echappement. Dit systeem is het beste te beschrijven aan de hand van het aandrijfsysteem in de beroemde Astronomische klokkentoren van Su Sung in K'ai-fêng in de provincie Honan (Needham, l.c., p. 446-465). Deze klok werkte van 1090 tot 1190, maar werd toen door een zware storm beschadigd. De inmiddels binnengevallen Mongolen misten de belangstelling voor deze wetenschap. Dit had tot gevolg, dat er geen deskundigen meer werden opgeleid en dat de kunst van het klokkenmaken in China verloren ging. Gelukkig hadden de Chinezen omstreeks 800 de boekdrukkunst uitgevonden, waardoor de kennis van deze systemen in diverse manuscripten behouden bleef.

Het aandrijfsysteem van I-Hsing en Su Sung's klok (Needham, l.c., p. 458-463) bestond uit een verticaal wiel, waarop vatvormige schoepen zaten, die in beperkte mate bewegen konden. Deze schoepen werden om de beurt vanuit een waterklok gevuld. Zodra zo'n schoep een zeker gewicht had gekregen, raakte zij los van een balans en viel iets omlaag. Zij raakte dan een stang, waardoor een hefboom werd opgetild. Hierdoor kwam het wiel vrij. De door het gewicht van het water versnelde beweging van dit wiel werd vervolgens door de inmiddels weer omlaag gekomen hefboom gestuit. Het wiel kon dus per keer met grote kracht precies één positie doordraaien. De wachtduur tijdens de vulling werd bestuurd door de balans en door de uitstroomsnelheid van het water,

die door een niveau-regeling constant werd gehouden (de eerste analoog naar digitaal omzetter).

De Chinese uitvinding van de digitale tijdmeting is zeker even belangrijk als die van het getal nul in India. De meting van de tijd in eenheden van gelijke duur maakte dat men de tijd af kon tellen, kon meten, evenals de lengte van een voorwerp. Het meten in de ruimte en in de tijd zou, met het gemakkelijk kunnen rekenen, later mede de basis vormen voor de moderne ontwikkeling van de wetenschappen (Whitrow, 1965, p. 172).

Langs nog onbekende wegen moet het principe van de start-stop regeling van klokken in Europa zijn gekomen. Daar verving men omstreeks 1300 het water door een gewicht – een ontwikkeling, die uit de anaphore klokken volgt. Verder maakte men het echappement symmetrisch, door de start en de stop, de sensor en de effector, voortdurend te verwisselen. Dank zij deze symmetrie – die de aanschouwelijkheid van de werking van de klok moeilijker maakte – kon men de periode van het start-stop systeem besturen door middel van een oscillator.<sup>4</sup> Deze oscillator was eerst horizontaal (de foliot of waag) en was weinig nauwkeurig. In 1641 gaf Galilei aan, dat de nauwkeurigheid kon worden opgevoerd door gebruik te maken van de in die tijd bekend geworden (Morpurgo, 1957, p. 18-38) verticale oscillator, de slinger. In de jaren 1657-1673 werkte Christiaan Huygens deze methode van besturing verder uit, waardoor de slingerklok een praktisch bruikbaar instrument werd<sup>5</sup>.

Uit de hier ontwikkelde beschouwing over de werking van de klok, die in de geschiedenis ervan stap voor stap kan worden gevolgd, blijkt dat de digitale mechanische klok beslist geen eenvoudige automaat is. Integendeel, de klok is een complex zichzelf regelend en zichzelf besturend systeem. Immers, gewicht of veer brengen de assen van de klok in versnelde draaiing. Het start-stop mechanisme zet dit over in een schokkende langzame beweging. Een oscillerend systeem bestuurt dit regelsysteem en bepaalt daardoor de duur en de regelmaat van deze beweging.

De verdere ontwikkeling van de digitale mechanische klok doet binnen dit bestek niet ter zake. In hetzelfde werk uit 1673 ontwierp Huygens echter een geheel ander en nieuw type klok, dat op een geregelde continue beweging berustte (Huygens, l.c., p. 157-161). Evenals de oude waterklokken een analoge klok. Een symmetrisch stelsel van gewichten was scharnierend aan een as bevestigd. Deze as werd door de krachtbron in een draaiende beweging gebracht. Storingen, zoals variaties in de belasting, deden de as langzamer of sneller draaien, waardoor de gewichten minder of meer uit elkaar weken<sup>6</sup>. De uitwijking van deze gewichten werkte terug op de krachtbron. Deze terugmelding werd op

zo'n wijze uitgevoerd, dat de aan het systeem geleverde energie werd verminderd, wanneer de draaisnelheid toenam en omgekeerd. Wij noemen dit nu tegenkoppeling, „negatieve feedback”, of negatieve terugmelding. Het stelsel van ronddraaiende gewichten, de centrifugaalregelaar, zorgde er dus voor, dat het toerental van het systeem ongeveer constant bleef. De centrifugaalregeling werd sindsdien zowel in analoge klokken, als in wind- en watermolens en, meer dan 100 jaar later, in stoommachines toegepast.

In feite is de stoommachine een extra ingewikkelde klok, die veel energie kan leveren en dan ook als krachtbron werd ontwikkeld. Ik twijfel er niet aan, dat de Chinezen, zouden zij de stoommachine hebben ontwikkeld, zij deze in elk geval als tijdmetr in hun planetaria zouden hebben gebruikt.

Hoewel een primitieve stoommachine reeds in Hero's *Encyclopedie* was beschreven (*M. S. Scal.* 45 fol. 46v; en mogelijk een parallelle ontwikkeling in Tibet: Needham, l.c., p. 225-228), gaat de moderne ontwikkeling terug op Papin (Farey, 1827, p. 93-110). In 1680 construeerde hij de hoge-druk pan en het systeem dat de druk in de pan regelde. De hoge-druk pan bracht Savery tot de constructie van een stoommachine, die echter niet was te gebruiken. Deze werd door Newcomen verbeterd. Door zijn originele uitvinding van de automatische twee-stands regeling creëerde Newcomen in 1717 een oscillerend systeem, dat als krachtbron fungeerde en praktisch bruikbaar was (Rolt, 1963, p. 53-57; Ferguson, 1964). In hetzelfde jaar paste Beighton Papin's drukregeling toe in de ketel van de stoommachine (Rolt, l.c., p. 106). James Watt bracht de oscillerende beweging van de zuiger over in een draaiende beweging en regelde het toerental van de draaiende as, door in 1787 de hem bekende (Dickinson, 1938, p. 83) centrifugaalregeling in te bouwen. Door deze en andere verbeteringen en uitvindingen maakte hij de stoommachine van een praktisch tot een ook economisch bruikbare machine. De nogal veel voorkomende gedachte, dat Watt de vader van de regeltechniek is, is waarschijnlijk door Weaver (in MacColl, 1945, p. VII) en door Wiener (1948, 1954)<sup>7</sup> geïnduceerd.

Afgezien van een enkele verwijzing naar de Romeinen

‘The ball-float valve, which controls the water level in plumbing, was an ancient invention of the Romans’ (Bibberot, 1955, p. 775, zonder literatuur opgave)

die onjuist is, zijn de meeste auteurs zich er meer of minder uitgesproken van bewust, dat de voorgeschiedenis vroeger is begonnen: bv. met de veiligheidsklep van Papin uit 1680 (Conway, 1958, p. 56; Bode, 1960, p. 2) of met de centrifugaal regelaar van Huygens uit 1673 (Bateman, 1945, p. 606), of met de thermostaat van Drebbel (1573-1633;

Gibbs, 1957, p. 679, 680; Rubin, 1968, p. 11) beschreven in 1666. Deze problematiek is nu niet meer relevant. Watt's toepassing is een mijlpaal in de geschiedenis van de regeltechniek, die reeds voor de jaartelling met de vlotter-regelaar begon (Rademaker, 1960, p. 7).

Een ander voorbeeld van legendevorming – we kunnen hier misschien beter over een mythe spreken – vinden wij wanneer er wordt gesproken over een essentieel onderscheid tussen de eerste en de tweede industriële revolutie. Beide zouden zijn ontstaan door de massale industriële toepassing van respectievelijk krachtbronnen als de stoommachine en van gegevens verwerkende automaten. Wanneer men dat stelt vergeet men, dat handelen en denken wel zijn te onderscheiden maar niet te scheiden. Het gebruik van de stoommachine werd pas mogelijk, nadat er in deze machines regelsystemen waren opgenomen (Bok, 1958, hfdst. 3.3); organen, die gegevens opnemen, deze verwerken, beslissingen nemen en die ten uitvoer brengen. De stoommachine bevatte liefst vier dergelijke systemen: regelingen van het waterniveau en van de stoomdruk in de ketel, van de beweging van de zuiger en van het toerental. Zelfs de stoommachine kon dus alleen „al denkend handelen” en daardoor als krachtbron fungeren. Niemand minder dan Karl Marx zag dit aspect van de industriële revolutie reeds in (zijn brief aan Engels van 28 januari 1863).

Eerder ondernomen pogingen om uiterst complexe automaten te bouwen waren echter gestrand op de grote wrijving in zuiver mechanische systemen. Een klassiek voorbeeld daarvan vormt Babbage's computer uit 1822 (Morrison and Morrison, 1961).

In de elektronentechniek, die zich uit Edison's gloeilamp ontwikkelde na de uitvinding van de diode door Edison (1885) en Fleming (1905), speelde deze wrijving geen rol van betekenis. In 1905 ontdekte De Forest de triode. In 1912 gebruikte hij deze als versterker en vond bovendien, dat men een oscillerend systeem verkreeg, door de uitgang van de triode in een meekoppeling met de ingang te verbinden. Zo ontstond de draadloze telefonie. Ten behoeve van de telefonie op lange afstand met behulp van kabels werd door Black in 1924 een tegengekoppelde versterker ontwikkeld, waaraan later ook Bode en MacColl meewerkten. Door al deze ontwikkelingen konden meer complexe systemen wel worden gebouwd.<sup>8</sup>

Wat de industriële revolutie betreft komt dit alles echter neer op een verschil in accent tussen handelen en denken. Het „denkaspect” kwam langzamerhand duidelijk naar voren.

Uit dit overzicht blijkt, dat de regeltechniek meer dan 2200 jaar oud is en geleidelijk, als het ware onbewust, is ontstaan. Het meer bewuste, d.w.z. ook theoretische denken over deze systemen, de regeltheorie, is van veel jongere datum.

Precies 150 jaar geleden, in 1818, publiceerde Borgnis de eerste classificatie van regelsystemen in zijn *Traité Complet de Mécanique*. Zijn systematiek van machine-onderdelen bevatte zes hoofdgroepen (Borgnis, p. VII en VIII; Ferguson, 1962, p. 210). Hij gaf deze groepen namen, die nu op ons een fysiologische indruk maken: *recepteurs, communicateurs, modificateurs, supports, régulateurs et opérateurs*. Hoewel zijn onderverdeling van de regelaars is verouderd, komen in dit hoofdstuk (l.c., p. 324-383) enige opmerkelijke beschrijvingen voor, die mede zijn plaatsing aan het begin van deze tak van wetenschap rechtvaardigen.

In 1868 schreef Maxwell de eerste wiskundige verhandeling over regelaars, bijna een eeuw na Watt's toepassing van de centrifugaal-regelaar in de stoommachine. Hij was duidelijk geïnspireerd door de vele vormen van regelaars en beslist niet alleen door die „van” Watt (Maxwell, p. 271). In dit artikel toonde Maxwell aan, dat deze systemen wiskundig zijn te analyseren en dat de voorwaarden zijn aan te geven waaronder deze regelaars wel, ten dele, of niet regelend werken. Dit artikel bevatte ook een oproep aan de wiskundigen zich aan de analyse van de werking van regelaars te wijden (l.c., p. 272).

In 1876 publiceerde Wischnegradskii in een bijzonder kort en elegant artikel een wiskundige analyse van een regelsysteem. Evenals Maxwell gaf hij hierin de voorwaarden aan, waarbij het systeem of stabiel is en goed regelt, of pas na een inslingering regelt, of oscilleert. In het laatste geval is van regeling geen sprake (een situatie die men wel dient te onderscheiden van systemen waarin oscillatie is vereist, zoals het besturende mechanisme in de digitale klok). Bovendien constateerde hij op grond van de door hem afgeleide voorwaarden, dat deze systemen altijd een eindige volgsnelheid moeten hebben. Hij concludeerde, dat een ideale regelaar niet kan worden geconstrueerd, maar dat de wel te construeren en bijna ideale regelaar in de praktijk goed voldoet (Wischnegradskii, p. 321).

Inmiddels had Farcot in 1873 een volkomen originele bijdrage geleverd door zijn theoretische ontwikkeling van de servo-motor en door deze in de praktijk op Franse oorlogsschepen te toetsen. De eerste stoomboten hadden motoren tot 1000 pk. Het besturen van deze schepen was een bijzonder inspannend karwei. Er waren acht mannen nodig om aan het stuur te draaien en de boten reageerden dan ook veel te traag op noodzakelijke wijzigingen in hun koers. Om dit werk te verlichten en het reactievermogen van deze schepen te versnellen, ontwikkelde hij het principe van de hulpmotor. Deze hulpmotor regelde de arbeid van de eigenlijke motor, eventueel via een tweede en krachtiger hulpmotor, maar werd op zijn beurt vanuit een commandopost bestuurd. Om aan te geven, dat hij hiermee een slaafs-alle-bevelen-opvolgend

stelsel had ontwikkeld, gaf hij dit de naam *servomoteur ou moteur asservi* (Farcot, p. 4). In dit werk sprak hij reeds over deze systemen in termen van „bevel”, „aanwijzing” en „commando” en over „het hantieren van teugels” (l.c. p. 2 en 3). Hij maakte duidelijk, dat er maar geringe hoeveelheden energie nodig zijn om machines met groot vermogen te besturen (l.c., p. 2). Bovendien was hij de eerste die inzag, dat deze systemen een ruimtelijke kringstructuur vertonen, en die stelde, dat hier een terugkoppeling aanwezig is (l.c. p. 5).

Ondanks Maxwell's oproep aan de wiskundigen kwam, afgezien van enkele technische overzichten (Poncelet, 1874; Lincke, 1879 en Von Mises, 1911), de regeltheorie pas in de twintiger jaren van deze eeuw langzaam en min of meer incidenteel op gang.

De artikelen van Minorski over de automatische piloot (1922 en 1930), van Van der Pol over oscillerende systemen (1927) en, in de jaren dertig, van Nyquist over terugkoppeltheorie (1932) en van Hazen over servosystemen (1934) behoren tot de belangrijkste vooroorlogse publikaties op dit terrein.<sup>9</sup>

Uit deze geschiedkundige beschouwing blijkt, dat de praktijk 2000 jaar voorliep op de theorie. Het broederlijk samengaan van regeltechniek en -theorie is pas enkele decennien oud, de ontwikkelingen hebben sindsdien echter een bijzonder grote vlucht genomen.

Hoewel de geschiedenis van de rekentechniek evenals die van de theorie van rekenautomaten<sup>10</sup> en de ontwikkeling van systeemgedachten in de economie en aanverwante gebieden (Boiten, 1965, par. 1 en 17-20) eigenlijk ook in dit overzicht thuishoren, zal ik deze terzijde laten om de ontwikkeling van het denken in termen van systemen in de fysiologie te kunnen schetsen.<sup>11</sup>

Afgezien van vaag omschreven noties bij de pre-Sokratici (Alkmaion, een medicus, sprak omstreeks 500 v. C. over het evenwicht tussen elkaar tegengestelde krachten in organismen (editie Cappelle, 1938, p. 107), en ongeveer 100 jaar later Hippokrates over de het dier eigen activiteit bij voeding, groei en ziekte (editie Brock, p. 60) begon het fysiologische denken in termen van systemen in de 17e eeuw met Harvey (1578-1657), Descartes (1596-1650), van Helmont (1577-1664?) en Spinoza (1632-1677).

Harvey zou volgens Von Brunn (1967, p. 34) een volledige beschrijving van de werking van de rechter boezem van het hart hebben gegeven in de vorm van een regelsysteem. Aangezien Von Brunn geen gedetailleerde verwijzingen naar de desbetreffende passages uit Harvey's werken geeft, moet ik hier vooralsnog een vraagteken plaatsen.

Van Descartes is de beroemde vergelijking van de mens met de klok en met andere automaten afkomstig, een van de eerste fysiologische modellen; letterlijk geciteerd:

“ . . . les fonctions . . . d’un vrai homme: je désire dis-je, que vous considérez que ces fonctions suivent toutes naturellement, en cette machine, de la seule disposition de ses organes, ne plus ne moins que font les mouvements d’une horloge, ou autre automate, de celle de ses contrepoids et de ses roues; en sorte qu’il ne faut point à leur occasion concevoir en elle aucune autre âme végétative, ni sensitive, ni aucun autre principe de mouvement et de vie, que son sang et ses esprits, agités par la chaleur du feu qui brûle continuellement dans son coeur, et qui n’est point d’autre nature que tous les feux qui sont dans les corps inanimés.” (*Traité de l’Homme*, 1664, *Oeuvres*, p. 873).

Wanneer wij de eerste bladzijde van zijn *Traité de l’Homme* goed lezen, wordt het ons duidelijk dat hij aan deze vergelijking kwam (hoewel het ook mogelijk is, dat hij dit vanwege de opvattingen in zijn tijd zo moest stellen) naar analogie van het scheppingsverhaal uit *Genesis*, waar staat *God schiep de mens naar zijn beeld*. Evenzo maakt de mens de machine naar zijn beeld (l.c., p. 807).

Uit Descartes’ vergelijking met de klok blijkt, dat hij het organisme zag als een open keten van oorzaak en gevolg. Hoewel hij er na aan toe was de kring te sluiten en ook het begrip signaal te formuleren (l.c., p. 866) – zo ligt in zijn werk het concept van de zelfverdediging besloten, evenals de grondgedachte van de reflex (l.c., p. 824-827) – kwam hij niet over deze drempel. Descartes heeft, met vele anderen, niet begrepen hoe een klok werkt. Dit model is in feite veel fraaier dan men lang heeft gedacht, zoals U uit het voorafgaande op hebt kunnen maken.

De vergelijking van organismen met de klok in Cartesiaanse zin werd tot in het begin van deze eeuw door velen hetzij pro, hetzij contra gebruikt. Toch werd reeds in 1660 door Van Helmont het begrip „besturen” in de fysiologie ingevoerd. Zijn opvatting over de klok was juist. Hij voerde dit apparaat in een parabel ten tonele en merkte op, dat een klok weliswaar slechts werkt als men er een gewicht aan hangt, maar dat de werking ervan berust op een stuurmechanisme in de klok zelf (Van Helmont, p. 106). Alle op Aristoteles gebaseerde denkbeelden over externe besturing van de mens wees hij volledig af (l.c., p. 28, 106 en 107). Er is, zei Van Helmont, een *werckmeester* in het lichaam, *eenen algemeynen bestierder, die den toom houdt . . . met gesach over alle . . . sijne besondere stiermannen der leden* (l.c., p. 44). Men lette erop, dat hij hier reeds over een hiërarchie van systemen sprak. Het wordt uit zijn verdere behandeling duidelijk, dat hij deze besturingen

beschouwde als natuurlijke verschijnselen in organismen (l.c., p. 110). Van Helmont werkte deze gedachte nader uit in zijn onderzoek over de werking van de maag: De ingang en de uitgang van de maag (het *bovenslot* en het *onderslot*) worden door elders in het lichaam gelegen sleutels geopend en gesloten (l.c., p. 225 en 226).

Als laatste van het genoemde viertal uit de 17e eeuw legde Spinoza in zijn *Ethica* (1677, p. 61-63) de basis voor de begrippen structuur en organisatie. Begrippen, die in het begin van de 19e eeuw door Cuvier in zijn inleiding van *Le Règne Animal* (1817, p. 15 en 16) expliciet werden gebruikt. Cuvier stelde, dat het de gemeenschappelijke structuur van levende wezens is, die men met de term organisatie weergeeft en dat georganiseerde lichamen de enige lichamen zijn, die kunnen leven.

In de tweede helft van de 18e eeuw publiceerde Lavoisier zijn artikelen over de ademhaling en de temperatuur. Zijn fysiologische ontdekking uit 1777, dat de ademhaling een langzame verbranding is, werd in 1789 gevolgd door een artikel geschreven samen met Seguin, dat tot de klassieken op het gebied van fysiologische systemen behoort. Op grond van hun experimenten kwamen zij tot de conclusie, dat er in het dier een aantal regelaars aanwezig zijn, die de dierlijke machine besturen, die afwijkingen compenseren en die een gegeven werkbereik hebben. Wordt dit bereik overschreden, dan heeft men met een ziekte te maken. Maar zelfs dan zijn er mechanismen voor de reparatie aanwezig, zodat genezing mogelijk is (Seguin en Lavoisier, p. 580-582). Het resultaat van de samenwerking tussen deze mechanismen werd door hen reeds toen, en dan nog op bijzonder poëtische wijze, als volgt onder woorden gebracht (l.c., p. 581, letterlijk geciteerd):

Dans la course, dans la danse,  
dans tous les exercices violens, . . . ,  
l'équilibre de l'économie animale  
n'est pas troublé . . .

Het regeltheoretische equivalent van deze vondsten over de regeling van de ademhaling — nl. dat de versnellende werking van het aan de klok hangende gewicht door een regelmechanisme in een langzame en regelmatige beweging wordt omgezet — werd pas 30 jaar later, in 1818, door Borgnis in het hoofdstuk over regelaars van zijn reeds genoemde werk geformuleerd (Borgnis, p. 336 en 337).

Hoe moeilijk het was, om van de gedachten over open causale ketens tot kringprocessen te komen, kan worden geïllustreerd aan Palmer's discussie in de verzamelde werken van Hunter uit 1837 (p. 127). Hierin merkte Palmer op, dat Cuvier's stelling dat leven afhankelijk is van organisatie, *voor hem een complete omkering van de werkelijke relaties tussen oorzaak en gevolg betekent*. Hoe dicht stond Palmer hier bij de ontdekking van een van de belangrijkste fysiologische concepten en hoe



lang zou het nog duren voordat dit gestalte zou krijgen. De strijd tussen de mechanisten, die uitsluitend in open ketens van oorzaak en gevolg dachten en de vitalisten, die een ongrijpbaar levend principe postuleerden, was toen echter reeds aan de gang.

Een kleine honderd jaar later, in de tweede helft van de 19e eeuw, bracht Claude Bernard de fysiologie op hoog experimenteel niveau (1856). Op basis van zijn onderzoekingen maakte hij in 1859 (p. 51 en 52) onderscheid tussen het externe milieu, de omgeving waarin het organisme zich bevindt, en het interne milieu, de vloeistof die de weefselementen bespoelt. In 1878 stelde hij, op grond van zijn experimenten, dat de constante samenstelling van het interne milieu de voorwaarde vormt voor een vrij en onafhankelijk leven; dat dit milieu constant blijft doordat variaties in alle gevallen worden gecompenseerd en in evenwicht gebracht, (p. 113); dat dit gebeurt onder invloed van het zenuwstelsel (1859, p. 49), en dat het dier reserves bezit, waardoor het afwijkingen op kan vangen. Hij zette zich echter zo scherp af tegen de vitalistische stromingen van zijn tijd – *tout phénomène a un déterminisme rigoureux* – dat hij gedachtengangen over statistische processen verwierp (1856, II, II, IX) en, hoewel hij het begrip regeling een enkele keer gebruikte (1859, p. 450) verzetten hij er zich eigenlijk tegen, omdat dit begrip voor hem de aanwezigheid van een ongrijpbare bestuurder inhield. Dit deed hij niet door Lavoisier te attaqueren, maar Van Helmont (1878, Vol. II, p. 161 en les XXV). Het is de ironie van de geschiedenis, dat Van Helmont, die zich evenals Bernard tegen het hanteren van ongrijpbare begrippen keerde, in latere tijden als vitalist werd bestempeld.

In de jaren 1929 tot '32 voltooide Cannon het concept van de regeling met betrekking tot de systemen, die het interne milieu constant houden. Tussen 1921 en '34 deed Von Uexküll hetzelfde voor de reflexkringen in relatie tot het externe milieu (Von Uexküll, 1934, Einleitung). Cannon begon met onderscheid te maken tussen de begrippen „evenwicht” en „geregelde toestand”, waarvoor hij de term „homeostase” invoerde (Cannon, ed. 1963, p. 24). Hij concludeerde, dat het autonome zenuwstelsel verstoringen waarneemt en op grond van signalen corrigerende mechanismen in gang zet (l.c., p. 59). Hij sprak de hoop uit, dat de wijze waarop dit gebeurt door nader onderzoek duidelijk zou worden; onderzoek waar Sherrington en andere inmiddels mee bezig waren. Cannon zag echter reeds verder en stelde, dat het onderzoek van regelsystemen in de fysiologie van belang was voor andere organisaties, industriële en sociale, mede teneinde verstoringen daarin te kunnen compenseren (l.c., p. 24 en 25).

De Tweede Wereldoorlog bracht als in een reusachtige smeltkroes de tot die tijd zich min of meer naast elkaar ontwikkelende gebieden

samen: de regeltechniek en -theorie, de rekentechniek, de automaten-theorie en de fysiologie.

Zo was tot aan die oorlog de mens een essentieel onderdeel van het vuurleiding-systeem in luchtafweergeschut. Dit kwetsbare en niet altijd even betrouwbare onderdeel (een inzicht dat van Farcot afkomstig is) moest worden vervangen door een vuurleidende automaat, dat was de opdracht die Bigelow en Wiener kregen. In hun analyse van dit mens-machine systeem, kwamen zij (evenals *60 jaar eerder* Lincke, 1879, p. 589 en 603-608) tot het inzicht, dat teruggekoppelde processen een essentiële rol spelen in het handelen van de mens. Samen met de fysioloog Rosenblueth stelden deze wiskundigen een programma op, dat zij in 1943 in het tijdschrift *Philosophy of Science* publiceerden met als titel *Behavior, Purpose and Teleology*. In dit „fysiologisch manifest” stelden zij, dat teruggekoppelde processen eigen zijn aan alle levende structuren (l.c., p. 19 en 22). Bovendien wezen zij erop, dat levende systemen en complexe machines in bouw en werking vergelijkbaar zijn, hoewel de aard van de bouwstenen kan verschillen, m.a.w. dat deze structuren isomorf zijn. Bijzondere klassen van kleine inhoud kunnen exclusief bij het ene of het andere systeem voorkomen, zoals b.v. het wiel (l.c., p. 22). In 1946 toonden zij experimenteel aan, dat men fysiologische processen inderdaad kwantitatief kan doormeten op grond van de regeltheoretische benadering (Wiener, 1948, p. 19-21). (Overigens moeten wij oppassen met de genoemde exclusiviteit. Zelfs het meest in het oog vallende verschil tussen organismen en machines, het wiel, is maar betrekkelijk. Sommige gewrichten zijn als wieldeel en ondergrond te beschouwen, waarbij na het uitvoeren van de beweging dit wieldeel de bijbehorende ondergrond weer meeneemt).

Intussen hadden McCulloch en Pitts de zenuwfysiologie en de automaten-theorie samengebracht. In 1943 publiceerden zij een artikel, getiteld *A logical calculus of ideas immanent in nervous activity*, waarin zij aantoonde, dat netwerken van eenvoudige zenuwcellen alle logische operaties kunnen verrichten. Zestien jaar later, in 1959, werd op basis van deze gedachte een fysiologisch onderzoek verricht, dat van primaire betekenis zou zijn voor de moderne systeem-fysiologie. Lettvin, Maturana, McCulloch en Pitts gaven dit werk de intrigerende naam *What the frog's eye tells the frog's brain*. Zij vonden, dat de zenuwcellen in het netvlies van de kikker zo zijn geschakeld, dat deze dieren slechts enkele eenvoudige patronen waar kunnen nemen. Een voorbeeld wordt door de vlieg-detectoren gegeven. Dit zijn cellen, die zo geschakeld zijn, dat zij alleen actief worden, wanneer een rond donker vlekje van een bepaalde hoekgrootte in het bijbehorende deel van hun gezichtsveld komt. De analyse van patroondetecterende schakelingen heeft sindsdien een grote vlucht genomen. Terwille van de tijd volsta ik met te vermelden, dat het

gehele systeem vanaf het zien van de vlieg tot het grijpen van de prooi analyseerbaar wordt en dat bij dieren die meer met ons verwant zijn, zoals katten en apen, de patroondetecterende schakelingen naar de hersenschors zijn verplaatst, schakelingen die achtereenvolgens lijnen, evenwijdige lijnen en hoeken tussen lijnen detecteren.

Evenals wij het Cartesiaanse systeem van de drie dimensies van de ruimte kunnen beschouwen als het analogon van ons evenwichtsorgaan, kunnen wij *De Elementen* van Euclides (300 v. C.) zien als het analogon van de elementen in de patroondetectie in het visuele systeem. Het gaat erop lijken, dat de wiskunde voor de fysioloog niet alleen een hulpmiddel is, maar ook een bron van inspiratie kan zijn.

Ik wil gaarne toegeven, dat het gebruiken van analogieën gevaarlijk is. Zij vormen echter een bijzonder belangrijk onderdeel van ons associatief-creatieve denken. Een verkeerd gebruikte, mits later gecorrigeerde analogie is vergefelijk, het miskennen van een isomorfie zal de desbetreffende onderzoeker zichzelf echter nooit vergeven: *To muddle or to model, that's the question.*

Evenzo kunnen complexe fysiologische systemen in eerste instantie in termen van eenvoudige systemen worden beschreven. Zulk een vereenvoudigde beschrijving kan goed voldoen, mits wij met de vereenvoudiging rekening blijven houden. Het gaat er tenslotte om op welk niveau of met welk doel een bepaalde beschrijving wordt gehanteerd. Uiteindelijk is volgens Rosenblueth, Wiener en Bigelow (1943, p. 23) het ideale model van een kat per slot van rekening een kat, om het even of deze is geboren of in een (toekomstig) laboratorium zou worden gemaakt (en geprogrammeerd). In het tweede geval zou men haar weliswaar hebben gemaakt en daarvoor dan de receptuur bezitten; wát er in zo'n dier op een willekeurig moment gebeurt zal ook dan aan de onderzoeker ontsnappen, evenals nu reeds met de moderne rekenautomaten het geval is.

De vereenvoudigde beschrijving is voor de fysioloog, van welke achtergrond ook, van belang omdat hij ontbrekende kennis van een systeem op kan sporen en door onderzoek aan kan vullen, alvorens dit systeem op de meer complexe vorm ervan te analyseren.

De vereenvoudigde beschrijving is voor de medicus van belang, omdat inzicht in de structuur en de werking van systemen inzicht in de afwijkingen ervan inhoudt. Dit betekent dat het traditionele onderscheid tussen normale en pathologische fysiologie van secundair belang wordt.

De multidisciplinaire samenkomsten, die in 1943 rond Wiener en McCulloch begonnen, inspireerden Von Neumann na de oorlog tot het ontwerpen van een computer (1946/47), die nog steeds model staat voor alle moderne rekenautomaten. Deze machine werd, als deelvulling van Cannon's voorspelling, mede op basis van fysiologische gege-

vens ontworpen (Von Neumann, 1958, p. VIII).

In 1948 publiceerde Wiener zijn boek *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, en Shannon zijn artikel over de communicatietheorie. Shannon's werk bracht de cybernetici tot het inzicht, dat het in de systeem-leer niet zozeer gaat om energetische beschouwingen dan wel om het opnemen, verwerken en terug- en verder melden van gegevens, een notie die reeds in Farcot's werk ligt besloten.

De *déjà vu* ervaring, die de fysiologen en velen met hen na kennisname van deze publikaties ondervonden, heeft velen verleid tot een weinig verantwoord gebruik van de termen 'informatie' en 'feedback'. In de praktijk kwam het systeem-onderzoek in de fysiologie moeizaam van de grond. Deze ontwikkeling begon in de vijftiger jaren, om na 1960 een grotere vlucht te nemen, zoals blijkt uit de tabel, die aan de hand van een Angelsaksisch georiënteerd literatuuroverzicht van november 1962 is samengesteld (Jury and Pavlidis, 1963)

Periode	aantal	periodelengte in jaren
1930-'39	2	10
1940-'49	2	10
1950-'54	6	5
1955-'59	20	5
1960-'62	83	2½

Twee mijns inziens bijzonder belangrijke, recentelijk uit de ervaring voortgekomen principes (ook al zijn zij onbewezen en blijven zij misschien onbewijsbaar) wil ik tot slot speciaal vermelden.

Het eerste, dat uit de neurofysiologie komt en op de samenwerking in een grote vloot van oorlogsschepen is geïnspireerd, zou ik *het flexibiliteits-postulaat* van McCulloch (1964, artikel 21 in McCulloch, 1965) willen noemen:

In samenwerkende abstracte systemen is een redundantie van het potentiële commando vereist, wil het geheel niet te gronde gaan.

Dit principe houdt in, dat er meer potentiële commandanten aanwezig moeten zijn en dat degene, die de meeste gegevens over de huidige en de te verwachten situatie bezit, op dat moment het commando voert.

Het tweede principe, dat in embryonale vorm reeds in de werken van Van Helmont is te vinden, maar onafhankelijk daarvan uit de moderne regeltheorie stamt, zou ik *het structuurpostulaat van Habermann* (1967) (p. 11, hfdst. 2 en 3) willen noemen. Het luidt als volgt:

Wanneer verscheidene abstracte machines samenwerken, is een hiërarchische structuur vereist, wil het als één geheel kunnen werken.

Consequenties van deze principes zijn bijvoorbeeld, dat er in complexe systemen als organismen of grotere organisaties vele redundante commando-niveaus aanwezig moeten zijn; dat in elk daarvan commando-dissociatie op kan treden; dat ziekelijke processen in redundante systemen, zoals de grote hersenen, lang ongemerkt voort kunnen werken; en dat de commandant *ik* in het zenuwstelsel nooit of slechts vluchtig zal zijn te localiseren, eventueel wel de structuur met *ik-redundantie*.

## Samenvatting

De cybernetica (de wetenschap van regel-, reken- en communicatiesystemen) ontstond in de tweede wereldoorlog. Aanleiding daartoe was het inzicht van Wiener en Bigelow en van McCulloch en Pitts dat machines en organismen zowel in bouw als in werking grote overeenkomst vertonen: dat beide in termen van systemen zijn te beschrijven.

Dit beginpunt in de tweede wereldoorlog is echter tevens het eind van langdurige maar geïsoleerde ontwikkelingen binnen dit gebied.

Voor de uitvinding van regelsystemen worden meestal James Watt (1787) en soms Denis Papin (1680) genoemd. De studie van Arabische en Griekse manuscripten leert ons echter dat regelsystemen tenminste teruggaan tot 200 v. C. Waarschijnlijk is het Archimedes (287-212 v. C.) die de automatische waterhoogte regeling uitvond om de uitstroomsnelheid van waterklokken constant te houden. In 724 na C. vonden I-Hsing en Liang Ling Tsan de aan-uit regeling uit, het échappement van de mechanische klok.

Gedachten over regelmechanismen in de fysiologie (de leer van de levensverrichtingen) ontstonden in de 17e eeuw (Van Helmont, 1660, Descartes, 1664, en, misschien, Harvey) en werden in de 18e eeuw in meer uitgewerkte vorm door Seguin en Lavoisier (1789) gepubliceerd.

De regeltheorie dateert uit de 19e eeuw. Deze begon met Borgnis (1818) en werd door Maxwell (1868), Farcot (1873) en Wischnegradskii (1867) voor het eerst nader uitgewerkt.

Na de uitvinding van de triode omstreeks onze eeuwwisseling vond in de eerste helft van deze eeuw een grote ontwikkeling plaats in de elektronentechniek. In de tweede wereldoorlog smolten de genoemde gebieden en de rekentechniek en automatentheorie samen tot de cybernetica, die na de oorlog met Shannon's communicatietheorie (1948) werd aangevuld.

## Aantekeningen

<sup>1</sup> De termen „proces” en „systeem” worden als synoniem gebruikt. Met het woord „systeem” wordt de blauwdruk, de anatomie van een proces bedoeld, terwijl het begrip „proces” eigenlijk betrekking heeft op de werkwijze. Bovendien wordt „proces” zowel voor het geregelde gedeelte als voor het gehele systeem gebruikt. Teneinde dit artikel homogeen te houden heb ik de term „proces” in de genoemde meer omvattende betekenis vervangen door „systeem”.

<sup>2</sup> Wij hebben hier het oudste beschreven technische regelsysteem. Klepeloze regelsystemen waarbij het opstijgende water met behulp van de luchtdruk de leiding uit het reservaat afsloot vinden wij in ingewikkelde vormen in de *Encyclopedie* van Hero (M. S. Scal. 45, bv. fol. 25 v) in de werken van Philon (Schmidt, 1899, p. 484-489) en in de vorm van verwijzingen, bij de Chinezen (Needham, 1965, p. 233). Dit systeem moet in zijn eenvoudige vorm (de met water gevulde fles, omgekeerd geplaatst in een drinkbak voor vogels) nog veel ouder zijn. Het verhaal van de weduwe van Sarfat (1 Koningen 17 : 7-24, geschreven vlak voor de ballingschap, 586 v. C.) kan daarop wijzen. Voorts hadden in de Indus-vallei culturen, met name die van Mohenjo-Daro (ong. 3000 v. C.?), op stedelijk hydrotechnisch gebied een voorsprong van duizend of meer jaren op alle andere culturen. De kans bestaat dat waterniveau-regelingen reeds door hen zijn uitgevonden. Hierover is echter nog niets bekend (mondelijke mededeling van Prof. dr. C. Voûte, 1967). Het is echter tekenend, dat de Griekse technologische ontwikkeling plaats vond na de tochten van Alexander de Grote. Het lijkt waarschijnlijk dat de Grieken toen tal van technieken hebben verzameld en later verder hebben uitgewerkt.

<sup>3</sup> De conclusies betreffende regelmechanismen in Chinese klokken konden worden getrokken dank zij de bijzonder gedetailleerde weergave van de Chinese cultuur door Needham in diens weergaloze serie *Science and Civilisation in China*, met name Vol. IV, 2 (1965).

<sup>4</sup> De geschiedenis van de technische ontwikkeling van de oscillator is nog niet beschreven. De bijdrage van de Arabieren is waarschijnlijk groot. In het manuscript van el-Gazari zijn symmetrisch oscillerende waterklokken beschreven (*Cod. Or. 117*, fol. 152-161; *Cod. Or. 656*, fol. 150-154). De geschiedenis van de slinger is, voor Europa, beschreven door Morpurgo (1957). Deze ontwikkeling gaat misschien terug op de schoepvormige vaten van Chang Heng (Needham, 1965, p. 483-488) en/of de zich periodiek legende watervaten van de Grieken (Hero, *M. S. Scal.* 45 fol. 18 v; Schmidt, 1899, hfdst. XIX en XX).

<sup>5</sup> Overzichten van de meer recente ontwikkeling van de klok zijn te vinden in Lloyd (1966) en Spierdijk (1967).

<sup>6</sup> Het hierop volgende staat niet expliciet in Huygens' werk. De stap naar de feitelijke toepassing van dit systeem is (nog?) onbekend.

<sup>7</sup> Uit de werken van Wiener:

‘... feedback, which... is at least as old, in fact, as the governor which regulates the speed of Watt's steam engine...’ (1954, p. 151, 152)

‘In the original form designed by Watt...’ (1948, p. 97) ‘This method of regulation received a thorough mathematical analysis at the hands of Clerk Maxwell in 1868’ (1954, p. 152)

‘... the first significant paper on feedback mechanisms...’ (1948, p. 11).

<sup>8</sup> Overzichten van de ontwikkelingen in de elektronische regeltechniek zijn te vinden in Bode (1960) en Rudin (1968).

<sup>9</sup> In Bellman and Kalaba (1964) en Rudin (1968) is de moderne ontwikkeling van de regeltheorie en van de daarvoor belangrijke wiskundige hulpmiddelen te vinden.

<sup>10</sup> De geschiedenis van de ontwikkeling van externe geheugens – men denke aan het schrift – gaat terug tot in de prehistorie; die van mechanische programma's en geprogrammeerde systemen – sleutel en slot – tot ± 2000 v. Chr.

<sup>11</sup> Dank zij het werk van Adolph (1961) zijn de bronnen voor de ontwikkelingen binnen de fysiologie makkelijk te vinden.

## Bibliografie

- Adolph, E. F., Early concepts of physiological regulations *Physiol. Rev.*, 41, 1961, 737-770.
- Bateman, H., The control of an elastic fluid. *Bull. Amer. Math. Soc.* 51, 1945, 601-646. Herdruk in Bellman and Kalaba, 1964, 18-64.
- Bellman, R. and Kalaba, R., eds. *Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory*. Dover S 1172, Dover Publ., Inc., New York, 1964.
- Bernard, C., *An Introduction to the Study of Experimental Medicine* (1856). Translation H. C. Greene. Dover T 400, Dover Publ., Inc., New York, 1957.
- Bernard, C., *Leçons sur les Propriétés Physiologiques et les Altérations Pathologiques des Liquides de l'Organisme*. Tome I. Baillière, Paris, 1859.
- Bernard, C., *Leçons sur les Phénomènes de la Vie communs aux Animaux et aux Végétaux*. Baillière, Paris, 1879.
- Bibberot, R. J., Automation — a survey. *Electrical Engineering* september 1955, 775-780.
- Bode, H. W., Feedback — the history of an idea. *Proceedings of the Symposium on Active Networks and Feedback Systems* Polytechnic Institute of Brooklyn, New York, 1960. Reprinted in Bellman and Kalaba, 1964, 106-123.
- Boiten, R. G., Cybernetica en samenleving. In: Arbeid op de Tweesprong, opstellen, uitgegeven ter gelegenheid van het vijfenzeventigjarig bestaan der Arbeidsinspectie. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1965, 41-93.
- Bok, S. T., *Cybernetica*. Aula 4, Het Spectrum, Antwerpen, 1958.
- Borgnis, G. A., *Traité Complet de Mécanique appliquée aux Arts*. Vol. I. *Composition des Machines*, Paris, 1818.
- Broock, A. J., Translation of *Galen, On the Natural Faculties*. Heineman, London.
- Cannon, W. B., *The Wisdom of the Body*. 1932: rev. ed. 1939. Reprint: Norton, New York, 1963.
- Capelle, W., *Die Vorsokratiker*. Alfred Kröner Verlag, Stuttgart, 1938.
- Codex Orientalis 117 en 656*. Handschriften naar el-Gazari; in de Bibliotheek van de Rijksuniversiteit te Leiden.
- Conway, H. G., Some notes on the origins of mechanical servo mechanisms. *Transactions of the Newcomen Society*, 29, 1958, 55-73.
- Cuvier, M., *Le Règne Animal*, Tome I. Deterville, Paris, 1817.
- Descartes., *Oeuvres et Lettres*, ed. A. Bridoux. Gallimard, Paris, 1952.
- Dickinson, H. W., *A Short History of the Steam Engine*. At the University Press, Cambridge, 1938.
- el-Gazari, zie *Codex Orientalis*.
- Farcot, J., *Le Servo-Moteur ou Moteur-Asservi*. Baudry, Paris, 1873.
- Farey, J., *A treatise on the Steam Engine*. Longman, e.a., London, 1827.
- Ferguson, E. S., Kinematics of mechanisms from the time of Watt. *U.S. Nat. Museum Bull.*, 228, 1962, 185-230.
- Ferguson, E. S., The origins of the steam engine. *Scientific American*, January 1964, 98-107.
- Field, D. C., Internal Combustion Engines. Chapter 8 in Singer, *et al.*, vol V, 1958.
- Forde, D., Foraging, Hunting and Fishing. Chapter 8 in Singer, *et al.*, vol. I, 1954.

- Gibbs, F. W., Invention in Chemical Industries. Chapter 25 in Singer, *et al.*, vol. III, 1957.
- Habermann, A. N., *On the Harmonious Co-Operation of Abstract Machines*. Technische Hogeschool, Eindhoven, 1967.
- Hawkes, J., Prehistory. In: Hawkes, J. and Woolley, L. *Prehistory and the Beginnings of Civilization*, Vol. I of the UNESCO Series HISTORY OF MANKIND. Harper & Row, New York and Evanston, 1963.
- Hazen, H. L., Theory of Servomechanisms. *J. Franklin Inst.* 218, 1934, 279-331 and 543-580.
- Hero, *Encyclopedie. M. S. Scaligeri 45*. Handschrift in de verzameling van de Bibliotheek der Rijksuniversiteit te Leiden.
- Hero, *Encyclopedie* cf. Schmidt, W., 1899.
- Hunter, J., *Works*. Ed. J. F. Palmer. Vol. III, Longman, London, 1837.
- Huygens, Chr., *Horologium*. A. Vlaeq, Hagae Comitum, 1657.
- Huygens, Chr., *Horologium Oscillatorium*. Muguët, Paris, 1673.
- Jury, E. I. and Pavlidis, T. A literature survey of biocontrol systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, July 1963, 210-217.
- Leach, E. R., Primitive Time-reckoning. Chapter 5 in Singer *et al*, Vol. I, 1954.
- Lettvin, J. Y., Maturana, H. R., McCulloch, W. S. and Pitts, W. H., What the frog's eye tells the frog's brain. *Proc. IRE*, 47, 1959, 1940-1959. (Reprinted in McCulloch, W. S. 1965, paper 14).
- Lincke, F., Das Mechanische Relais. *Zeitschrift Vereines Deutscher Ingenieure*, 23, 1879, 510-524 und 578-616.
- Lloyd, H. A., Timekeepers — a historical sketch. In: Fraser, J. T., editor. *The Voices of Time*. Braziller, New York, 1966, p. 388-400.
- MacColl, le Roy A., *Fundamental Theory of Servomechanisms* Van Nostrand Co., New York, 1945.
- Marx, K. and Engels, F., *Selected Correspondence*. Progress Publishers, Moscow, 1965.
- Maxwell, J. C., On governors. *Proc. Roy. Soc. London*, 16, 1868, 270-283. Reprinted in Bellman and Kalaba, 1964, 3-17.
- McCulloch, W. S., *Embodiments of mind*. M.I.T. Press, Cambridge, Md., 1965.
- Millas - Vallicrosa, J. M., Translations of Oriental Scientific Works (to the end of the Thirteenth century). In: Métraux, G. S. and Crouzet, F., editors. *The Evolution of Science*, p. 128-167. New American Library, New York, 1963.
- Minorsky, N., Automatic steering tests. *J. Amer. Soc. Naval Engineers*, 42, 1930, 285-310.
- Morpurgo, E., *L'Orologio e il Pendolo*. Edizioni 'la Clessidra', Roma, 1957.
- Morrison, P. and Morrison, E., *Charles Babbage and his Calculating Engines*. Dover T 12, Dover Publ., Inc., New York 1961.
- Needham, J., *Science and Civilisation in China, Vol. IV: Physics and Physical Technology, Part II: Mechanical Engineering*. At the University Press, Cambridge 1965.
- Nyquist, H., Regeneration theory. *Bell System Techn. J.*, 11, 1932, 126-147. Reprinted in Bellman and Kalaba, 1964, 83-105.
- Perrault, C., *Les Dix Livres d'Architecture de Vitruve*. Coignard, Paris, 1673.



- Poncelet, J. V., *Cours de Mécanique appliquée aux Machines*, I et II. Gauthier-Villars, Paris, 1874.
- Price, D. J., Precision Instruments: to 1500. Chapter 22 in Singer, *et al.*, vol. III, 1957.
- Rademaker, O., *Uit de keuken der regeltechniek*. Inaugurele oratie Eindhoven. Waltman, Delft, 1960.
- Rolt, L. T. C., *Thomas Newcomen, the Prehistory of the Steam Engine*. Mac Donald, London, 1963.
- Rosenblueth, A., Wiener, N. and Bigelow, J., Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science*, 10, 1934, 18-24.
- Rubin, M. D., History of Technological Feedback. Chapter 2 in Milsum, J. H., ed. *Positive Feedback*. Pergamon Press, London, 1968.
- Schmidt, H., Die Entwikcklung der Technik als Phase der Wandlung des Menschen. *Zeitsch. Vereines Deutscher Ingenieure*, 96, 1954, 118-122.
- Schmidt, M. C. P., *Kulturhistorische Beiträge zur Kenntniss des Griechischen und Römischen Altertums, II Die Entstehung der Antiken Wasseruhr*. Dürr, Leipzig, 1912.
- Schmidt, W., *Herons von Alexandria Druckwerke und Automatentheater. Im Anhang Herons Fragment über Wasseruhren, Philons Druckwerke, Vitruvs Kapitel zur Pneumatik*. Griechisch und Deutsch herausgegeben. Teubner, Leipzig, 1899.
- Sequin A. et Lavoisier, A. L., Premier mémoire sur la respiration des animaux. *Mém. (Histoire) Acad. Sci. Paris*, 1789, 566-584.
- Shannon, C. E., A mathematical theory of communication. *Bell System Techn. J.*, 27, 1948, 379-423 and 623-656.
- Singer, C., Holmyard, E. J. and Hall, A. R., editors., *A History of Technology*. Vol. I - V. At the Clarendon Press, Oxford, 1954-1958.
- Spierdijk, C., *Klokken en klokkenmakers*. 3e druk, De Bussy, Amsterdam, 1967.
- Spinoza, *Ethica*, Vertaling H. Gorter. Loman en Funke, 's Gravenhage, 1895.
- Van der Pol, B., Forced oscillations in a circuit with non-linear resistance (reception with reactive triode). *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 3, 1927, 65-80. Reprinted in Bellman and Kalaba, 1964, 124-140.
- Van Helmont, J. B., *Dageraad ofte Nieuwe Opkomst der Geneeskunst, in verborgen grond-regulen der Nature*. Naerus, Rotterdam, 1660.
- Vaux, C. de, Notice sur deux manuscrits Arabes, *J. Asiat*, 8, Band 17, 287-322, 1891.
- Vitruvius, IX, 9, zie: Perrault, 1673, p. 264-269. Schmidt, W. 1894, p. 491, 492. Schmidt, M. C. P., 1912, p. 47.
- Von Brunn, W. L., *Krieslauffunktion in William Harvey's Schriften*. Springer-Verlag, Berlin, 1967.
- Von Mises, R., Regulierung des Machinenganges. *Encyclopädie Mathematischen Wissenschaften* vol. IV, part 2, 1911, 254-296.
- Von Neumann, J., *The Computer and the Brain*. Yale University Press, New Haven, 1958.
- Von Uexküll, J. und Kriszat, G., *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen*, 1934. Herausgabe, Rowolt, Hamburg, 1956.

- Vries, J. de, *Etymologisch Woordenboek*. Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen, 1958. (De woorden *steunen, steur, storen, stutten en stuurs*).
- Whitrow, G. J., *Het Tijdsbegrip in de Moderne Wetenschap*. Aula-boeken 208, Utrecht/Antwerpen, 1965.
- Wiedemann, E., Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften X. *Sitzungsberichte der Physikalisch - medizinischen Sozietät in Erlangen*, 38, 1907, 340.
- Wiedeman, E., Über die Uhren im Bereich der islamischen Kultur. *Nova Acta*, Band 100 nr. 5, 1915.
- Wiedemann, E. und Hauser, F., Uhr des Archimedes und zwei andere Vorrichtungen. *Nova Acta*, Band 103, nr. 2, 1918.
- Wiener, N., *Cybernetics* original edition 1948, reprinted in: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2<sup>d</sup> edition, M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1961.
- Wiener, N., *The Human Use of Human Beings* Doubleday, New York, 1954 (re-written; original edition: 1950).
- Wischnegradskii, M., Sur la théorie générale des régulateurs. *Comp. Rend. Acad. Sci. Paris*, 83, 1876, 318-321.