

INFORMATIETHEORIE

door
Prof. ir J.L. van SOEST

Wanneer ik naar een bericht luister of een vogel hoor fluiten, wanneer ik een film zie of een meetinstrument controleer, of wanneer ik een brief lees, dan ontvang ik, met behulp van mijn zintuigen, informatie uit de wereld buiten mij. Deze informatie wordt voor een deel in mijn denkvermogen verwerkt en gedeeltelijk in mijn geheugen bewaard. Ook kan ik informatie afgeven door het gebruik van een taal, zij het gebaren-, spreek- of schrijftaal. Deze inleiding toont dat informatie een woord is, dat tot de Nederlandse taal behoort en dat daarin even gebruikelijk is als de woorden tijd, massa, kracht, arbeid enz. Even goed als deze woorden in vorige eeuwen als exacte begrippen in de natuurwetenschap zijn opgenomen en voor de ontwikkeling dier wetenschap van enorme betekenis zijn geworden, staat het thans met het woord informatie, iets dat als exact begrip nader gedefinieerd zal worden.

Vooraf moet informatie los gemaakt worden van het zojuist er in gelegde menselijke element, want in primitievere vorm speelt informatie een rol in de gehele levende en levenloze natuur. Als, bij voorbeeld, een gramfoonplaat bij het snijden informatie heeft ontvangen, wordt zij de draagster van een geheugen, dat tot afgifte van informatie in staat is. Ook de fotografische plaat ontvangt bij belichting informatie, die tot een geheugen gefixeerd kan worden. In de techniek der machines onderzoekt men informatiedoorstroming in verschillende machinedelen; in de ontwikkeling der grote rekenmachines spelen het geheugen en de informatiebesturing een grote rol, enz.

Informatie wordt getransporteerd, hetzij gedragen door een massa, zoals een brief of een gramfoonplaat, hetzij op een energetische drager, zoals een trilling of een golfing. In het eerste geval is het meer een transport van geheugen, van informatie in een geconserveerde vorm, in het laatste meer rechtstreeks van informatie zelf; veel verschil maakt dit overigens niet uit. Zulk een transport heet *communicatie* en de getransporteerde informatie heet *signaal*.

Een eenvoudig signaal kan men voorstellen volgens fig. 1, waarin horizontaal de tijd wordt aangegeven en verticaal de sterkte van het signaal op elk tijdstip. De totale energie, die in dit signaal aanwezig is, komt overeen met het in de figuur aangegeven oppervlak. De informatie, die het signaal bevat, is met deze gegevens nog niet bekend.

Bij elk signaal is een *storing* aanwezig, hoe klein ook. Als gevolg van de heersende temperatuur T (in graden Kelvin) is deze storing evenredig met T ; dit is dezelfde thermische storing, die verantwoordelijk is voor de Brown-beweging, zoals die bij kleine deeltjes gezien kan worden en die ook verantwoordelijk is voor ruisverschijnselen in radiotoestellen.

Als deze storing in energiemaat wordt aangegeven is zij in de figuur als een oppervlakje van bepaalde grootte te tekenen, zie de verdeling in blokjes.

88 sterkte

fig. 1

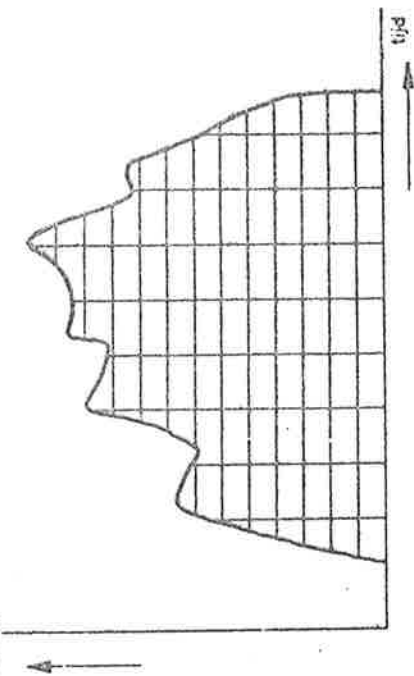


fig. 2

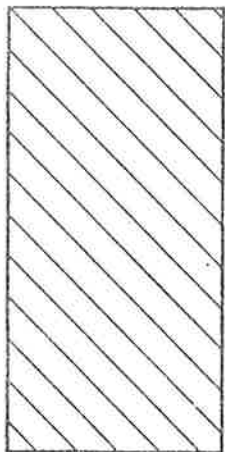
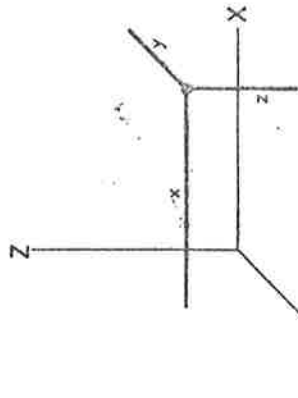
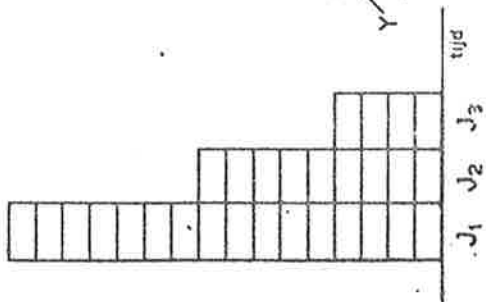


fig. 3



fig. 4



Het aantal blokjes bepaalt de informatiehoeveelheid van het signaal. Hoe kleiner de storing, dus het oppervlak van het blokje, hoe meer informatie in het signaal aanwezig is, hoe groter, in ingenieurstaal, de signaal/ruisverhouding is.

De vorm van de blokjes, die bij gegeven temperatuur dus een bepaald oppervlak bezitten, hangt af van de nauwkeurigheid, waarmee de tijdas bekeken moet worden. Elke gebeurtenis in de natuur heeft een tijdconstante, een karakteristieke tijd voor opbouw of afbraak; ook een signaal heeft dat, hoewel men daar meestal spreekt van het begrip bandbreedte van de frequenties in het signaal; men kan bij voorbeeld denken aan de band van toonfrequenties, die in een geluidssignaal, als de menselijke stem, voorkomen.

Hoe kleiner de tijdconstante van het verschijnsel is, waarbij het signaal optreedt en hoe groter de frequentiebandbreedte van dit signaal is, hoe rijner de tijdas in stukjes wordt verdeeld en hoe smaller het storingsrechthoekje, maar tegelijkertijd hoe hoger het is.

Niet elk signaal is zo eenvoudig als het getekende, maar meer gecompliceerde signalen zijn tot dit elementaire model terug te brengen zonder dat de algemene definitie van het begrip informatie daaronder lijdt (1).

Een signaal is afkomstig van een *informatiebron*, die informatie uitzendt. Zulk een bron is een informatiereservoir met een zekere hoeveelheid inwendig aanwezige informatie, die geleidelijk verloren kan gaan door het uitzenden. Soms, bij dier of mens, is het bij-genereren van informatie mogelijk door een hersenfunctie, zodat de afgegeven informatie niet verloren gaat; anders zou de leraar gelijktijdig vergeten, wat hij zijn leerlingen leert. Maar de grammofoonplaat, die bij het snijden ingesneden is op tienduizend maal reproduceerbaarheid, is na tienduizend maal afdraaien op haar storingsniveau versleten.

Dergelijke gedachten leiden tot een zeer boeiende vergelijking van het begrip informatie en van het, een eeuw oudere, begrip *entropie* (2), waarvoor men eerst moet teruggaan naar de twee hoofdwetten van de thermodynamica, die wellicht de belangrijkste hoofdwetten der natuur zijn. Zij zeggen kortweg dat, bij het beschouwen van een energetisch afgesloten systeem, de energie gelijk blijft in kwantiteit, maar op den duur gemiddeld in kwaliteit achteruit gaat. Dit achteruitgaan in kwaliteit wil zeggen dat de vervlakking in het systeem toeneemt, of wat hetzelfde is en wat de physicus exacter heeft gedefinieerd, dat de entropie toeneemt. Men meet entropie als een energie, gedeeld door een temperatuur. Informatie wordt gemeten als een energie, gedeeld door een met temperatuur evenredige storing. Er is geen bezwaar de informatie-maat zo te kiezen, dat de evenredigheidsconstante gelijk aan 1 wordt gesteld, zodat informatie dan ook gemeten wordt in een energie, gedeeld door een temperatuur, op dezelfde wijze als entropie.

Bij nadere beschouwing blijkt dan dat in een systeem op den duur, bij het toenemen van de entropie, de inwendig aanwezige informatie met een gelijk bedrag is afgenomen, dat dus hun som in het systeem gelijk blijft. Dit is een wet voor het gezamenlijke behoud van entropie en informatie, die men gevoeglijk een nieuwe hoofdwet der thermodynamica zou mogen noemen.

Dit stel wetten heeft voor de levende natuur een belangrijke consequentie. Kenmerkend voor de levende natuur is haar verzet tegen de gevolgen van de tweede hoofdwet, een strijd tegen entropieverhoging en vervlakking: waarom zou anders een boom omhoog groeien, een mens kunst beoefenen en in het algemeen elk levend wezen een scheppingsdrang bezitten?

Als men het levende wezen bestudeert als deel van zijn omgeving, waarmee hij in energie-uitwisseling is, moet deze strijd tegen de natuurwet voor hemzelf met zijn omgeving hopeloos zijn (3), maar wel is het zo, dat het levende wezen zich zelf in een zo gunstig mogelijke positie ten opzichte van zijn omgeving tracht te plaatsen, waarbij het in zekere zin zijn entropiedeel vermindert ten behoeve van zijn omgeving.

In de wetenschappelijke wereld heeft men zich lang afgevraagd of men deze hoofdwet niet zou kunnen ontduiken met behulp van listen, die men in het gedachte-experiment liet uithalen door hypothetische wezens, z.g. Maxwell-demonen. Stel een vat met moleculen met een scheidingswand in het midden, waarin een sluis is aangebracht; stel verder dat de demon sluiswachter is en enkel moleculen toegang geeft in één richting en toegang weigert in de andere richting; dan zou er na enige tijd een drukverschil in de twee vathelften zijn en zou de entropie verminderd zijn. Het is echter op theoretische gronden bewezen (4) dat zulke wezens zeer spoedig zelf slachtoffer worden van hun eigen werkzaamheid door uitwisseling van informatie met hun omgeving, dat zij daardoor opgenomen worden in de temperatuurstoringen van hun omgeving, hetgeen met een sterf-verschijnsel vergelijkbaar is.

Het begint thans duidelijk te worden dat de levende natuur weinig anders reageert dan deze demonen; ook hier eindigt de strijd tegen vervlakking op een zeker ogenblik met de dood van het individu.

In het licht van de wet van behoud van entropie en informatie kan men de strijd van het levende wezen tegen entropie-verhoging vertalen in een streven voor informatie-opname en drang tot schepping.

Is dit niet iets, waarvan wij reeds lang overtuigd zijn?

In een energetisch afgesloten systeem neemt de entropie dus op den duur toe en de informatie af (fig. 3). Het einde van elk systeem is de *chaos*, als alle informatie verloren is gegaan, zo dat geen interne wetten en betrekkingen meer bestaan. Maar het begin betekent een *schepping*, waarbij, naast een zekere hoeveelheid entropie, een zekere hoeveelheid informatie in het geschapen systeem moet zijn meegegeven; daarna volgt het systeem de tweede wet der thermodynamica, voorzover door een nieuwe scheppende daad niet nieuwe informatie wordt toegevoerd, op welk ogenblik dat systeem dan ook niet energetisch gesloten kan zijn. Vergelijk de beeldhouwer, die zijn monument schept, waaraan de tand des tijds knaagt en waarvan een ge-erodeerde plaats door een reparateur wordt hersteld.

Men gelooft dat de grote Schepping der Wereld uit een chaos is geschied. Dit betekent dat, met de Goddelijke daad, een zeer grote hoeveelheid informatie moet zijn toegevoerd om uit die chaos een geordende, informatierijke wereld te maken, waarin wij leven en waarvan wij de wetmatigheden trachten te

leren kennen. Het bovennatuurlijke in de wereldschepping, onbegrijpbaar volgens de tweede hoofdwet, komt in deze beschouwing wel vol diepe zin naar voren.

Wij keren terug naar het eenvoudige signaal (fig. 1); indien dit zo eenvoudig zou zijn dat slechts drie kolommen van storingsblokjes aanwezig zouden zijn met I_1 , I_2 en I_3 blokjes per kolom (fig. 4), dan zou men het karakter van het signaal, de z.g. *informatiestructuur*, kunnen aangeven in de 3-dimensionale ruimte met assen X , Y , Z .

Zet men dan als coördinaten af $x = \sqrt{I_1}$, $y = \sqrt{I_2}$, $z = \sqrt{I_3}$ dan wordt $r = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} = \sqrt{(I_1 + I_2 + I_3)}$ en $r^2 = I_1 + I_2 + I_3$, de waarde van de totale informatie. Het signaal is dus in deze ruimte te beschrijven als een stip met de coördinaten x , y en z . Die ruimte noemt men dan de informatieruimte, omdat alle signalen (van drie kolommen storingsblokjes) als punten in deze 3-dimensionale ruimte kunnen worden aangegeven. Een signaal bestaat echter in het algemeen uit veel meer kolommen, soms miljoenen. Dan schiet het aantal dimensies van onze ruimte te kort om de informatiestructuur af te beelden en moet de informatietheoreticus de mathematicus volgen naar de wereld van de veel-dimensionale, desnoods miljoen-dimensionale informatieruimte. Miljoen is overigens nog niet veel: een orkeststuk is per minuut ongeveer miljoen-dimensionaal, de hoeveelheid informatie per minuut kan in dit orkeststuk, afhankelijk van de signaal/ruisverhouding, in het miljard bedragen.

Bepaald groot lijken deze getallen, die informatie-eenheden aangeven. Maar de wijsheid van de natuur en de techniek van het levende lichaam beperken deze formidabele informatiestroom in grote mate, als deze naar onze hersenen vloeit.

Laat ik beginnen een poes te beschrijven door, met behulp van een of ander signaal, de volledige informatie omtrent die poes te geven; dat kan bijv. met televisie-beelddatastoring geschieden, of door een beschrijving voor te lezen. De poes, haar voor haar, onderdeel voor onderdeel beschreven, vergt enorme, vele miljoenen tellende structurele informatie, die als een stip in de vele miljoenen-dimensionale informatieruimte een plaats krijgt. Een andere poes geeft een andere stip, een derde weer een andere en als de eerste poes zich verroert, verandert ook haar informatie een weinig en beweegt de stip zich iets in de informatieruimte. Samen vormen alle poesen, in alle soorten en standen, een stippencomplex, dat een deel is van deze onvoorstelbaar ingewikkelde informatieruimte. Dit poesendeel der ruimte is een ander deel dan dat der tijgers, madelieven en tafels. Dit wil zeggen dat de mens de informatieruimte indeelt in brokstukken en elk der brokstukken identificeert met bepaalde *begrippen*, die hij in zijn kennisbeeld heeft opgenomen. Niet de details van triljoenen stippen, maar de tienduizenden brokken der informatieruimte, die met begrippen overeenkomen, zijn de informaties, min of meer gestandaardiseerde eenheden voor het menselijk brein geworden. Daarmee heeft hij zijn kennisbeeld omtrent de wereld buiten hem geordend, zonder dat zou hij „door

de bomen het bos niet zien". Hoe het menselijk brein dit verwezenlijkt is heel moeilijk te begrijpen; de gestalteleer tracht dit raadsel mee op te lossen.

Bijna elk ogenblik stroomt nieuwe informatie in het menselijk brein binnen, waardoor hij zich bewust wordt van het voortschrijden van de tijd. Informatievergroting van zijn kennisbeeld is identiek met voortschrijden van zijn „psychische” tijd, die iets anders is dan de regelmatig gaande tijd van de levenloze natuur, die door klokken zo nadrukkelijk aan ons wordt voorgezet, dat wij ons de psychische tijd nauwelijks meer realiseren.

Het is goed even te overdenken wat geschiedt als ik tegen iemand „regen” zeg. Laten wij eerst denken wat energetisch geschiedt. Mijn bevel uit de hersenen veroorzaakt elektrische stroomstootjes in een aantal zenuwen en mechanische trillingen van mijn spreekorgaan, door spieren geregeld; het gevolg is een geluidsgolf, die zich naar de oren van de luisteraar begeeft, waar de geluidstrillingen mechanische trillingen van het gehoororgaan veroorzaken en in elektrische stroomimpulsen van de geprikkelde zenuwen; deze elektrische energie komt aan de hersenperipherie en wordt er omgezet in iets, dat de waarneming van de luisteraar mogelijk maakt. Aldus, energetisch bekeken, is het een spel van herhaalde transformaties van energievormen. Deze energievormen dragen alle het informatiesignaal, dat wij nu gaan overdenken. Mijn brein dacht „regen” en mijn wil veroorzaakt een signaal, dat het begrip „regen” codeert op de zenuwtanen; dit signaal is een pulscodesignaal, dat de natuur miljoenen jaren geleden als codeersysteem uitvond in de eerste hogere diersoorten en dat de ingenieur onbewust daarvan eerst enkele jaren geleden uitvond. De mechanische en acoustische trillingen, die „regen” zeggen, hebben het begrip in amplitude gecodeerd op de wijze, zoals aan het gesproken woord grafisch wel afbeeldt. Bij ontvangst van het signaal, dat door de geluidsgolf gedragen wordt, vindt in de zenuwtoppen van het oor van de luisteraar weer een nieuwe transformatie plaats tot een pulscode, waarna aan de peripherie van onze psyche de pulsjes zonder enige moeite als „regen” worden begrepen.

Dit lijkt alles haast te wonderlijk en toch is dit slechts een elementair voorbeeld van de communicatie van mens tot mens.

De mens heeft op het dier een zeer grote voorsprong door de vergaande ontwikkeling van een *spreektaal*. De begripsvorming in het kennisbeeld heeft bij de mens, niet bij het dier, geleid tot de codering der begrippen in woorden van de taal. Het dier kent de gebaren-, de reuk-, een primitieve taal van geluiden, maar de mens heeft duizenden woorden ter beschikking, die hij uit phonemen (dat zijn „spreekletters”) opbouwt en hij bezit de kunst om aaneengesloten woorden, dat zijn zinnen en om zinnen samen te voegen tot een lange toespraak, waarmee hij zijn gedachten nauwkeurig kan overbrengen op een ander mens van zijn samenleving. Zelfs bezit het mensdom vele spreektaalen, die in elkander codeerbaar of vertaalbaar zijn.

Bovendien beschikt de mens nog over een even volmaakte taal: de *schrijftaal*, met echte letters als eenheid; door het regeren van zenuwen, spieren en

hand schrijft hij letters, woorden, zinnen tot dikke boeken toe.

Elke taal heeft een zeer speciaal karakter, waarvan wij de eigenschappen kunnen aangeven door een *statistische* ontleding (5). Laten wij ons tot de Nederlandse schrijftaal *) beperken. De letters van het alfabet komen niet in gelijke mate voor, er is een letterfrequentie, typerend voor het Nederlands. Daarom is een letterrij van statistisch willekeurig aaneengerijde letters (inclusief een misteken) geen Nederlands:

nucqayheupivrbp.pribebwrypo.nlzngdvraidxnwoormscjlvpmrdbdhfzsbth.

Houd ik rekening met de letterfrequentie *), dan is een op statistische methode aaneengeregen rij letters nog steeds geen Nederlands:

et,fejuwren,gol,mekt,m,venkle,map,hte,k,hijk,bompeen,zaaf,wekkje.

Overigens is de rij reeds iets beter uitspreekbaar. Ook is er een bigramfrequentie, d.w.z. ook twee letters achter elkaar hebben tezamen een frequentie, die niet bepaald wordt door de frequentie van de beide letters afzonderlijk; houdt men daarmee rekening, dan ontstaat b.v.:

nen,dat,aar,zee,avonk,niet,ondwoorgekop,die,met,wen,machaanlaart.

Dit is nog geen Nederlands, maar toch reeds meer dan b.v. Engels. Zo kan men doorgaan rekening te houden met de statistische eigenschappen van 3, 4, 5, enz. opeenvolgende letters; dan komen langzamerhand de Nederlandse woorden te voorschijn. Overstappend op Nederlandse woorden kan men nagaan hoe rekening moet worden gehouden met de frequenties in de opeenvolging van 2 en 3 woorden, waarvoor de beide volgende voorbeelden dienen, wederom statistisch samengesteld:

niet hadden ze nog was zodat Holland spoedig dicht bij hen toe te zullen een bodem. Wat denk dat door het zand niet.

Maar in het water dat de dijken over is van het werk zei hij tegen het water door het gevaar was.

Dit laatste begint al een aardig staaltje van Nederlands te worden, hoewel niet meer dan met de trigramwoordenconstructie is gerekend.

Hoe sterker deze statistische eigenschappen in een taal optreden, hoe karakteristieker een taal is, hoe meer zij afwijkt van „ruis“. In een ruistaal zou elke letterrij betekenis hebben en zou ik met 26 letters en enkel woorden van drie letters reeds meer dan 17000(26³) begrippen kunnen aangeven; hieruit blijkt dat een ruistaal, die in statistisch opzicht volkomen karakterloos is, uitermate gecomprimeerd is en dat een taal, zoals het Nederlands met zijn karakteristiek, overvloedig is. Men kan nagaan dat de overvloedigheid ongeveer 2/3 bedraagt, hetgeen ruwweg zegt dat wij ons schrift 3 x konden bekorten. Arkortingen zijn trouwens gebruikelijk: b.v., e.a. enz. In het Helreeuwse schrift is men b.v. gewend de klinkers weg te laten.

In de ruistaal zou men elk letterkwadraat als een kruiswoordpuzzel kunnen gebruiken; hoe overvloediger een taal is, dus hoe karakteristieker, hoe moeilijker het wordt. Geheimcodes moeten om onontwarbaar te zijn zeer weinig

*) Ontleend aan het Nederlands van den Doolaard in „Het Verjaagde Water“.

karakteristiek zijn en het ruiskarakter benaderen.

Muziek, evenals elke andere uitdrukkingwijze van de mens, kan als een soort taal of code worden opgevat. In deze gedachtengang bezit de melodieuze, klassieke muziek een grote overvloedigheid; veel moderne werken bezitten die veel minder, waardoor zij chaotischer zijn en ruis nabijkomen.

Het zijn de statistische eigenschappen van een taal, van een code in het algemeen, die het mogelijk gemaakt hebben uit de informatietheorie een *communicatietheorie* (5) op te bouwen, die er op gericht is codes over te brengen. Daarmee gelukt het een fundament te geven aan de techniek der communicatie, zoals telefoon, telegraaf, radio, e.d. op informatorische grondslag. Het is een theorie, die bijzonder moeilijk is door de grote mate, waarin mathematische methoden uit de wiskundige statistiek en de statistische mechanica, naast die uit de functieleer gebruikt moeten worden; het is ondoenlijk deze in dit bestek nader uiteen te zetten.

Dicht aan de communicatietheorie verwant is de *cybernetica* (6) of vertaald: stuurmanskunde, een wetenschap, die zich baseert op informatiesturing in organieke stelsels, zowel levende organismen als machines. Ook hier zijn de mathematische hulpmiddelen niet minder zwaar. Een nauwere koppeling dezer twee takken van wetenschap ligt in het programma der komende jaren en dit zal ongetwijfeld van groot belang blijken te zijn.

Opvallend is dat de toepassingen der informatietheorie zeer bevruchtend werken op een grote groep technische problemen, waarin de techniek van de levenloze materie (techniek in strikte zin) en van de levende materie (fysiologie) hand in hand gaan en tot een reeks van parallelen voeren. De ingenieur wordt bescheiden als hij de wijze bewondert, waarop de levende natuur over een techniek beschikt in zintuigen, zenuwen, hersenen en waar ook. De fysioloog grijpt voor zijn problemen naar de vernuftige, exacte behandelingsmethoden, waarover de ingenieur beschikt. Begrippen uit elk der beide terreinen dringen meer en meer in elkander door, zo spoedig verschijnselen van informatieontvangst, -transport, -verwerking, -bewaring en -afgifte ter sprake komen. De techniek is daarbij enigszins in het offensief, wanneer men bedenkt dat machines geconstrueerd worden, die behoorlijk wiskundige arbeid kunnen presteren of andere vormen van instinct bezitten, zonder dat men dit verstand mag noemen. Men heeft machines geconstrueerd met mechanisch of electrisch geconstrueerde zintuigen, die informatieprikkels verwerken en de machine bijv. in de prikkelrichting in beweging zetten; zelfs zijn machines aangegeven, die een behoorlijke partij kunnen spelen (7). Het intuïtieve element in het verstand ontbreekt in deze constructies natuurlijk te enen male.

Ook in de gemeenschapsleer (sociologie) zal het informatiebegrip een grote invloed gaan uitoefenen, maar in de laatste jaren van het bestaan van een informatietheorie is op dit gebied nog niet veel werk openbaar gemaakt.

De *geschiedenis van de informatietheorie* is nog zeer jong. Na een korte voorbereiding (Fisher, Hartley, e.a.) komen omstreeks 1947 de pennen los. In Engeland brachten Gabor en Mackay de fundamenteën van de informatietheorie in engere zin aan. In de V.S. van Amerika ontwikkelde zich, in klem reeds

oorlogstijd, de cybernetica-school onder leiding van Wiener met McCulloch, Fano, Lee, e.a., met de M.I.T. te Boston als brandpunt. Daarnaast gaf Shannon in grote stijl de theorie der communicatie (Bell laboratorien).

Buitenstaanders hebben uit beschouwingen, als hier gegeven zijn, wel afgeleid dat de informatie-theorie en haar consequenties een uiterste vorm van materialisme zouden zijn. Toegegeven kan worden dat vele der wonderlijke dingen uit de techniek der levende natuur exacter begrepen zijn of op het punt staan begrepen te worden; maar dit zijn nog dingen in de levende stof die typisch tot het exacte terrein der natuurwetenschap gerekend mogen worden; zij raken de levensproblemen zelf niet.

Integendeel, het materialisme, dat in de wetenschap reeds onttroond is door de moderne atoomtheorie en haar gevolgen op het causaliteitsbeginsel, krijgt nog een genadestoot van de informatietheorie in haar gehele omvang, want juist deze theorie laat zeer scherp zien dat er in de levende natuur een grens is tussen een bolster en een kern. De bolster is dat deel, dat voor de exacte wetenschap vatbaar is of nog kan worden. De kern ligt achter de te bereiken limiet, ondoordringbaar en ondoorgrondbaar verborgen houdend het Wonder en het Eeuwige raadsel van het leven. Tot aan de bolster kan de kennis reiken, in de kern huist het Geloof, waarin het geheim van de scheppingskracht en de strijd tegen de meest medogenloze wet van de Natuur, de tweede hoofdwet, verborgen ligt.

In het Aardse Paradijs heeft de mens geproefd van de Boom der Kennis en hij zal deze kennis tot aan de limiet trachten te verwerven. Van de Boom des Levens is de mens afgehouden; zijn kennis van het eeuwige leven zou in strijd zijn met de tweede hoofdwet. In die kern zal de exacte kennis niet doordringen.

Literatuur, o.a.:

1. D.M.Mackay ~ Quantal aspects of scientific information; *Phil.Mag.* **41** (1950) 289.
D.Gabor ~ Theory of communication; *J.Inst.El.Eng.* 111 (1946).
2. D.M.Mackay ~ Entropy, time and information; *Rep.Proc.Symposium Information theory*, London (1950) 162.
3. W.J.Burgers ~ Over de verhouding tussen het entropiebegrip en de levensfuncties; *Verh.Kon.Ak.Vet. te S.* 18 no. 3 (1943).
4. L.Szillard ~ Ueber die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen; *Zt.f.Phys.* (1929) 840.
5. C.E.Shannon ~ A mathematical theory of communication; *Bell Syst.T.J.* **27** (1948) 379, 623.
6. N.Wiener ~ Cybernetics, 1948.
N.Wiener ~ Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series, 1949.
N.Wiener ~ Human use of human beings, 1950.
7. C.E.Shannon ~ Programming a computer for playing chess; *Phil.Mag.* **41** (1950) 256. (zie ook: *Electronics* **24** (Sept. 1951) 81).