

Natuurlijke intelligentie

Enkele andere boeken van Uitgeverij Nieuwezijds

RESING & DRENTH Intelligentie
GARDNER Soorten intelligentie
BERRYMAN Psychologie van alledag
EKMAN De leugen ontmaskerd
EKMAN Gegrepen door emoties
DARWIN Het uitdrukken van emoties bij mens en dier
DARWIN De autobiografie van Charles Darwin
DARWIN Over het ontstaan van soorten
DARWIN De afstamming van de mens
BRAECKMAN Darwins moordbekentenis
HERMANS De dwaaltocht van het sociaal-darwinisme
SCHILTHUIZEN Het mysterie der mysteriën
ANDREASEN Schitterend nieuw brein
GREEN Schizofrenie ontsluit
KEESTRA (RED.) Tien westerse filosofen
KEESTRA (RED.) Doorbraken in de natuurkunde
VERMIJ De wetenschappelijke revolutie

De boeken van Uitgeverij Nieuwezijds zijn verkrijgbaar in de boekhandel. Zie ook: www.nieuwezijds.nl

Wim van de Grind

Natuurlijke Intelligentie

OVER DENKEN, INTELLIGENTIE EN BEWUSTZIJN
VAN MENSEN EN ANDERE DIEREN



UITGEVERIJ NIEUWEZIJD'S

Eerste editie augustus 1997
Tweede editie februari 2004

Uitgegeven door: Uitgeverij Nieuwezijds, Amsterdam
Omslagontwerp: Marjo Starink
Redactie: Berber Bast, Utrecht
Zetwerk: Nederhof Productie, Amsterdam

Copyright © 1997, 2004, W.A. van de Grind

Afbeelding omslag: Giuseppe Arcimboldo, *Das Wasser*, 1586,
Kunsthistorisches Museum, Wien.
Copyright afbeelding omslag © 1997, Kunsthistorisches Museum,
Wien.

ISBN 90 5712 186 7
NUR 770

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband, elektronisch of op welke andere wijze ook en evenmin in een retrieval systeem worden opgeslagen zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel dit boek met veel zorg is samengesteld, aanvaarden schrijver(s) noch uitgever enige aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en/of onvolkomenheden in dit boek.

Voorwoord

Dit boek gaat over denken, intelligentie en bewustzijn bij mens en dier, waarbij vooral aandacht wordt besteed aan de relatie tussen filosofische theorieën en feitelijk onderzoek aan hersenen en gedrag. Het is oorspronkelijk opgezet als studieboek bij een multidisciplinaire cursus aan de Universiteit Utrecht, waar biologiestudenten enige filosofische grondslagen leren en studenten ‘cognitieve kunstmatige intelligentie’ enige biologische grondslagen. Het onderwerp leent zich echter zeer goed voor een breder toegankelijke bespreking en zal veel mensen interesseren. Ik heb daarom getracht een zo helder mogelijke tekst te schrijven zonder te veel inhoudelijke compromissen. Iedereen die in staat is artikelen in tijdschriften als bijvoorbeeld *Scientific American* of in de wetenschapsbijlage van diverse landelijke dagbladen te begrijpen, zal het betoog kunnen volgen. Wat de neurowetenschappelijke aspecten betreft lijkt dit boek misschien hier en daar iets gedetailleerder dan voor de algemene lezer strikt nodig zou zijn. De betreffende passages kunnen zonder veel problemen worden overgeslagen door degenen die niet van plan zijn tentamen bij mij te doen. Ze zijn goed te onderscheiden van de rest van de tekst doordat ze links en rechts inspringen en in een kleinere letter zijn gezet. De terminologie hoeft echter niemand van lezing te weerhouden: achterin dit boek is een uitgebreide verklarende woordenlijst opgenomen.

Voor de *oplossing* van de vraagstukken uit dit boek is zeer preciese en omvangrijke kennis nodig over hersenen en gedrag, van moleculair tot populatieniveau, gekoppeld aan inzicht in evolutiebiologie en de fysische interacties tussen dier en habitat. Vakkundig uitgevoerd natuurwetenschappelijk onderzoek en hierop gebaseerde theorievorming dient het uitgangspunt te zijn in plaats van speculatie, introspectie en vooroordeel. Argumenten en tegenargumenten dienen zorgvuldig afgewogen te worden. Wat in dit boek behandeld wordt, is minimaal noodzakelijk voor de theorievorming over denken, emotie en bewustzijn (en op zich interessant!) maar zeker nog niet voldoende. Er is zeer veel meer door nieuwsgierigheid gedreven onderzoek nodig op dit

behalve wetenschappelijk, ook cultureel zeer belangrijke gebied.

Mijn vakgebied, de vergelijkende fysiologie, draagt veel professionele kennis bij ter oplossing van de vraagstukken van denken, emotie en bewustzijn in het dierenrijk. Die bijdragen vormen het zwaartepunt van mijn verhandeling. Als bindmiddel of kapstok worden klassieke meningen en overwegingen uit de filosofie gebruikt, maar mijn uitgangspunt is dat vraagstukken van denken, leren, intelligentie en bewustzijn in het dierenrijk (inclusief de mens) vooral natuurwetenschappelijke vraagstukken zijn. Ik heb groot respect voor de vele scherpzinnige denkers in filosofie en psychologie, maar beschouw hun bijdragen als terreinverkenningen, als schets van mogelijkheden. De biologie levert als snel evoluerende natuurwetenschap de beste middelen en kennis om ons te verdiepen in de feitelijkheden. De psychologie in Nederland heeft nog steeds tamelijk weinig interesse in de evolutietheorie, neurowetenschap en de universalia van het leven. Het tegenwoordig populaire functionalisme of de computationele richting in psychologie en kunstmatige intelligentie vertegenwoordigen onhoudbaar extreme standpunten, zoals ik in dit boek betoog. De fysiologie, neurowetenschap en experimentele psychologie zijn qua interesse en middelenverdeling vrijwel uitsluitend op de mens georiënteerd. Hoewel men in die wetenschappen wel proefdieren gebruikt, ziet men die dieren toch vooral als modelmensjes in plaats van als intrinsiek interessante individuen. De vergelijkend fysioloog daarentegen beoefent de wetenschap van de levensverrichtingen (fysiologie) in evolutionaire context en interesseert zich dus voor alle dieren, inclusief de mens.

Auteurs die in een ivoren toren leven zijn allang uitgestorven. De huidige dynamiek van de universiteit garandeert dat niets tot stand komt zonder enorme aantallen interacties met andere personen, die motiveren, steunen, financieren, promoveren, studeren, meten, denken, simuleren, rekenen, beoordelen, besturen, beheren, en wat al niet. Ik ben allen die me bij die interacties positief bejegenden zeer dankbaar voor hun steun en stimulatie. Vooral mijn collega's van de projectgroep Neuro-ethologie en van de rest van het ruim tachtig jaar oude laboratorium voor Vergelijkende Fysiologie hebben me met vakinhoudelijke en morele steun tot boekauteur opgezweept. Mijn dank gaat verder uit naar de vele studenten die in de loop der jaren mijn colleges hebben gevolgd en door goede of eigenwijze opmerkingen hebben laten zien dat onafhankelijk denken nog bestaat. Bij lezingen over de onderwerpen uit dit boekje heb ik in het hele land een hartverwarmend grote interesse ontmoet, wat ook sterk heeft bijgedragen aan de beslissing dit alles op te schrijven. Gert-Jan

Lokhorst (Erasmus Universiteit Rotterdam) heeft het boekmanuscript in zijn geheel zeer kritisch, maar ook welwillend, doorgelezen en me voor veel blunders behoed. Ik ben hem daar bijzonder erkentelijk voor. Dat ik nog enige passages of termen in de tekst heb laten staan die hem niet bevielen, is enerzijds te wijten aan mijn eigenwijsheid. Anderzijds is dit het onvermijdelijk gevolg van de verschillen in optiek tussen een medicus-filosoof zoals hij en een biofysicus-bioloog zoals ik. Ik draag dit boek op aan mijn echtgenote Åse, die het, net als de meeste van mijn opstellen uit de afgelopen 35 jaar, kritisch heeft gelezen en van gezond-verstand commentaar voorzien. Als er ergens iets onleesbaars, onverdedigbaars of irritants is blijven staan, ligt dat evenmin aan haar als aan de andere welwillend kritische lezers. Ik luister nu eenmaal niet altijd naar goede raad.

Wim van de Grind

Inhoud

1	Denken en leren bij dieren	1
1.1	Natuurlijke intelligentie	1
1.1.1	Zijn dieren intelligent?	1
1.1.2	De lessen van slimme Hans en slimme Lumpi	8
1.1.3	De soortspecifieke aard van het leren	12
1.2	Denken bij dieren	16
1.2.1	Een definitie van denken	16
1.2.2	Denken versus bewust denken	18
1.2.3	Ethologische evidentie voor denken bij dieren	22
1.3	Soorten leermethoden en leerprocessen	26
1.3.1	Instrumenteel leren	26
1.3.2	Klassiek conditioneren	28
1.3.3	Operante conditionering	32
1.3.4	Modern onderzoek aan leren bij dieren	35
1.4	Hersenprogramma's voor intelligent en autonoom gedrag	41
1.4.1	Hersenprogramma's	41
1.4.2	Intelligentie	45
1.4.3	Autonomie en intelligentie	49
1.4.4	Lichamelijke intelligentie	50
1.4.5	Het coïncidentieprincipe als basis van lichamelijke intelligentie	54
1.5	Uitgangspunten en opzet van deze studie van natuurlijke intelligentie	56
2	Neuroreductie van natuurlijke intelligentie	61
2.1	Wetenschappelijke versus persoonlijke en subjectieve kennis	61
2.1.1	Wetenschap als sociaal proces	61

2.1.2	Enkele spelregels van de wetenschap	64
2.1.3	Metafoor, theorie en model	70
2.1.4	Conceptanalyse	73
2.1.5	Natuurwetenschap versus religie en het scalpel van Occam	75
2.1.6	Misleiding door foutieve beeldspraak	78
2.2	Neuroreductie: van gedrag tot zenuwcel	84
2.2.1	Argumenten vóór en tegen reductie van biologie	84
2.2.2	Neuroreductie en de psychofysica	95
2.2.3	Neuroreductie vereist koppelhypothesen en analogiepostulaten	100
3	Waarneming en natuurlijke intelligentie	107
3.1	Het perceptieprobleem	107
3.1.1	Rationalisme versus empirisme als basis voor perceptietheorieën	107
3.1.2	Sensorische systemen als perceptiesystemen	112
3.1.3	Empirisme versus nativisme en het begin van een synthese	116
3.2	Enkele actuele perceptietheorieën	121
3.2.1	Elementarisme versus Gestalt	121
3.2.2	Enkele Gestalt-ideeën	123
3.2.3	Visuele kunst: van Gestalt tot schemata	127
3.2.4	De directe-perceptietheorie van Gibson (1979): perceptie als activiteit	134
3.3	Visuele (re)presentatie van ruimtelijke structuur	138
3.3.1	Waarnemen en bewegen zijn wederzijds onmisbaar	138
3.3.2	Het direct zien van vorm en abstracte concepten	145
3.3.3	Direct waarnemen van aantallen en plaatjeswaarneming bij dieren	156
3.3.4	Is de perceptuele ruimte Euclidisch?	161
3.4	Mogelijkheden tot neuroreductie in het kader van diverse perceptietheorieën	167
3.4.1	Elementarisme en neuroreductie	167
3.4.2	Gestalt-theorie en neuroreductie	168
3.4.3	Directe-perceptietheorie (direct realisme) en neuroreductie	171

4	Het zenuwstelsel tussen waarneming en actie	173
4.1	Homunculus en lichaam-geest probleem in neurowetenschappelijk perspectief	173
4.1.1	Het homunculusprobleem	173
4.1.2	Het lichaam-geest probleem	179
4.1.3	Evaluatie van een aantal opvattingen over het hersenen-geest probleem	185
4.2	Filosofisch idealisme versus realisme	196
4.2.1	De uitgangspunten	196
4.2.2	Realisme versus idealisme in de wetenschapstheorie	201
4.3	Eerste aanzetten tot functielocalisatie in het zenuwstelsel	204
4.3.1	Globale kenmerken van het zenuwstelsel van vertebraten	204
4.3.2	Functielocalisatie en functionele architectuur	212
4.3.3	De pariëtale areas 5 en 7	217
4.4	Corticale mechanismen van de visuele perceptie	221
4.4.1	Algemene eigenschappen van de retino-corticale projecties	221
4.4.2	Cellen in V2 als substraat van de perceptie van anomale contouren	228
4.4.3	Neuroreductie van het bewegingszien	230
4.4.4	De snelle toename van kennis over het bedradingsschema	230
4.4.5	Het bundelingsprobleem en de wederopstanding van de homunculus	232
5	Bewustzijn bij dieren	237
5.1	Uitgangspunten van een natuurwetenschappelijke studie van bewustzijn	237
5.1.1	Enkele biologisch-fysische uitgangspunten	237
5.1.2	Waarom extreem functionalisme (computationalisme) niet acceptabel is	242
5.2	Bewustzijn en het antropomorfe perspectief	245
5.2.1	Dieren missen essentiële menselijke eigenschappen	245
5.2.2	Taalvermogens bij dieren	250
5.3	Soorten bewustzijn	253
5.3.1	De wc-schakelaar	253

5.3.2 P- en A-bewustzijn volgens Block	254
5.3.3 Ervarings- (<i>E</i> -) en Toegangs- (<i>T</i> -)bewustzijn	257
5.3.4 Bewust zien en blindzien	261
5.3.5 Het <i>E</i> -bewustzijn, waardetoekenning en emoties	267
5.4 Cognitie, bewustzijn en hersenprogramma's	274
5.4.1 Zelfkennis en zelfbewustzijn in het dierenrijk	274
5.4.2 Niet-bewuste versus bewuste hersenprogramma's	281
5.4.3 Visuele geheugenprocessen	290
5.4.4 Visuele attentie	296
Nawoord	303
Verklarende woordenlijst	311
Literatuur	323
Index	333

I Denken en leren bij dieren

1.1 Natuurlijke intelligentie

1.1.1 *Zijn dieren intelligent?*

Kunnen dieren denken? Hoe intelligent zijn ze en welke emoties hebben ze? Hebben dieren een bewustzijn? Met dit soort vragen kun je vervelende recepties enig leven in blazen. Iedereen lijkt er een mening over te hebben en menige anecdoten over hond, kat, kanarie of hamster zal met smaak worden verteld. Dit boek gaat over de natuurwetenschappelijke aspecten van psychische verschijnselen bij dieren, inclusief mensen. Daarbij zijn anecdoten geen acceptabel uitgangspunt. Ik ga voornamelijk uit van de inzichten die ethologie en neurowetenschap verschaffen in de mentale (psychische) processen bij mens en dier, maar betrek er ook inzichten bij uit de filosofie, psychologie, robotologie, of wat verder ook maar nuttig lijkt. Vanuit de gekozen biologische optiek geldt dat denken, emoties en bewustzijn vrijwel zeker overlevingswaarde moeten hebben (gehad) en dat we deze fenomenen dus in principe ook elders in het dierenrijk kunnen verwachten. Er is biologisch gezien geen fundamentele kloof tussen mens en dier. Het gebruik van de aparte woorden 'mens' en 'dier' is in feite slechts een concessie aan het algemene spraakgebruik, waarin het woord 'dier' niet automatisch ook 'mens' omvat. Toch betekent evolutionaire continuïteit niet zonder meer dat we er van uit mogen gaan dat andere dieren dan de mens bewust denken of vergelijkbare emoties hebben. Immers, de verschillen tussen soorten kunnen in bepaalde opzichten heel groot zijn. Een mier is niet zo sterk als een beer, een olifant kan niet vliegen als een vogel, een kat heeft geen echolocatie als een vleermuis. Kortom, waarom zouden bewust denken of bepaalde emoties niet uitsluitend bij de mens en mogelijk in mindere mate bij enkele voorlopers van de mens tot ontwikkeling kunnen zijn gekomen? Iedere stelling over verschillen of overeenkomsten tussen soorten moet met weten-

schappelijke argumenten bevochten worden, ongeacht of het over een middenhandsbeentje of over mentale processen gaat. Met de term ‘natuurlijke intelligentie’ wil ik onder andere tot uitdrukking brengen dat het om mentale processen gaat in natuurlijke (niet-geconstrueerde) systemen en dat het meer over denken en intelligentie gaat dan over emoties. De term vormt ook een aardig contrast met ‘kunstmatige intelligentie’ de studie van cognitieve processen in machines. De mogelijkheden of onmogelijkheden van intelligentie in machines (geconstrueerde systemen) komen ook aan de orde, maar dan bezien vanuit de studie van natuurlijke intelligentie.

Natuurlijke intelligentie is een veel moeilijker en subtieler onderzoeksveld dan velen intuïtief menen. Er is al door generaties filosofen en psychologen over nagedacht en zelfs geruzied. Ethologen en neurowetenschappers zijn er zich geleidelijk aan ook steeds intensiever mee gaan bemoeien. Technici hebben het terrein bestormd in de hoop ervan te leren hoe je machines moet construeren die cognitieve taken kunnen vervullen voor de mens. Tegenwoordig betogen sommige fysici dat de quantenzwaartekracht of de ‘theorie van alles’ het bewustzijn zal verklaren en wijzen wiskundigen op het belang van de chaostheorie of niet-lineaire dynamica voor cognitie. Kortom er is veel hulp voor de arme bioloog die zich tot taak stelt cognitieve verschijnselen bij dieren te doorgronden. Nog radicaler is de hulp van denkers die vinden dat alle psychische termen geëlimineerd moeten worden en dat we alleen in prikkel-reactie (stimulus-respons) taal over gedrag mogen spreken. Zij vinden dat je met het zweverige onderwerp van de natuurlijke intelligentie al klaar bent voor je er mee begint. In een wetenschappelijke tekst over natuurlijke intelligentie moeten we met alle mogelijkheden rekening houden, ook met de mogelijkheid dat ons onderwerp in zekere zin niet bestaat, een gebied vol schijnproblemen is, voortgekomen uit warrig gebabbel en voorhistorische fysiologiekennis. We zullen gewoon al dit soort opties bespreken en de argumenten voor en tegen op een rij zetten.

Het is niet de bedoeling de lezer te winnen voor een bepaalde visie op de diverse heikele problemen van kennen en voelen (cognitie en emotie). Ik streef ernaar de verschillende opties zo objectief mogelijk te bespreken. Natuurlijk zal ik vaak aangeven wat ik van de diverse opties vind en in de keuze en formulering van de

argumenten zal zeker ook op veel punten een bevoordeling zichtbaar worden. Dat is echter niet bedoeld om te overtuigen, maar om te informeren. Gelukkig gaat het bij natuurlijke intelligentie niet uitsluitend over opinies en discutabele opvattingen, maar ook over empirische gegevens, feiten, en daarop gebaseerde modellen en theorieën. De studie van natuurlijke intelligentie omvat (of is) de studie van ‘hersenen en gedrag’, waarover al veel natuurwetenschappelijke kennis bestaat. Naar mijn mening kunnen alle problemen betreffende cognitie en emotie in principe aangepakt worden met de normale methoden van de natuurwetenschappen. We zullen echter alle zeilen bij moeten zetten om waarschijnlijk te maken dat dit geen onzinnige opvatting is. Bovendien komen we daarbij niet heen om enige terminologische haarkloverij. We moeten onder andere ingaan op de vraag wat we precies bedoelen met termen zoals denken, intelligentie, attentie, bewustzijn, perceptie, leren, natuurwetenschappen, evolutie, autonomie, enzovoorts. Dat is vervelend, want voor je het weet worstel je met ingewikkelde definities, met meervoudig vertakte zinnen, die vele malen gelezen moeten worden voor je ze doorgrondt. Als we niet oppassen vervallen we daarbij in een subtiele exegeze van teksten, alsof het om theologische of juridische zaken zou gaan. Dat dit niet geheel te vermijden is, kan met eenvoudige voorbeelden worden geïllustreerd. Stel iemand vat ‘denken’ op als praten in jezelf of deftiger gezegd als ‘talig redeneren’. Dan hoeft je het bij dieren niet te zoeken, behalve misschien bij papegaaien. Iemand anders definieert intelligentie als de score bij een IQ-test. Dan zijn er per definitie vrijwel geen intelligente diersoorten. Mijn streven zal zijn om waar redelijk en mogelijk voor dit soort termen een soortneutrale (dat wil zeggen biologisch zinvolle) definitie te geven.

René Descartes (1595-1650) ging ervan uit dat dieren automaten zijn, terwijl mensen een niet-materiële geest hebben. Denken en bewustzijn van de mens zijn in die opvatting uitingen van de geest en men kan er dus geen analogie van zoeken bij dieren. In ieder geval sinds het werk van Charles Darwin (1809-1882) is duidelijk dat de afstammingscontinuïteit tussen dier en mens in principe een behoorlijke mate van vergelijkbaarheid waarschijnlijk maakt. Op basis van de hypothese dat alle organismen moeten eten om te leven kunnen we bijvoorbeeld het zoeken naar voedsel door een hond en door een mens als analoog gedrag zien. De uitspraak ‘de hond heeft honger’ lijkt dan niet ver gezocht. Of de hond hierbij

ervaringen heeft die lijken op de onze wanneer we honger hebben, weten we natuurlijk niet. Bij dit type vegetatief-fysiologische analogieën als honger of dorst, warm hebben of kou lijden, raken de gemoederen minder snel verhit dan bij analogiepostulaten betreffende bewustzijn, vrije wil, denken, en dergelijke. Dat is terecht, want het is veel moeilijker voor mentale verschijnselen vast te stellen wat de overeenkomsten en verschillen tussen soorten precies zijn.

De uitdrukkingen ‘mentale processen’ en ‘psychische verschijnselen’ zullen als verzamelbegrippen dienen voor het geheel van processen of verschijnselen zoals subjectieve ervaringen, bewustzijn, denken (gedachte, idee), voelen (gevoel, emoties), willen (de wil), herinneren (geheugen), waarnemen, intuïtie, en dergelijke. Het gaat dus om vrijwel alle verschijnselen waarmee psychologie en epistemologie zich bezig houden. We kunnen dan bijvoorbeeld vragen naar de overeenkomsten en verschillen tussen mentale processen bij verschillende diersoorten of naar de belichaming van psychische verschijnselen in neuronale of neurohormonale structuren. Een andere interessante vraag is of mentale processen mechaniseerbaar zijn. Het gebruik van mentalistische termen betekent nog niet dat men meent dat die niet elimineerbaar zouden zijn. Een tegenstander van zulke termen zou ze ook goed kunnen gebruiken, al is het maar om bondig te kunnen samenvatten waarover gesproken wordt. (Bijvoorbeeld ‘vrije wil bestaat niet’). Het is onvermijdelijk in het volgende enige termen uit de vakliteratuur te gebruiken. Zelfs als er al een spreektaalversie van deze vaktermen is, dan nog heeft die meestal niet dezelfde algemeenheid of hij leidt tot omslachtige omschrijvingen. Zo zullen we niet ‘prikkel’ en ‘prikkelen’, maar ‘stimulus’ en ‘stimuleren’ schrijven (stimuleerbaar kan niet door prikkelbaar worden vervangen, zonder de betekenis te veranderen). ‘Reactie op een prikkel’ wordt ‘respons’, ‘in verband met de evolutionaire afstamming’ heet ‘fylogenetisch’. Fylogenie is de evolutionaire afstammingsgeschiedenis van een organisme. Ontogenie is de individuele ontwikkelingsgeschiedenis van een organisme en ontogenetisch is ‘in verband met de ontwikkelingsgeschiedenis van het organisme’. De technische termen zijn korter en krachtiger, flexibeler en universeler en worden dus niet gebruikt om geleerd te doen. In tegenstelling tot wat journalisten menen, maken technische termen het denken meestal eenvoudiger in plaats van moeilijker. Omdat de mens bovendien heel gemakkelijk nieuwe woorden leert, leek het me het bes-

te te kiezen voor de flexibelere en toch preciesere vakterminologie. Alle vaktermen zijn in de index opgenomen, waar nodig voorzien van een korte uitleg.

Subjectieve ervaringen zijn ervaringen die voor een bepaald individu met zekerheid optreden of zijn opgetreden, maar waarover anderen nooit iets met zekerheid kunnen weten en die anderen niet direct kunnen verifiëren. We hebben een soort kennis over ons eigen denken, voelen en willen die anderen nooit kunnen hebben. Deze kennis over onze eigen mentale processen is niet volledig communicabel. Een deel is echt privé en ontoegankelijk voor anderen. Denk maar aan de ervaring bij het kijken naar iets roods. We kunnen wel met anderen tot overeenstemming komen over de vraag wat we 'rood' noemen, maar we kunnen nooit weten of de bijbehorende *ervaringen* ook dezelfde zijn. Die specifieke ervaringen, 'hoe het aanvoelt voor mij', zijn de subjectieve ervaringen. Zijn subjectieve ervaringen van andere individuen invoelbaar en zo ja geldt dat alleen voor gevoelens van soortgenoten of ook voor die van andere soorten dieren? Invoelen kunnen we niet anders dan via analogie-redenaties, want we kunnen niet letterlijk in de huid/hersenen van dat andere individu van eventueel zelfs een andere soort kruipen. Om dat wat een ander ervaart te kunnen vergelijken met wat 'ik' ervaar moet ik allereerst echter expliciete kennis hebben over wat 'ik' ervaar. Is dat mogelijk?

Introspectie is een proces waarbij men bewust tracht over de eigen ervaringen expliciete, dat wil zeggen communicateerbare kennis te krijgen; het is een soort waarneming van eigen mentale processen. Het is gebleken dat dit proces niet alleen onbetrouwbaar is, maar dat het zelfs meestal helemaal niet werkt: de meeste processen in het zenuwstelsel zijn in het geheel niet introspectief toegankelijk. Ze zijn 'ondoordringbaar'. Dit inzicht bestaat in zekere zin al lang, al was er zeker geen consensus over. Freud was één van de eersten die een vorm van dit inzicht populair maakte, maar hij gaf aan het idee een nogal monomane uitwerking en werd natuurlijk nog niet gehinderd door kennis van de moderne ethologie en van de werking van het zenuwstelsel, de randvoorwaarden waaraan hedendaagse theorieën moeten voldoen. Al is introspectie dan niet betrouwbaar als het gaat om vragen zoals wat ons beweegt, waarom we dingen doen of laten, waarom we bepaalde meningen hebben, het is per definitie het enige baken als het om subjectieve ervaringen gaat. Als iemand me vraagt wat ik van een rode vlek tegen een gele ach-

tergrond vind (een modern kunstwerk bijvoorbeeld) dan vraagt hij naar introspectieve informatie. In dit speciale voorbeeld zou ik weinig weten te melden. Ik weet dat ik er een ervaring bij heb, maar welke.... Als ik de ervaring niet aan een ander kan meedelen en die ander zijn ervaring niet aan mij, dan is de vraag hoe we kennis van elkaars ervaringen kunnen hebben. In feite gaan we uit van een *analogiepostulaat* wanneer we bij anderen innerlijke roerselen aannemen die vergelijkbaar zijn met die van onszelf.

Het intermenselijke analogiepostulaat is de aanname, dat vergelijkbaar gedrag onder vergelijkbare omstandigheden bij andere mensen op vergelijkbare interne processen (inclusief subjectieve ervaringen) wijst. Vrijwel iedereen gaat in het dagelijks leven uit van dit analogiepostulaat. Deze voorwetenschappelijke vorm van psychologie is bruikbaar in zoverre ze ons in staat stelt gedrag van andere mensen beter te begrijpen en voorspellen dan zonder dit analogiepostulaat. Omdat er wetenschappelijk gezien nogal wat tegenin valt te brengen, spreekt P.S. Churchland (1986) bij dit soort aannames over ‘volkpsychologie’. Als we zelfs de door ‘interne’ waarneming (introspectie) over *onzelf* vergaarde inzichten niet kunnen vertrouwen, lijkt het niet erg zinvol deze als basis voor kennis over andere mensen te nemen. Daar staat tegenover, dat we het naïeve uitgangspunt waar nodig kunnen corrigeren met ervaringskennis en er alle relevante gegevens uit psychologie en biologie bij kunnen betrekken. In de dagelijkse praktijk lijkt het analogiepostulaat meestal aardig te werken en we moeten dit gereedschap dus niet zomaar weggooien. Ook wetenschappelijk lijkt het de enige brug tussen individuen. De stap van volkpsychologie naar wetenschappelijke psychologie hoeft niet te leiden tot eliminatie van alle volkpsychologische concepten, ook al meent P.S. Churchland dat. Ik ga daar in §2.2 nader op in.

Het antropomorfe analogiepostulaat is de aanname dat gedrag bij andere soorten dan de mens wat vergelijkbaar is met dat van de mens, in vergelijkbare omstandigheden op vergelijkbare interne processen (al of niet inclusief subjectieve ervaringen) wijst. Zodra we op systematische wijze menselijk gedrag vergelijken met dat van andere organismen, vallen ons vrij grote verschillen op. Dan rijst de vraag of dit analogiepostulaat wel geldig is en zo ja, in welke mate (inclusief of exclusief subjectieve ervaringen). Het is niet onmogelijk dat het vaak zelfs ernstig misleidend is. Als we op basis van analogie in gedrag een uitspraak willen doen over analogie in denken en voelen, moeten

we zeer voorzichtig zijn en onder andere rekening houden met de specifieke dier-habitat interacties. Zo trekken lichtschuwe dieren zich veelal net zo snel uit licht terug als wij onze hand terugtrekken wanneer we een brandende kachel aanraken of ons prikken. Dat betekent natuurlijk nog niet dat de lichtschuwe dieren pijn ervaren in licht. De meeste onderzoekers perken dit analogiepostulaat dan ook op allerlei manieren in en accepteren zeker niet voetstoots vergelijkbare subjectieve ervaringen. Wel is men meestal geneigd de analogie te accepteren als het gaat over objectieerbare (meetbare) vormen van waarneming, leren en denken, dus over intelligentie. Wie naar analogie van intelligent gedrag van mensen bereid is bepaalde acties van machines 'intelligent' te noemen, kan moeilijk bezwaar maken tegen het gebruik van zo'n term voor bepaald gedrag van dieren. Immers dieren lijken qua structuur en doelstellingen veel meer op de mens dan welke machine dan ook. Turing heeft een dergelijk analogiepostulaat geformuleerd voor machines. Stel dat een computer *C* en een mens *M*, bijvoorbeeld via elektronische postverbindingen, vragen beantwoorden van een onderzoeker, die wil nagaan welke van de twee *M* is en welke *C*. Als de onderzoeker daar dan niet achter kan komen, zou men volgens Turing moeten accepteren dat het mens-machine analogiepostulaat geldig is (sommigen menen met, anderen zonder subjectieve ervaringen). Ik vind het mens-dier analogiepostulaat, met een klein aantal inperkingen, a priori veel waarschijnlijker dan het mens-machine analogiepostulaat, zelfs als daar veel beperkingen bij worden gevoegd. De redenen voor deze mening zijn (1) de sterke structurele verwantschap van mens en dier tegenover de geringe structurele verwantschap van mens en machine en (2) de sterke overeenkomst in de doelen van mens en dier (gericht op overleven) en de afwezigheid van zulke doelen bij machines. Veel van de moeilijkere problemen in het volgende betreffen impliciet of expliciet de invulling of inperking van dit type analogiepostulaten.

Intelligentie is volgens de encyclopedie zoiets als het vermogen tot succesvol aanpassen van het gedrag aan nieuwe en onverwachte situaties in de omgeving (of in de interactie met de omgeving). Dat houdt waarneming en evaluatie van de verandering in, gevolgd door het gebruik van ervaringskennis en denkvermogen om te komen tot een nieuw gedrag dat problemen opheft of voorkomt. Intelligentie is dus een begrip dat tenminste waarnemen, denken, leren en doen omvat en bovendien een waardeoor-

deel over hun gezamenlijke kwaliteit bij veranderende omstandigheden. Over de kwaliteit van waarnemen en handelen door dieren doen weinig onderzoekers denigrerend. Alvorens te accepteren dat bepaalde diersoorten intelligent zijn, eisen velen echter wel enig bewijs dat de betreffende soorten voldoende flexibel kunnen denken en leren. Denken is een proces dat leidt tot de oplossing van een nieuw probleem via inzicht (in plaats van herhaald proberen). Het zal duidelijk zijn dat een dier geen inzicht in de effectenhandel zal kunnen verwerven en dus ook problemen op dat gebied niet op kan lossen. Met andere woorden denken (en ook leren) bij een bepaalde soort kan vrijwel alleen betrekking hebben op 'natuurlijke' problemen voor die soort. Dit geldt temeer omdat ook de waarneming van soort tot soort verschilt. Een soort die geen platte plaatjes kan interpreteren (zie §3.3.3) kan evenmin problemen op dat gebied oplossen of plaatjes leren onderscheiden. Dat denken, leren en waarnemen soortspecifiek zijn lijkt vanuit de biologie een open deur, maar bij onderzoek aan leren en denken van dieren is die trivialiteit toch vaak over het hoofd gezien. Er is een sterke tendens dieren te oefenen en testen met materiaal dat voor de mens zinvol is. Dat heeft vooral in de beginjaren van de dierpsychologie en ethologie geleid tot onderzoek waar we nu misprijzend het hoofd over schudden. Toch is zulk onderzoek niet zinloos geweest, want het heeft een helder licht geworpen op methodologische problemen die nog steeds een grote rol spelen. Om dat te illustreren gaan we eerst in op de lessen van slimme Hans, het rekenende en spellende paard uit Berlijn, en van slimme Lumpi, een spellende en rekenende terriër. Het onderzoek aan Lumpi gebeurde dertig jaar na het onderzoek aan Hans en een aantal onderzoeken aan taalbeheersing bij aapjes van nog eens dertig tot veertig jaar later, bleken ten dele op dezelfde methodologische fouten te zijn gebaseerd. Het betreft hier dus lessen van formaat!

1.1.2 *De lessen van slimme Hans en slimme Lumpi*

Wilhelm von Osten, een Berlijnse gepensioneerde leraar, kocht in 1901 een hengst die hij Hans noemde. Von Osten beschouwde paarden als zeer intelligente dieren en hij kwam op het idee Hans onderwijs te geven. Hij leerde hem eerst tellen met behulp van hoefslagen, daarna rekenen en spellen. Dit laatste gebeurde met een cijfercode voor letters ($a=1$, $b=2$, enzovoorts). Hans bleek al

spoedig eenvoudige rekensommen op te kunnen lossen (Rosenthal, 1965). Von Osten begon voorstellingen te organiseren. Volgens Arzt & Birmelin (1995) ging het von Osten niet om geld en hield hij gratis voorstellingen onder het motto: "Hier wird nicht bezahlt, sondern aufgepaszt". Slimme Hans had groot succes, wat wellicht verklaart waarom Marian Dawkins (1993) juist meent dat de voorstellingen voor von Osten zeer lucratief waren. In elk geval trok de roem van slimme Hans ook de aandacht van de wetenschappelijke wereld, die juist in die tijd zeer kritisch geworden was over dierlijke intelligentie. Darwin's aanhanger en vriend G. Romanes (1849-1894) bijvoorbeeld had nogal anecdotisch over dierlijke slimheid geschreven en had daarin veel, en vooral veel minder kritische, navolging gevonden. Eind 19e eeuw was de slinger terug aan het bewegen en in Engeland was vooral Lloyd Morgan (1852-1936) een toonaangevend criticus van de anecdotische aanpak. Hij formuleerde een 'canon' (leerstelling) die zegt: *Men mag in geen geval een hoger geestelijk vermogen postuleren als het gedrag ook door een eenvoudiger vermogen verklaard kan worden.* In Berlijn hoorde de eveneens zeer kritisch ingestelde psychologie-hoogleraar E. Stumpf de verhalen over stadgenoot von Osten met zijn slimme Hans en hij formeerde een commissie om erachter te komen wat er gaande was. In 1904 concludeerde de commissie dat er geen sprake was van enige trucage, dat von Osten te goeder trouw was, maar dat men toch een hoger denkvermogen bij Hans uitsloot. Wat dan de verklaring moest zijn van de fabelachtige prestaties van slimme Hans wist men niet. Hans kon inmiddels zelfs de namen spellen van mensen waaraan hij werd voorgesteld en vrij ingewikkelde rekensommetjes oplossen. Stumpf stuurde er zijn jonge assistent Oskar Pfungst op af, die een groot aantal proeven deed met Hans en zijn baas. Pfungst ontdekte daarbij dat Hans alleen het goede antwoord kon geven als von Osten of anderen die het antwoord kenden aanwezig waren. Hij concludeerde dat de verklaring gezocht moest worden in onbewuste signalen door mensen aan het paard. Tot zijn verbazing merkte Pfungst dat Hans ook goed antwoordde als hijzelf de enige aanwezige was. Met andere woorden, het werkte zelfs met mensen die zeer kritisch waren ingesteld en hun best deden Hans niet te helpen. Hans was geconditioneerd geraakt op kleine menselijke tekenen van ontspanning bij het tikje van de paardehoef dat het antwoord correct maakte. Hans klopte tot dat ontspanningsteken kwam en kon dus alleen met zichtbare toeschouwers tot zijn fabelachtige prestaties komen. Zoals Arzt & Birmelin (1995) terecht opmerken is het

spijtig dat men daarmee de geschiedenis als afgedaan beschouwde, want de verklaring toont aan dat Hans een veel scherper waarnemingsvermogen had dan een mens in die situatie normaliter zou hebben. Dat is helaas niet nader onderzocht. Mogelijk gebruiken ook menselijke ‘performers’, van telepaten tot gebedsgenezers, zulke niet-bewuste tekens van hun slachtoffers. Von Osten trok zich na deze affaire volledig uit het publieke leven terug, maar bleef in zijn Hans geloven. Hij had bovendien een medestander in Karl Krall, die de verklaring van Pfungst (1965) maar onzin vond. Krall, een koopman, had enige tijd met von Osten samengewerkt en ging verder met voorstellingen met paarden. Hij kocht er steeds meer paarden bij, onder andere Berto, die blind was en die ook leerde rekenen! Ondanks positieve reacties, ook van diverse wetenschappers, was de interesse voor rekenende en spellende paarden in de wetenschappelijke wereld inmiddels verdwenen. De Krallse paarden werden niet meer serieus genomen.

Tegenwoordig gaat men ervan uit dat een dier alleen met enig gemak dingen kan leren die bij z’n natuurlijke gedrag aansluiten. Manipulatie van abstracte symbolen, zoals bij taal, wiskunde, en dergelijke, is nu juist een voorbeeld van iets waarin de mens zich lijkt te onderscheiden van (vrijwel?) alle andere dieren. Het is dus een vreemde gedachte om te proberen de ‘slimheid’ van een dier aan te tonen met een typisch menselijke toets als het al of niet kunnen rekenen en spellen. Dit heeft enige tijd, ook na Slimme Hans en de paarden van Krall, geleid tot nogal potsierlijk ‘onderzoek’ waarvan ik ter illustratie twee door mij vertaalde bladzijden citeer uit Plate & Sewertsoff (1931). Het tijdschrift is in vele Nederlandse universitaire bibliotheken nog beschikbaar:

Waarnemingen aan Lumpi, de slimme hond uit Weimar
(Plate & Sewertsoff, 1931)

Omdat de vraag of er honden bestaan die kunnen rekenen nog zeer omstreden is en door veel biologen met ‘nee’ wordt beantwoord, voelen we ons verplicht de volgende waarnemingen te publiceren, die we op 30 april en 22 mei 1931 konden doen aan Lumpi, de beroemde zwart-wit-bruingevlekte terriër (reu) uit Weimar. Hij behoort aan juffrouw Susanne Hensoldt en werd onderwezen door haar pleegdochter, juffrouw Gerda Wolfson, die als operazangeres bij het Nationaaltheater werkt. De hond klopt het alfabet op een door juffrouw W. voorgehouden boek: a = 1, b = 2, ...z = 26 slagen. De tientallen worden met de rechterpoot geslagen, 10 = 1

slag, $20 = 2$ slagen, enzovoorts, de eenheden worden met de linkerpoot geklopt. Soms slaat hij het boek mis. Aan het eind van een getal blijft de poot zo'n beetje liggen. Als men er niet zeker van is welk getal hij geklopt heeft, omdat de slagen elkaar snel opvolgen, wordt hem gevraagd het getal te herhalen en dat doet hij dan ook bereidwillig. Ja = 1 slag, nee = 2 slagen met de linkerpoot. Hij krijgt na ieder juist antwoord als beloning een klein stukje hondekoek. Ieder van de twee zittingen duurde ongeveer drie kwartier, omdat intussen van alles besproken werd. Het scheen de hond zeer te vermoeien. Ons precies bijgehouden protocol beschrijft zestig vragen, waarvan er 53 direct juist beantwoord werden, vijf half juist, dat wil zeggen dat er kleine foutjes aan kleefden, die door de hond op navraag gecorrigeerd werden, twee waren volkomen fout. Elf opgaven waren 'blind', dat wil zeggen geen van de aanwezigen kende de vragen, die een dag van tevoren op even grote stukken papier waren geschreven en de hond dan zo werden voorgehouden, dat hij alleen ze kon zien. Tot deze blinde opgaven kunnen ook drie vragen gerekend worden die door mevrouw Professor Sewertzoff opgeschreven werden, zonder dat de andere aanwezigen de inhoud kenden. Van deze veertien blinde opgaven met bijzondere bewijskracht, waaraan de tweede zitting vooral gewijd was, waren er acht meteen goed, vier waren half goed, twee waren fout. Het protocol staat geïnteresseerden ter beschikking. Het is voldoende wanneer hier een uittreksel gegeven wordt, dat de aard van de vragen illustreert.

We zijn ons ervan bewust dat de bij Lumpi toegepaste methode om op een voorgehouden boek te kloppen, niet probleemloos is, omdat gemakkelijk onbewuste tekens gegeven zouden kunnen worden (verder optillen of laten zakken van het boek, blik op de linker- of rechterpoot werpen en dergelijke). Eén van ons (Plate) heeft daarom al eerder de eis gesteld de honden op dezelfde wijze te oefenen als de paarden van Krall, dat wil zeggen dat ze tegen een vastgezette plaat (plank of karton) slaan. Wie echter nauwkeurig naar juffrouw Wolfson heeft gekeken, zou nooit op het idee komen dat Lumpi door zulke onbewuste tekens beïnvloed wordt. Dat blijkt niet alleen uit de blinde tests, maar ook uit het feit dat de antwoorden vaak totaal onverwacht uitvallen en dat de hond vaak gemaand moet worden het getal nog eens te kloppen, omdat twijfel ontstond over het aantal slagen.

Eerste zitting. Allereerst worden de hond mondeling enkele gemakkelijke rekenopgaven gesteld, bijvoorbeeld $8 + 4$, $(25 - 10) : 5$,

(30 : 3) x 4, (12 + 8 + 10) : 5, die direct juist werden beantwoord. Ook de zeer sterk op elkaar lijkende opgaven $7 + 3$, $7 - 3$, 7×3 vielen zo uit, het beste bewijs dat het dier tot op zekere hoogte Duits verstaat. Op een klok met instelbare wijzers werd de tijd door Lumpi bij drie tests direct juist herkend. Hoeveel maanden heeft een half jaar? (Antwoord: 6). Hoeveel van de aanwezigen dragen een bril? (3). Hoeveel glazen zitten daar in? (6). De hond werd van tevoren verteld dat er vandaag bezoek uit Rusland zou komen. Vraag: Waar komen de gasten vandaan? Lumpi klopt 17, 20, 18, 11, 1, 13, 4 = Rusland. Waar komt Onkel Plate vandaan (de hond al van vroeger bekend)?

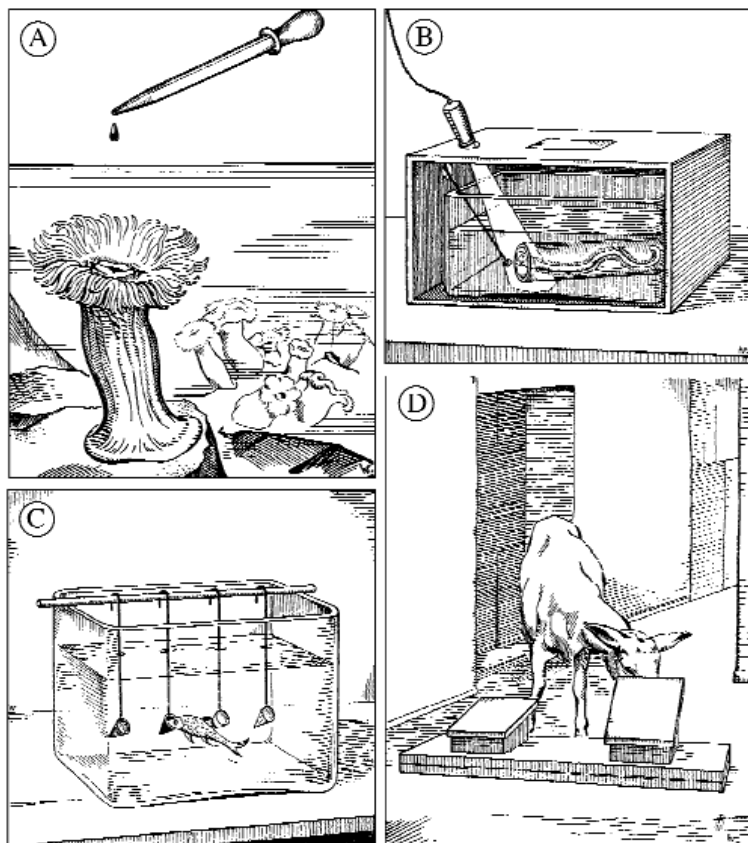
Het lijkt wellicht wat goedkoop om ten koste van (Onkel) Plate uit Jena en mevrouw Sewertzoff uit Moskou te laten zien hoe ‘grappig’ serieus onderzoek met slechte methoden aan geconditioneerd gedrag van huisdieren kan zijn voor de verlichte (ongelovige, kritische) moderne mens. Toch is dat niet de opzet van dit voorbeeld. Ongetwijfeld wordt tegenwoordig ook veel onderzoek gedaan dat er over zestig jaar even oubollig uit zal zien. De onderzoekers van Lumpi hebben zich niet ingespannen om de hypothese van de rekenende hond te falsifiëren, maar zich beperkt tot oppervlakkig waarnemen. Als men dat bij een goochelaar doet, zou men tot een geheel nieuw soort van natuurwetenschap komen, waarbij duiven uit het niets kunnen ontstaan of ineens onzichtbaar kunnen worden. Het is het soort houding die de gemiddelde burger heeft tegenover paranormale verschijnselen of astrologie en die niet past in het georganiseerd scepticisme van de wetenschap. Hier streven we ernaar ons te houden aan de spelregels van de wetenschap, zoals die in hoofdstuk 2 kort worden samengevat.

1.1.3 De soortspecifieke aard van het leren

Slimme Hans en slimme Lumpi werden in hun eigen tijd evenmin onkritisch geaccepteerd, dus in die zin werkte het scepticisme van de wetenschappelijke gemeenschap wel. Het inzicht dat er soortspecifieke leervermogens zijn en dat verschillende soorten op geheel verschillende wijze ‘aan de kost’ komen en dus verschillende interesses en vaardigheden hebben, bestond ook toen al. Om dat te illustreren zijn in figuur 1 vier plaatjes bijeengebracht uit een (langer) stripverhaal met deze boodschap door W. Fischel (1932), destijds lector te Groningen.

In figuur 1A zien we een zeeanemoon die gewend raakt aan herhaald druppelen met water vanuit een pipet op het oppervlak. Aan het begin van het druppelen trekt de zeeanemoon bij iedere druppel (een mechanische verstoring) samen, maar na enige tijd worden de reacties minder en minder tot ze ophouden, ondanks verder druppelen. Deze simpele vorm van gewenning heet habituatie en wordt als een zeer eenvoudige vorm van flexibiliteit, van 'leren', beschouwd. Figuur 1B toont een worm die zich in een glazen buisje in een donker zeewateraquarium bevindt. De kop van de worm wordt zo zwak belicht dat de verlichting nog net te zien is door de rode ruit. Als het licht aangaat, krijgt de worm voedsel aangeboden en hij zal zich ernaar uitstrekken om het te pakken, zodra hij het waarneemt. Na enige herhalingen zal het dier zich al uitstrekken als het licht aangaat, ongeacht of tegelijkertijd voedsel wordt aangeboden. De worm kan dus geconditioneerd worden. In figuur 1C heeft de goudvis geleerd dat voedsel steeds in een (bijvoorbeeld) rood napje te vinden is. Ook al worden de gekleurde nappes steeds in volledig willekeurige volgorde opgehangen, het dier zal toch steeds naar de rode nap zwemmen. De goudvis kan dus het verband tussen kleur en voedsel onthouden. Figuur 1D illustreert proeven met een geit die geleerd heeft met de snuit een deksel van een doos te tillen om voedsel te vinden. Geiten eten liever roggebrood dan groene blaadjes, ook al eten ze beide. Ze leren nu dat de ene doos, die willekeurig links of rechts kan staan, steeds rogge en de andere steeds blaadjes bevat. Als de geiten dan een doos openen die blaadjes blijkt te bevatten, eten ze die niet op, maar gaan eerst naar de andere doos om het roggebrood op te eten. Het dier herinnert zich dus iets wat niet direct waarneembaar is.

Men kan in elk geval uit de diverse gegeven voorbeelden concluderen dat leervermogen vrij algemeen voorkomt in het dierenrijk. Er is een bepaalde mate van flexibiliteit dankzij het vermogen invarianties (onveranderlijke samenhangen) in complexe situaties te vinden. Het kunnen vinden van invarianties in veranderlijke situaties is voor alle dieren zowel in het laboratorium als in de natuur van belang. Als er op een bepaalde plaats onder bepaalde omstandigheden steeds voedsel of water kan worden gevonden is het voor alle dieren nuttig dat als invariant verband te kunnen onthouden. Associatie is niets anders dan het onthouden van invariante verbanden temidden van allerlei voortdurend variërende bijkomstigheden. Zonder deze minimale vorm van leren (inclu-



Figuur 1 Soortspecifieke leervermogens met toenemende flexibiliteit voor complexere organismen (Fischel, 1932)

sief waarnemen!) kan er geen sprake zijn van ‘intelligentie’ en zouden we moeten concluderen dat dieren vastgeprogrammeerde reflexautomaten zijn. De voorbeelden illustreren dus dat aan een minimumvoorwaarde voor intelligentie bij (vrijwel?) alle dieren voldaan is: *Dieren kunnen invarianties waarnemen en onthouden.*

Nu is de wereld vol van irrelevante invarianties, dat wil zeggen invarianties waar je als dier niets aan hebt. Het zou weinig zinvol zijn die allemaal te kunnen waarnemen, te leren kennen en te onthouden. Het leren moet betrekking hebben op relevante invarianties die het dier helpen zijn doelstellingen te bereiken, anders

zien we het niet als ‘intelligent’ gedrag. Iemand die het telefoonboek uit zijn hoofd kan leren beschouwen we evenmin zonder meer als intelligent. Je kunt die informatie beter op papier of in een computer vastleggen dan in je hoofd. Er is dus naast leervermogen voor intelligent gedrag nog selectie nodig, het maken van een onderscheid tussen informatieve (nuttige) invarianties in fysische processen en niet-informatieve fysische processen (ruis). Deels is de selectie van wat wel en niet kan worden gebruikt, en dus wordt opgepikt, evolutionair bepaald, onder andere door de soortspecifieke afstemming van de waarneming op zinvol gebleken invarianties. Ieder dier zal een aan zijn leefwereld (habitat) aangepast leervermogen hebben, dat nauw verband houdt met de beschikbare perceptuele vermogens. Wat je niet kunt waarnemen kun je niet leren. Een vleermuis moet heel andere geluids-informatie oppikken dan een mens en heeft relatief weinig aan geheugen voor symfonieën (ruis), maar veel aan een geheugen voor echo’s die specifiek zijn voor bepaalde prooidieren (informatie). Het lijkt dus a priori redelijk ervan uit te gaan dat ieder dier een aan zijn levensstijl aangepast leervermogen heeft. Deze gedachte wordt ondersteund door de bevindingen van de dierpsychologie en ethologie, zoals we in §1.3 zullen zien. Daarnaast moet door ieder individu binnen iedere soort ook uit de eigen ‘ervaring’ nog een slimme selectie worden gemaakt. Wat is een les voor de toekomst, wat is nuttig om te onthouden en wat niet? Deze persoonlijke selectie, die al of niet bewust kan zijn, is mede bepalend voor de vraag of we het individu ‘intelligent’ vinden. De ervaringen moeten niet alleen selectief worden vastgelegd, maar ook op het juiste moment in de juiste vorm worden gecombineerd tot een oplossing voor een nieuw probleem. Kortom intelligentie vereist naast slim leren nog zoiets als een goed gebruik van het geleerde, dat wil zeggen denkvermogen. We zullen nu eerst trachten een soortonafhankelijke definitie van denken te ontwikkelen, maar concluderen alvast dat effectief waarnemen en leren, het hebben en adequaat gebruiken van één of meer vormen van geheugen, onmisbaar zijn voor iedere vorm van intelligent gedrag. Zonder waarnemen en leren, dat wil zeggen zonder kennis, is aanpassing aan nieuwe situaties oftewel intelligent gedrag niet mogelijk. Kennis en denken zijn onmisbare aspecten van intelligentie.

1.2 Denken bij dieren

1.2.1 Een definitie van denken

Waarom zouden we in principe bereid moeten zijn aan te nemen dat dieren kunnen denken? Vooral natuurlijk omdat denken overlevingswaarde heeft. Denken kan de kwaliteit van vitale activiteiten zoals jagen, vluchten, een partner of schuilplaats zoeken en een nest maken, bevorderen. Hierbij is denken eenvoudiger, genetisch zuiniger en flexibeler dan het van tevoren vastleggen van oplossingen in vaste actiepatronen en reflexen. Naarmate de interactie tussen een organisme en zijn omgeving geschakeerder is, wordt het moeilijker voorstelbaar dat alle benodigde gedragingen van tevoren in de beperkte hoeveelheid informatie van het genetisch materiaal vast te leggen is.

Wat geldt voor ‘denken’ zal even goed voor ‘voelen’, dat wil zeggen voor emoties, gelden. Ze zullen overlevingswaarde hebben of ooit gehad hebben in de beschouwde afstammingslijn. Het biologische uitgangspunt van de evolutionaire continuïteit (eventueel met een eindig aantal relatief kleine discontinuïteiten) neem ik als gegeven. Er zijn zulke sterke overeenkomsten tussen verwante (en vele qua afstamming verder van elkaar verwijderde) diersoorten in anatomie, neuronale verwerking, chemische processen en fysische interacties met de wereld, dat men aan zo’n continuïteit niet serieus meer kan twijfelen. Daaruit volgt dat we moeten verwachten dat wat bij mensen een flexibeler interactie met de omgeving oplevert (denken-voelen) zonder te grote ‘kosten’ in termen van genetisch over te dragen informatie, hetzelfde bij andere dieren zal doen. Een natuurlijke schaal lijkt voor de hand te liggen, waarbij krachtiger denkprocessen verwacht kunnen worden bij organismen met een rijkere geschakeerde interactie met de omgeving of met meer variabele leefomstandigheden en meer hersencellen. Een eerste poging denken te definiëren op basis van deze plausibiliteitsoverwegingen leidt tot de volgende uitspraak:

Denken is een adaptieve hersenactiviteit, waarmee een organisme tracht een manier te vinden om een doel te bereiken, vóór de doelgerichte activiteit begint of afgerond is en waarbij de methode nog niet vastligt. De oplossing mag dus niet fylogenetisch of ontogenetisch verankerd zijn in de structuur van het organisme en mag evenmin al eerder aangeleerd of geritualiseerd zijn.

Routinehandelingen en rituelen, zijn vast verankerd geraakt in lichaam en zenuwstelsel en we hoeven er dus niet bij na te denken. Pas als er iets onverwachts gebeurt en de routine doorbroken moet worden om het doel te bereiken, komt er weer denken aan te pas. Reflexen en vaste actiepatronen vereisen in principe evenmin denken, omdat ze onder leiding van genetische aanwijzingen en ontwikkelingsprocessen (ontogenie) zijn vastgelegd in zenuwnetwerken. Denken is in deze definitie niet vast verbonden met taal, maar taaldenken valt er wel onder, evenals bijvoorbeeld beelddenken. We kunnen dankzij dit uitgangspunt met recht de vraag stellen of een eekhoorn kan denken, al kan het antwoord nog steeds 'nee' zijn. In aanzet is de gegeven definitie van denken *diersoortonafhankelijk*, hetgeen voor dit type algemene concepten naar mijn mening vereist is.

Hoe kunnen we weten of een bepaald doelgericht gedrag echt nieuw en niet toevallig is en 'dus' uit denken is ontstaan? Reflexen, vaste actiepatronen, vaardigheden, rituelen, kunnen bij de onbevanging externe waarnemer de indruk wekken van originele oplossingen van een nieuw probleem. Als je niet weet wat in de structuur van een bepaald organisme is vastgelegd, kun je niet vaststellen of bepaald gedrag 'denken' heeft vereist. Een voorbeeld is het toneelstukje van de broedende plevier die simuleert een gebroken vleugel te hebben om de naderende wandelaar (potentiële eierdief) te verleiden haar te achtervolgen en om zo het gevaar voor de eieren af te wenden. Zelfs als we het toneelstukje op zich zien als vastgelegd in de structuur van het zenuwstelsel (vast actiepatroon) moeten we erkennen, dat de details van de uitvoering afhankelijk zijn van de momentane waarnemingen van het dier (uit welke richting nadert de predator, hoe snel, welke richting kies ik voor mijn vlucht, hoe snel beweeg ik, welke obstakels zijn er, enzovoorts). De plevier maakt zelfs onderscheid tussen het naderen van een koe en van een mens. Koeien stelen geen eieren, maar kunnen er wel per ongeluk op trappen en dat schijnt de plevier ook te weten. Als er een koe nadert, blijft de plevier voor de eieren staan en maakt veel misbaar, zodat de gewaarschuwde koe erlangs kan lopen zonder schade aan te richten. Als er een mens nadert, wordt de hele misleidingsscène opgevoerd, die de naderende wandelaar van het nest af achter de zogenaamd gewonde plevier aan moet lokken. Zijn er steeds andere 'bedachte' varianten? Wordt afhankelijk van de omstandigheden een keuze gemaakt uit een aantal vaste programma's? Kortom is denken vereist

of niet? Vergelijkbare problemen zijn er met ritualisering, vaardigheden zoals bijvoorbeeld gereedschapsgebruik, geleerde acties en dergelijke.

Denken is hier per definitie gekoppeld aan het hebben van doelen, het is gedefinieerd als een voorbereiding op en/of sturing van doelgericht gedrag. Het denken kan van goede of van slechte kwaliteit zijn en dat is inderdaad ook een kenmerk van dit begrip in de dagelijkse spreektaal (“Dat heb je dan verkeerd gedacht!” “Denk er nog maar eens goed over na!”) De vraag rijst vervolgens of we wel kunnen vaststellen of een specifiek dier met een bepaald gedrag een doel heeft. Is het probleem van de definitie van ‘denken’ niet verschoven naar de definitie van ‘doel’? Niet in de context van een biologische theorie. Van alle dieren nemen we aan dat hun (onderling samenhangende) hoofddoelen zijn: (1) in leven blijven, (2) bewaren van de eigen lichamelijke integriteit en (3) voortplanten. Hieruit volgen afgeleide doelen, bijvoorbeeld eten, vechten, vluchten, volgen van bepaalde strategieën in bepaalde situaties en dergelijke. We zien dus dat ‘doel’ niet iets is dat je in dieren zult vinden wanneer je ze opensnijdt, maar een concept uit onze theorie over dieren! Ik dank dit inzicht, althans in zijn expliciete vorm, vooral aan J.J. Koenderink. We zien nu bij herlezing van de definitie dat slim gedrag niet per se op denken hoeft te berusten, ook al meent de naïeve waarnemer van wel. Of je bij bepaalde gedragingen van ‘denken’ spreekt of niet, hangt af van de kennis die je hebt van de onderliggende mechanismen en je aanname over de doelstellingen van het systeem. Ook dat lijkt me een redelijk aspect van onze definitie, en het verklaart tevens hoe het komt dat zoveel mensen die weinig of niets van computers, robots of andere machines begrijpen, zo gemakkelijk innerlijke roerselen en denkprocessen aan die machines toekennen.

1.2.2 *Denken versus bewust denken*

Uit eigen ervaring weten we dat we soms ineens een oplossing voor een nieuw probleem ‘zien’. Als er al sprake was van denken, dan ging dat buiten ons bewustzijn of onze aandacht om. In andere gevallen moeten we onze aandacht voortdurend richten op allerlei aspecten van het probleem en zeggen we dat we ‘bewust denken’. Hoewel dit introspectief verschillende manieren van denken zijn is het voor een externe waarnemer (nog?) niet moge-

lijk het verschil vast te stellen. Omdat we bij dieren altijd externe waarnemers zijn is het vermoedelijk niet zinvol te trachten een onderscheid aan te brengen tussen bewust denken en niet-bewust denken. Niet iedereen is het daarmee eens. D.R. Griffin (1984) bijvoorbeeld stelt:

“Under natural conditions animals make so many sensible decisions concerning their activities, and coordinate their behaviour so well with that of their companions, that it has become reasonable to infer some degree of conscious thinking, anticipating, and choosing.”

Deze uitspraak suggereert dat de mate van succes correleert met de mate van bewustheid van de activiteit. Dat lijkt me een moeilijk verdedigbaar idee. Ik denk dat het zinnig is het woord ‘conscious’ weg te laten zolang we geen criterium hebben om het verschil tussen denken en bewust denken bij dieren vast te stellen. Als je overall in het boek van Griffin ‘bewust denken’ door ‘denken’ vervangt, is er geen inhoudelijke verandering merkbaar. Het lijkt me daarom nuttig voorlopig over ‘denken’ te spreken – zeker als het over andere soorten dan de mens gaat – en dan later (in hoofdstuk 5) na te gaan of er ook nog vormen van bewust denken zijn, respectievelijk of alle denken bewust denken is (in welk geval het woordje ‘bewust’ zijn functie zou verliezen).

Om vast te stellen of dieren ‘denken’ kunnen we met onze definitie en biologische theorieën over diergedrag criteria ontwikkelen, maar om vast te stellen of ze ‘bewust denken’ hebben we nog geen criterium. Om te zien of zo’n criterium misschien te zijner tijd ontwikkeld zou kunnen worden kunnen we eerst kort stil staan bij het begrip ‘bewust denken’ bij de mens. Wanneer we fietsen en op onze omgeving letten zijn we ons niet bewust van de handelingen die we uitvoeren om te fietsen, terwijl we ons wel bewust zijn van allerlei waargenomen objecten om ons heen. Rijden we dan echter ongemerkt een zandpad op, dan zal onze aandacht zich ineens richten op het sturen en trappen. Kennelijk kunnen we complexe handelingen als fietsen, dansen of pianospelen zodanig leren beheersen, dat we ze buiten iedere bewuste controle om kunnen uitvoeren. Zodra er echter iets mis gaat met deze niet-bewust aflopende handelingen richten we onze aandacht erop, zijn we ons ervan bewust. Een ander voorbeeld is spreken. Normaliter denken we niet over de te spreken teksten en zinnen na, maar al-

leen over de globale boodschap die we over willen brengen. Pas als de manier waarop we die boodschap overbrengen van groot belang is of soms als we een vreemde taal leren spreken, letten we goed op de zinsbouw en woordkeus. Bewust handelen en bewust denken heeft dus kennelijk iets te maken met nieuwe, onverwachte of heel belangrijke activiteiten, waarbij we letten op de eigen prestatie, waarbij aandacht (attentie) een rol speelt. Dit zou van belang kunnen zijn bij het verbeteren van het leerproces. Ook analyse achteraf van heel significante gebeurtenissen kan tot bewust 'one-trial' leren leiden (leren uit reflectie). Als er bijvoorbeeld bijna een ongeluk gebeurt en je hebt dit net kunnen voorkomen door opzij te springen, te bukken of iets dergelijks, dan schrik je achteraf en bedenkt wat er allemaal mis had kunnen gaan, wat de oorzaak was van de gevaarlijke situatie en hoe je die in de toekomst kunt voorkomen. De oplossing van het probleem werd razendsnel en buiten het bewuste denken om gevonden, maar wordt achteraf geëvalueerd als les voor de toekomst (zie hoofdstuk 5).

Het bewustzijn lijkt een soort monitor van activiteiten van bepaalde delen van het zenuwstelsel. Het proces waarbij eigen denken en leren in de gaten wordt gehouden door een kennelijk relatief onafhankelijk evaluatiesysteem in het brein, wordt 'bewust denken' of 'bewust leren' genoemd. Niet alle vormen van leren gaan met bewust denken gepaard. Wie goed wil leren biljarten moet het vaak doen en leert dan grotendeels buiten het bewustzijn om de fijne kneepjes. Wellicht kan men stellen dat het leren in één keer, via een 'leraar' of door imitatie, kortom alle vormen van leren waarbij oefenen een geringe rol speelt, bewustzijn vereist. Het leren van vaardigheden door veel oefenen zou dan nauwelijks bewustzijn vereisen, behalve natuurlijk bij de beslissing dat oefenen zin heeft. Aan de hand van dergelijke criteria, leersnelheid, aard van de leerfase, kan men iets over bewustzijn bij dieren zeggen (zie hoofdstuk 5).

Een ander, al genoemd, aspect van bewustzijn is aandacht. Bij het onderzoek aan een bepaalde vorm van aandacht, namelijk visuele aandacht, is de laatste jaren flink wat vooruitgang geboekt en lijken een aantal van de neuronale processen al analyseerbaar te zijn. Het is zeker niet uitgesloten dat het mogelijk wordt via meting aan het zenuwstelsel een operationele betekenis te geven aan het begrip 'bewust' en een onderscheid te maken tussen denken en bewust denken, leren en bewust leren. Voor we nader in kun-

nen gaan op die mogelijkheid (in hoofdstuk 5), moeten we enige kennis en inzichten bespreken die de laatste decennia over waarneming en handelen (hoofdstuk 3) en de werking van het zenuwstelsel (hoofdstuk 4) beschikbaar zijn gekomen.

Met 'zelfbewustzijn' wordt meestal zoets bedoeld als het hebben van een model of beeld van jezelf, zowel in concrete zin (het uiterlijk) als in abstracte zin (eigenschappen). Ik zou me goed kunnen voorstellen dat in het dierenrijk vele vormen van zelfkennis bestaan die helemaal niet 'bewust' zijn, en toch vaak slordig zelfbewustzijn worden genoemd. Een dier kan meestal heel goed evalueren of hij tot een bepaalde handeling in staat is, zoals over een obstakel springen, een bepaalde prooi inhalen of doden, een gevecht winnen, enzovoorts. Het dier heeft dus een gebruiksgereed zelfbeeld. Het valt echter nog te bezien of het woord 'bewust' hierop van toepassing is. Zou je bij andere dieren bewuste van niet-bewuste zelfkennis kunnen onderscheiden? Zo niet dan lijkt het zinloos een categorie als 'bewust' die uit de introspectie stamt toe te passen. Vaak wordt als test voor zelfbewustzijn de 'spiegeltest' gedaan, zowel bij kleine kinderen als bij allerlei andere soorten dan de mens. Een vlekje wordt ongemerkt (bijvoorbeeld tijdens slaap of narcose) op de neus of een ander lichaamsdeel aangebracht en enige tijd later wordt een spiegel getoond of het tv-beeld van een gelijktijdige cameraopname. Als het proefdier of het kind de vlek van het eigen lichaam verwijdert of 'tekenen van verbaasdheid' geeft, ziet men dat veelal als bewijs van zelfbewustzijn. Het lijkt een bewijs dat het zenuwstelsel weet hoe het 'zelf' eruit ziet of moet zien, een afwijking kan vaststellen en kan trachten dit te corrigeren. Echter, ik kan heel goed een bal vangen zonder me 'bewust' te zijn van de verplaatsing en positionering van mijn lichaam in de ruimte die nodig was om dat te doen. Op introspectieve gronden noem ik de beslissing 'bal vangen' bewust, de rest van het proces is introspectief ondoordringbaar en dus niet-bewust. In een spel hoeft ik zelfs de beslissing 'bal vangen' niet bewust te nemen en kan 'bewust' bijvoorbeeld met strategieën bezig zijn, terwijl de rest 'vanzelf' (niet-bewust) gaat. Dat zou met het vlek-op-neus-verwijderen best ook zo kunnen zijn. Het kan een deel van niet-bewust poetsgedrag zijn. Het kan zelfs geïnitieerd zijn doordat het dier meent dat een *ander* dier (het dier in de spiegel) een vlekje op de neus heeft, zoals we controleren of onze gulp open staat als we die van een ander open zien staan. Wellicht klinkt dat alles wat ver gezocht, maar bij het bewijs

van bewustzijn of zelfbewustzijn moeten we, net als voor andere hogere mentale processen, eenvoudiger aannamen kunnen uitsluiten (Morgan's canon, §1.1.2). We zullen de problemen van bewustzijn en zelfbewustzijn apart en uitgebreider in hoofdstuk 5 bespreken en voorlopig bij de term 'denken' niet aangeven of we bewust dan wel niet-bewust denken bedoelen. Dat wil zeggen we stellen een mening uit over de vraag wat het voor het dier zelf betekent, hoe het 'aanvoelt', als wij vinden dat het dier 'denkt' in de zin van onze definitie.

1.2.3 *Ethologische evidentie voor denken bij dieren*

Ethologie is de studie van dierlijk gedrag onder (voornamelijk) natuurlijke condities en van de natuurlijke evolutie van gedrag. Volgens Griffin (1984) is er een glijdende schaal van eenvoudig tot complex gedrag en van vaste actiepatronen tot flexibel gedrag. Hij noemt vier *ethologische* criteria om 'denken' bij andere dieren te kunnen herkennen:

1. Denken maakt het mogelijk in een groter aantal situaties en in onvoorziene omstandigheden te overleven, het is een 'general purpose'-principe. Dit komt tot uitdrukking in *adaptiviteit* (aanpassingsvermogen) bij veranderende omstandigheden.
2. Hoe meer verschillende omstandigheden een dier aan kan, hoe beter het kan denken. Een chimpansee, die een tak afplukt, er de bast afpelt, de tak over grote afstand meeneemt naar een termietenhoop, in de hoop roert, de tak terugtrekt en er met smaak de termieten aflikt, vertoont *anticipatie*, geplande actie.
3. Aanpassen aan de steeds wisselende omstandigheden van het groepsleven vereist bij sociale dieren communicatie, invoelen en aanvoelen van andere individuen. Dit is *sociale anticipatie en planning*. Ik ben geneigd het doorgronden van andere relevante diersoorten, zoals predatoren of prooidieren hieraan toe te voegen.
4. Experimenteren tot redelijk werkende gedragsstrategieën zijn gevonden (door exploreren en spelen), en het vasthouden van goede oplossingen door *leren* ziet Griffin als het vierde criterium van denken bij dieren.

Het flexibele (criterium 1), anticiperende (criterium 2) dier met psychologisch inzicht (criterium 3), dat speelt/leert/oefent (criterium 4) kan in elk geval denken. Deze eigenschappen zou men volgens Griffin onder andere kunnen opsporen door analyse van communicatie tussen dieren, van samenwerking en bedrog, van gereedschapsgebruik en -productie, van culturele overdracht en andere vormen van leren. Om al deze factoren te kunnen beoordelen moet men vanzelfsprekend goed op de hoogte zijn van het natuurlijk gedrag van de onderzochte soort en weten welke 'slimheid' van evolutionaire (genetische) aard is en welke het individu daar op grond van zelfverworven kennis en denken aan toevoegt. Immers bij 'denken' gaat het om de nieuwe probleemoplossingen die individuen vinden. Een conceptueel probleem is daarbij, dat bepaalde nieuwe gedragingen of uitvindingen zo voor de hand liggen voor een bepaald dier met een bepaalde erfelijke aanleg, dat je ze niet slim meer vindt als je die aanleg kent. Het lijkt me niet zo erg ook in dat geval van 'denken' te spreken, maar voor hardere gegevens kijken we liever naar flexibiliteit van gedrag dat ver afdijt van aangeboren gedragingen. Ik bespreek nu drie voorbeelden. Eerst de roomsnoepende Engelse pimpelmezen (Hinde & Fisher, 1951), die een uitvinding deden en doorgaven (cultuur), die zeer slim lijkt maar erg dicht bij hun natuurlijk gedrag blijkt te liggen (Gould & Gould, 1994). Daarna het geval van de aardappels en graan wassende makaak-aapjes (Kawai, 1956), dat vrij algemeen wordt aanvaard als voorbeeld van creatief denken en leren (cultuur) bij dieren. Ten slotte de waterbouwkundige prestaties van bevers, die een groot inzicht verraden in complexe technische problemen van zeer gevarieerde aard (Rue, 1964; Wilsson, 1968, 1971; Griffin, 1984; Gould & Gould, 1994).

In de dertiger tot vijftiger of zestiger jaren, kwamen er nog huis-aan-huis melkbezorgers, die in Engeland het bestelde aantal flessen melk 's morgens heel vroeg voor de deur zetten. Minimaal één pimpelmees ontdekte, dat hij door de capsule open te pikken of weg te trekken bij de bovenop drijvende room kon komen (melk werd toen nog niet gehomogeniseerd). De gewoonte van het roomstelen breidde zich snel uit over Engeland en volgens sommigen ook naar het continent. (In Nederland stond de melkman bij mijn weten later op en belde aan om de melk direct te verkopen en meteen betaald te krijgen, wat dus jammer was voor de Nederlandse pimpelmezen). Dit roomsnoepen is duidelijk een grootse ontdekking of uitvinding voor pimpelmezen geweest

en ze hebben de strijd tegen de melkverkopers, die steeds moeilijker te openen en dikkere capsules gingen toepassen, lang volgehouden.

Zoals Gould & Gould (1994) terecht benadrukken moet dit voorbeeld van creatief denken wellicht als schijnvoorbeeld worden beschouwd. Immers de pimpelmezen komen onder andere aan de kost door boombast weg te pellen om de daaronder levende larven op te kunnen eten. Als een slaapdrongen pimpelmees toevallig dezelfde handeling op een melkfles heeft uitgevoerd, heeft hij room gevonden in plaats van larven, dus zo geweldig lijkt de ontdekking niet. Dat vogels zoiets van elkaar overnemen is ook weinig schokkend, want vogels hebben de natuurlijke neiging om naar voedsel te gaan zoeken waar een collega het lijkt te vinden. Het is dus waarschijnlijk dat meerdere vogels na elkaar van de eerst geopende fles proefden en zo leerden dat het lonend is op zo'n fles te gaan zitten en de bek naar binnen te bewegen. Zo kun je veel afdoen van dit oppervlakkig zeer slim lijkende gedrag. Toch is het niet uitgesloten dat het een echte ontdekking compleet met 'Aha-erlebnis' is geweest en dat de verspreiding een vorm van cultuur was.

Een minder omstreden creatieve handeling of uitvinding was die van een jonge vrouwelijke makaak, genaamd Imo, op het Japanse eiland Koshima. Dit eiland is deel van een natuurreservaat en de betreffende troep aapjes is door de jaren heen uitvoerig bestudeerd. Aardappels en graan werden door verzorgers op het strand gelegd, waar de aapjes het eten ophaalden. Rond 1953 merkten waarnemers dat Imo had ontdekt dat het natte zand van de aardappels kon worden verwijderd door ze in het water te wassen. De nieuwe techniek verspreidde zich relatief langzaam onder de groep. Eerst namen Imo's speelkameraadjes het idee over, daarna alle jonge aapjes, daarna ook vele volwassen vrouwtjes en ten slotte ook volwassen mannetjes, met de dominanten als laatsten. (Van de zestig apen spoelden na drie jaar elf apen de aardappels, na zes jaar zeventien, na negen jaar 36). In 1959 begon Imo handjes graan in het water te gooien en ontdekte dat het zand dan zinkt en de graankorrels blijven drijven. Deze techniek werd volgens hetzelfde patroon en ook vrij langzaam door de andere leden van de groep overgenomen. (Na zes jaar wisten negentien aapjes hun graankorrels op deze wijze).

Omdat er niets is in het natuurlijk gedrag van de makaak dat via toeval tot dit wassen van voedsel zou kunnen leiden en de vinding in beide gevallen door hetzelfde individu gedaan werd, lijkt de meest voor de hand liggende verklaring dat het inderdaad nieuwe inzichten, ontdekkingen van Imo waren. De verbreiding van de techniek zou dan een cultureel fenomeen kunnen zijn. Natuurlijk heeft het niet aan meer of minder geslaagde pogingen ontbroken dit verschijnsel van kennelijk creatief handelen weg te verklaren. Echter, dan moeten veel menselijke uitvindingen waarschijnlijk op dezelfde manier worden terugggebracht tot mechanisch handelen, toeval, conditionering en dergelijke. Voor een behaviorist (zie §1.3) ligt die aanpak voor de hand, maar voor de meeste ethologen niet.

Bevers zijn niet alleen in de Fabeltjeskrant technisch begaafde knaagdieren, maar ook in de natuur. Veelal maken ze een woning met enkele kamers op verschillende niveaus in de oever van een rivier of meertje. De woning heeft een gang die voldoende ver onder de waterspiegel in het water uitkomt om ervoor te zorgen dat de bewoners ook in de winter eruit kunnen, als het wateroppervlak bevroren is. De dieren bouwen dammen om het waterniveau te kunnen regelen. Vaak kunnen ze hiermee 's winters het waterniveau laten dalen onder het ijs, zodat ze een luchtkamer tussen water en ijs creëren. Bevers leven van bast en twijgjes van bomen (berk, wilg, populier en dergelijke) en van wortels en stengels van waterplanten. Ze zijn monogaam en leven soms met een aantal families samen in hetzelfde meertje of rivierdeel.

Behalve in hun woning slaan ze ook veel voedsel op in het water onder de uitgang van de woning. Ze kunnen 's winters uit deze reservevoorraad putten. De woningbouw en opslag van voedselvoorraden begint niet zelden vrij laat in het zomerseizoen. De bevers hebben dan in korte tijd grote hoeveelheden materiaal nodig. Ze kunnen grote bomen vellen, waarbij het echtpaar om beurten knaagt. Soms werken ze in grotere groepen samen aan de bevoorrading en bouw van woningen. Als de bomen verder van de oever staan graven de dieren soms vrij lange kanalen naar de bomen toe om het transport te vereenvoudigen. De dammen zijn hele kunstwerken uit bomen, takken, klei, blaadjes en ander geschikt bouw materiaal. Ze dienen om een minimum waterniveau tijdens het droge seizoen te garanderen en bieden de mogelijkheid tijdens hoge waterstanden, als de woningen onder water dreigen te komen, openingen in de dam te maken om het water-

niveau te regelen en zo de woning droog te houden.

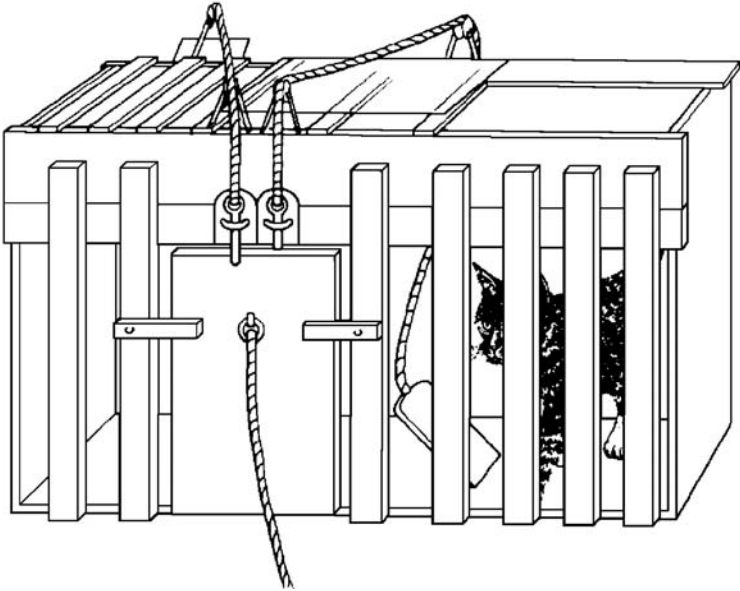
In tegenstelling tot de meeste vogels, die een vrij stereotiep nest bouwen, zien we bij bevers een enorme variëteit aan bouwtechnieken en -materialen. Ze kunnen tijdens de bouw overzien wat stabiel is en wat niet. Ze kunnen wat dreigt weg te drijven vastzetten met stokjes, stenen of wat er maar beschikbaar is. Ze kunnen onderdelen op maat maken, combineren, vlechten, plakken. Kortom ze doen niet onder voor menselijke bouwers met primitief gereedschap. Bovendien blijkt dat ze gebruik kunnen maken van al beschikbare dammen of dijken. Ze kunnen kennelijk plannen hoe ze hun eigen bouwwerk het beste bij het bestaande aan kunnen sluiten en tonen daarbij een verbluffend inzicht in stromingsverschijnselen en de variatie daarvan met de seizoenen. Het is moeilijk je voor te stellen hoe dit alles tot stand zou kunnen komen als de dieren niet een soort inzicht zouden hebben in de waterbouwkundige problematiek, in de toestand van de omgeving, in de mogelijke toekomstige ontwikkeling van de leefomstandigheden en in de technieken en materialen waarmee ze werken. In een experiment waarbij onderzoekers het waterniveau stiekeren via buizen trachtten te reguleren, maakten de bevers uit takken pluggen van de juiste maat die ze in de buizen stopten!

Als deze twintig tot dertig kilo zware zoogdiertjes mensen zouden zijn, zouden we ze zonder aarzelen handig, intelligent en ingenieus noemen. Het zou niet in ons opkomen aan te nemen dat ze *niet* zouden kunnen denken.

1.3 Soorten leermethoden en leerprocessen

1.3.1 Instrumenteel leren

Lloyd Morgan (zie ook §1.1.2) hield in 1896 een voordracht aan de Harvard Universiteit in Boston, waarbij hij onder andere vertelde over zijn hond Toby die geleerd had het tuinhek te openen. Onder zijn gehoor bevond zich de 22-jarige Thorndike (1874-1949), die hierdoor zeer werd geïntrigeerd. Thorndike begon dan ook spoedig zelf te experimenteren met ‘puzzlekooien’ waaruit honden, katten, kippen en dergelijke moesten proberen te ontsnappen door een mechaniek te bedienen. Thorndike was niet erg onder de indruk van de prestaties van zijn proefdieren en verklaarde het gedrag dat hij zo waarnam als stimulus-respons associatie-



Figuur 2 Kat in puzzelkooi van Thorndike

ketens. Hij noemde het ‘vallen-en-opstaan’ of ‘probeer-en-corri-geer’ (‘trial-and-error’) leren, maar tegenwoordig noemt men het instrumenteel leren. Thorndike ontdekte geen ‘inzicht’ bij de dieren en zag geen aanleiding aan te nemen dat er sprake zou zijn van redeneren, anticiperen en dergelijke. Wel leek het hem redelijk aan te nemen dat de dieren subjectieve sensorische indrukken hebben en gevoelens van tevredenheid als een ontsnapping lukt. Thorndike ontdekte met deze proeven het belang van bekrachtiging (‘reinforcement’), dat leren sneller gaat als correct gedrag beloond wordt. De beloning is de (positieve) bekrachtiger. Men kan in leerproeven ook verkeerd gedrag straffen (negatieve bekrachtiger), of werken met zowel positieve als negatieve bekrachtigers.

De theorie over de stimulus-respons associatieketens en de conclusie dat er geen sprake zou zijn van ‘inzicht’ volgde natuurlijk niet echt uit de meetresultaten. Neem als voorbeeld een kat in een puzzelkrat (figuur 2), met buiten de krat een vis als lokmiddel, dat wil zeggen als potentiële bekrachtiger. Hoewel het de eerste keer vaak zo’n vijf minuten duurde voor ze ontsnapten, kwamen de meeste katten er al na enkele keren binnen dertig seconden uit.

Daarna ging de verbetering van de prestatie geleidelijker. De snelle verbetering aan het begin zou je ook als een vorm van inzicht in de probleemstelling kunnen opvatten. Thorndike gaf wel toe dat dit instrumentele leren moeilijker is dan eenvoudige conditionering (zie §1.3.2), vooral als het dier een relatief onnatuurlijke handeling moet verrichten om uit de krat te komen. Hij zag het zoeken naar de oplossing als probeergedrag, niet als inzicht of denken of systematisch exploreren. Thorndike stapte na zijn promotiewerk met de puzzlekooien over op de menselijke leerpsychologie, waar zijn belangrijkste motto werd: oefenen, oefenen, en nog eens oefenen, maar zorg dat het oefenen bevrediging schenkt. De grote invloed van deze lol in het oefenen noemde hij de “wet van het effect” en die verwijst nog naar de beloning voor het ontsnappen van de katten uit de puzzlekooien. Het kenmerkende van instrumenteel leren is dat de bekrachtiger een beloning is voor de correcte respons en dat het beloonde gedrag niet ‘natuurlijk’ hoeft te zijn.

1.3.2 *Klassiek conditioneren*

Als een jonge hond iedere dag op een bepaalde tijd voedsel krijgt, zal het dier na een aantal dagen de geluiden geleerd hebben die voorspellen dat er voedsel komt. Al bij het openen van het blik voer of het schrapen van het voedsel uit het blik in de etensbak, zal hij aan komen rennen. Koeien lopen naar de trog, als de boer met het voer aankomt. We vinden dit niets bijzonders en zeggen dan dat de dieren geconditioneerd zijn. Dieren zijn dus geconditioneerd als ze met natuurlijk gedrag reageren op een kunstmatige prikkel, die oorspronkelijk (voor de conditionering) niet tot dat gedrag zou hebben geleid. Een bepaald geluid of visuele prikkel kan door conditionering relatief gemakkelijk geassocieerd worden met natuurlijk gedrag van het dier, vooral met eten of drinken. De kunstmatige prikkels kondigen aan wat er gaat komen en het dier kan daarop anticiperen. Dat leervermogen is in natuurlijke omstandigheden nuttig om de tekenen te leren herkennen die wijzen op de aanwezigheid van voedsel, drinken of gevaar. Conditioneren komt universeel voor in het dierenrijk, ook bij de mens en dat wist Thorndike toen hij zijn nieuwe vorm van leren, het instrumenteel leren, onderzocht. Terwijl bij conditioneren een nieuwe stimulus geassocieerd wordt met bestaand natuurlijk gedrag en dat natuurlijke gedrag (eten bijvoorbeeld) de beloning

is, wordt bij instrumenteel leren nieuw (en eventueel onnatuurlijk) gedrag door bekrachtiging geleerd. Conditioneren is meer stimulusleren of waarnemingsleren, Thorndike's instrumenteel leren is eerder reactieleren, het leren van nieuwe motorprogramma's.

Pavlov ontdekte in 1905 dat ook reflexen, dat wil zeggen lichaamsprocessen die niet onder invloed van de wil staan, zoals de excretie van klieren, de hartslag, of de pupilreflex geconditioneerd kunnen worden. Het meest bekend is de speekselproductie van honden, die Pavlov gebruikte als indicator om aan te geven of de dieren twee gebeurtenissen hadden geassocieerd. Als hij een bel liet rinkelen en tien seconden later vlees aanbood, ging de hond na enige herhalingen al kwijlen als de bel geluid werd. Pavlov noemde dit conditioneren, maar tegenwoordig noemt men het 'klassiek conditioneren'. Het vlees is de ongeconditioneerde stimulus, dat wil zeggen de prikkel die vóór het leren al toename van de speekselproductie (de ongeconditioneerde respons) veroorzaakt. De bel heet de geconditioneerde stimulus, omdat deze van nature geen stimulus voor de kwijlreflex is, maar dat alleen door de herhaalde associatie met de natuurlijke stimulus is geworden. Het vlees is een bekrachtiger voor het kwijlen, en het kwijlen is zowel de natuurlijke (ongeconditioneerde) als de geconditioneerde respons. Soms is er enig verschil tussen de natuurlijke en geconditioneerde respons. Dat is niet zo vreemd, omdat bij de natuurlijke respons de echte prikkel (vlees) waarneembaar is en bij de geconditioneerde respons alleen een substituuut (bijvoorbeeld een toon). Het substituuut leidt alleen tot de verwachting van vlees, maar is niet het vlees zelf.

Pavlov ging ervan uit dat er speciale sensorische analysatoren worden ontwikkeld in het zenuwstelsel tijdens het conditioneren, die de geconditioneerde stimulus konden detecteren en daarmee het kwijlen aansturen. Dit heet om voor de hand liggende redenen de stimulus-substitutietheorie. We kunnen denken aan een zenuwnetwerkje dat het kwijlen stuurt en dat via aangeboren banen informatie uit het visuele systeem krijgt zodra er voedsel wordt gezien. Tijdens het conditioneren wordt dan een 'belnetwerkje' in het auditieve systeem ontwikkeld en worden verbindingen naar het 'kwijlnetwerkje' gelegd. Activering van het belnetwerk kan dan net zo goed het kwijlnetwerk activeren als aanvankelijk alleen het visuele voedselherkenningnetwerk kon. Behalve een positie-

ve bekrachtiger bleek ook een negatieve bekrachtiger te kunnen werken. Als een luchtstootje op het hoornvlies van het oog wordt gegeven, lokt dat de oogknipreflex uit. Als hieraan een toon voorafgaat, leren dieren die toon te gebruiken om hun oog te sluiten vóór de 'straf', de negatieve bekrachtiger komt. Als men ophoudt het luchtstootje te geven na de toon verdwijnt de oogknipreactie geleidelijk. Dit heet extinctie van de geconditioneerde reflex. Ex-tinctie treedt natuurlijk even goed op bij leren met positieve bekrachtiger. Als de bel van Pavlov niet langer wordt gevolgd door voedsel, neemt de kwijlreflex geleidelijk af en verdwijnt ten slotte.

Pavlov ging verder en conditioneerde honden onder andere om te kwijlen als de middelste C op de piano werd aangeslagen. Het bleek dat dan ook in de buurt liggende tonen het kwijlen konden starten, maar dat tonen die verder weg lagen dat niet konden. Pavlov noemde dit verschijnsel 'generalisatie'. Hij vond dat de afstemming verscherpt kon worden (generalisatie wordt vermindert) door naastliggende tonen als negatieve bekrachtiger te gebruiken tijdens het conditioneren. Verder vond hij een verschijnsel dat hij 'synthese' noemde. Als een hond geconditioneerd was te kwijlen op geluid van een stemvork en fluit samen, of op licht en geluid samen, reageerde hij niet op de componenten afzonderlijk, dus bijvoorbeeld niet op de fluit alleen. Dit weerlegt aannamen van sommige vroegere filosofen (onder andere John Locke, 1632-1704) dat mensen wel en dieren geen combinaties van gebeurtenissen kunnen leren. Men kan dieren op vrij ingewikkelde gebeurtenissen conditioneren. Bijvoorbeeld op het tonenrijtje (melodietje) C-D-E-F, waarbij ze het melodietje niet verwarren met enige van de 23 andere mogelijke volgorden van deze vier tonen. Pavlov zocht de verklaring voor al zijn bevindingen in processen van excitatie en inhibitie (prikkeling en remming) in het zenuwstelsel, en hij stelde mens en dier wat leren betreft, afgezien van de taal, op één lijn.

Klassiek conditioneren is zoals gezegd niet alleen maar een laboratoriumgebeuren. Veel dieren leren volgens hetzelfde principe allerlei soorten voedsel te herkennen. Als ze iets waarnemen dat past bij een aangeboren zoekbeeld en het in de mond nemen, worden ze òf beloond (juiste smaak en substantie) òf gestraft (omdat het vies of keihard is bijvoorbeeld). Zo leren ze door klassiek conditioneren te preciseren wat eetbaar is (positieve bekrachtiging) en

wat niet (negatieve bekrachtiging). Dieren leren dankzij het proces van klassiek conditioneren verschijnselen herkennen die iets goeds of juist gevaar aankondigen, dat wil zeggen verschijnselen die een voorspellende waarde hebben. De geconditioneerde stimulus en de natuurlijke reflex moeten wel binnen korte tijd na elkaar plaats vinden, bijvoorbeeld binnen twintig tot zestig seconden, en de geconditioneerde stimulus moet steeds voorafgaan aan de natuurlijke prikkel, deze aankondigen. De eis dat dit tijdsinterval voor klassiek conditioneren vrij kort moet zijn, werd algemeen bevestigd in allerlei proeven en werd dus gezien als een essentieel kenmerk van conditioneren.

Het was dan ook een tamelijk grote schok toen John Garcia in de zestiger jaren een vorm van conditionering bij ratten beschreef, waarbij het interval tussen de geconditioneerde stimulus en de natuurlijke reactie vele uren bedroeg. Men ziet dat nu als een vorm van voorkeurverband tussen bepaalde stimuli en responsen. Dat wil zeggen, het zenuwstelsel heeft kennelijk een ingebouwde voorkeur voor de tijdsduur die tussen bepaalde soorten stimuli en responsen moet verlopen. Als ik meteen had vermeld dat Garcia's onderzoek ging over het verband tussen het eten van ziekmakend voedsel en het ziek worden vele uren later, leidend tot een voedselaversie voor dat type voedsel, dan zou deze bevinding waarschijnlijk triviaal hebben geleken. In het kader van de overige bevindingen met klassiek conditioneren is het echter een zeer opvallende aangeboren voorkeur. In plaats van de ratten met het voedsel zelf ziek te maken deed Garcia dat overigens met röntgenstraling, zodat hij het interval tussen voedsel eten en ziek worden vrij kon variëren. Pas toen tussen eten en ziek worden een flink aantal uren verliep, ontstond de aversie tegen het specifieke voedsel.

Dit type aangeboren leervermogen is zelfs nog specifieker. Niet alleen vereist het een voldoende lang interval tussen het ziekmakende voedsel en het ziek worden om de aversie tot stand te brengen (meestal in één enkele ervaring!), maar de aversie betreft bovendien niet alle waarneembare aspecten van het voedsel. De rat eet wel voedsel dat er hetzelfde uitziet als het voedsel waar het dier eerder ziek van werd, mits het voedsel maar anders smaakt en ruikt. De aversie hangt ook niet aan andere begeleidende verschijnselen en omstandigheden, zoals geluiden of ruimtelijke posities, maar betreft alleen smaak en reuk. Toch kan de rat goed zien en horen en kunnen diverse andere gedragingen wel met visuele of auditieve stimuli worden geconditioneerd.

Dit alles is natuurlijk uiterst zinvol in de strijd om te overleven, maar toont haarfijn dat niet zo maar elk verband geleerd kan worden. De rat zoekt en vindt zijn voedsel normaliter in het donker en visuele stimuli hebben dus nauwelijks enige waarde bij de voedselkeuze. Dat ligt anders bij dagvogels en die kunnen dan ook wel een aversie leren tegen voedsel met bepaalde visuele kenmerken. Het zenuwstelsel moet de verbanden kunnen leggen en kan dat kennelijk bij de rat niet tussen ziek worden en visuele stimuli, wel tussen ziek worden en geur- en smaakprikkelers. Dagvogels kunnen wel het verband tussen visuele stimuli en ziek worden leren, maar weer niet tussen ziek worden en de geur van het voedsel. Wat geleerd kan worden is dus zelfs bij klassiek conditioneren soortspecifiek en afgestemd op het natuurlijke gedrag, op de normale interacties met de habitat van de soort. Die afstemming omvat tijdsaspecten en waarnemingsaspecten.

1.3.3 Operante conditionering

J.B. Watson (1878-1958) lanceerde in 1913 de term *behaviorisme* voor een onderzoeksprogramma waarin mentale processen als oorzaak van waarneembaar gedrag werden ontkend. Alle leren was volgens behavioristen in feite het opbouwen van ketens van geconditioneerde reflexen. Zelfs de autonome reacties van het lichaam waren volgens Watson door conditioneren ontstaan. Hij ontkende dus ook aangeboren gedragingen en ging ervan uit dat alle gedrag en alle reflexen door leren ontstaan. Bij een keten geconditioneerde reflexen zou de vorige actie van een dier dan de stimulus voor de volgende actie zijn. Men mocht als behaviorist volgens Watson niet speculeren over processen in het zenuwstelsel of over mentale (dus verborgen) processen. Watson's behaviorisme was een directe reactie op de slimme Hans geschiedenis en baseerde zich op de bevindingen van Thorndike en Pavlov betreffende conditionering. Watson werd in 1920 op 42-jarige leeftijd ontslagen bij de Johns Hopkins Universiteit wegens een affaire met een assistente en heeft daarna geen rol meer gespeeld in het behaviorisme.

Het behaviorisme werd vooral gedragen door C.L. Hull (1884-1952) van de Yale Universiteit, die trachtte de psychologie terug te brengen tot een klein aantal principes die zowel voor (bijvoorbeeld) ratten als voor mensen moesten gelden. Alle gedrag moest in deze visie worden opgevat als responsie op stimuli, waarbij fac-

toren als 'drift' en 'gewoonte' de hoofdrol spelen. Hull trachtte complexe verschijnselen te verklaren als samenstel van simpele mechanismen, maar had het moeilijk met vele vormen van natuurlijk gedrag. Het speels ophalen van een weggegooid stuk door een hond paste eigenlijk al niet meer in de theorie. Er ontstond een controverse met E.C. Tolman (1886-1959), die zich ook behaviorist noemde, maar toch uitgebreide cognitieve processen bij dieren postuleerde. Van Tolman komt bijvoorbeeld het idee van een 'cognitieve kaart'. Een 'kaart-in-het-hoofd' is duidelijk anders dan een route-instructie (stimulus-respons keten), waartoe de overige behavioristen zich wilden beperken.

B.F. Skinner (1904-1990) werd de opvolger van Hull als belangrijkste pleitbezorger van het behaviorisme. Hij benadrukte dat gedrag van mens en dier geheel gevormd kan worden door de juiste bekrachtigingsschema's te kiezen tijdens het leren. Skinner ontwikkelde het begrip operante conditionering, wat nog steeds van groot belang is voor gedragsonderzoek aan dieren: *Operante conditionering is het proces waarbij men een bepaald spontaan (zonder specifieke stimulus) optredend gedrag beloont of bestraft, zodat het vaker of minder vaak op gaat treden*. Dit ligt dus eerder in het verlengde van het instrumentele leren volgens Thorndike dan van het klassieke conditioneren volgens Pavlov.

Het door de supervisor gewenste gedrag wordt bekrachtigd met een kleine beloning. Skinner ontwierp een automatische methode voor het induceren en registreren van herhaald gedrag, de 'Skinnerbox', die is afgeleid van de puzzelkooien van Thorndike. Skinner stelde dat dieren een keten van pure reflexen leren opbouwen en geen cognities hebben. In tegenstelling tot Hull negeerde Skinner gewoon alles wat niet in de theorie paste. Het verrassende van zijn experimentele werk is vooral hoe goed het mogelijk blijkt het gedrag in een Skinnerbox te vormen. Als voorbeeld noem ik de rat die hij leerde aan een touwtje te trekken om een knikker te laten vallen, die knikker op te pakken en in de voorpoten naar een buisje te dragen, en ten slotte de knikker in het buisje te gooien, waarna de beloning in de vorm van voedsel tevoorschijn kwam. Bertrand Russell (1872-1970; bekende Engelse filosoof, maatschappijcriticus, mathematicus en literator), die bepaald geen aanhanger van het behaviorisme was, heeft al eens cynisch opgemerkt dat het uitgangspunt van Skinner in de praktijk wel erg effectief is. De Engelse 'public schools' bewezen dat volgens hem voldoende. Alle afgestudeerden zijn precies op de

juiste manier geconditioneerd voor een diplomatieke of vergelijkbare functie, allen met dezelfde ketenreflexen!

In de praktijk van het operante conditioneren moet men meestal beginnen met ‘shaping’ een soort stap-voor-stap conditionering van het dier tot het gewenste gedrag is gevormd. Stel je wilt een dier op een knop laten drukken, maar hij doet dat niet binnen een redelijke termijn bij toeval. Dan kun je wel gaan zitten wachten tot je een ons weegt, maar het is effectiever het dier dan te geleiden of sturen. Je belooft bijvoorbeeld bewegingen die al enigszins in de richting van de knop gaan met wat voedsel. Daardoor zal het dier vaker in die richting dan in andere gaan bewegen, en zo ‘geleid’ je dan met opeenvolgende beloningen verder richting knop. Als het dier uiteindelijk bij iedere test de neiging heeft richting knop te lopen, beloon je alleen nog als hij de knop aanraakt en zo verder tot het gewenste knopdrukgedrag is geconditioneerd.

Skinner en vele volgelingen meenden aanvankelijk dat elk gewenst gedrag langs deze weg kon worden geleerd. De leraar vormt uit ongedifferentieerd gedrag het gewenste gedrag zoals een beeldhouwer uit zijn ongevormde materiaal een kunstwerk scheidt. De eerste aanwijzing dat dit niet zo is werd door enkele leerlingen van Skinner in de vijftiger jaren gevonden. Ze leerden onder andere varkens om munten naar een ‘bank’ te brengen. Na enige tijd begonnen de varkens op de procedure te improviseren. Ze lieten bijvoorbeeld eens een muntje vallen, gingen er naar staan wroeten en brachten het dan pas weg. Vervolgens lieten ze steeds vaker muntjes vallen. Het wroeten werd bij volgende rondes steeds uitgebreider en op den duur brachten de varkens helemaal geen muntjes meer naar hun ‘bank’. Dit soort wangedrag werd bij verder uithongeren alleen maar erger. Er trad steeds een verschuiving op van geconditioneerd naar ‘in-de-buurt-liggend’ natuurlijk gedrag. De onderzoekers schreven: “...it is our reluctant conclusion that the behavior of any species cannot be adequately understood, predicted, or controlled without knowledge of its instinctive patterns, evolutionary history, and ecological niche.” (Breland & Breland-Bailey, 1961).

Het trotse programmapunt van het behaviorisme, dat alles geleerd is en kan worden, dat er geen aangeboren ‘kennis’ bestaat en geen interveniërende variabelen, werd hiermee onderuitgehaald. Daarmee is in vrij brede zin ook een einde gekomen aan de nei-

ging in de psychologie om de opvoeders en leraren de schuld te geven van alles wat er met een individu mis is, wat immers een logisch uitvloeisel van het behaviorisme was. Er zijn aangeboren beperkingen aan het leren en individuele verschillen – zelfs bij de varkens uit het voorbeeld was de neiging om van sparen tot wroeten te vervallen van individu tot individu verschillend. De disposities (aanleg) van dieren om bepaalde verbanden wel en andere niet te kunnen leren, zijn bij operante conditionering inmiddels goed zichtbaar geworden.

Gould & Gould (1994) noemen onder andere de volgende voorbeelden. Men kan een rat gemakkelijk leren een hefboom te bedienen om voedsel te verwerven, maar nauwelijks of niet om een elektrische schok te voorkomen. Omgekeerd kan men het dier gemakkelijk conditioneren omhoog te springen om schokken te vermijden maar niet om voedsel te verdienen. Duiven zijn bereid te pikken om voedsel te verdienen, maar niet om schokken te vermijden en ze zijn bereid om op een platformpje te springen om schokken te vermijden, maar niet om voedsel te verdienen. Al dit soort voorkeuren en de verschijnselen die geconditioneerd gedrag begeleiden (of de bek open of dicht is, een bepaalde houding wordt aangenomen of niet), blijken zinvol te passen bij natuurlijk gedrag van de soort en kunnen dus als soortspecifieke leerdisposities worden gezien. Overigens zijn het improviseren van de varkens en de bijbehorende ‘disposities’ niet het enige argument tegen het behaviorisme. Daarnaast blijken dieren te exploreren en daarbij latent te leren. Dat wil zeggen, ze pikken informatie op die ze later blijken te kunnen gebruiken, ook al zijn ze voor het oppikken van die informatie nooit beloond. Soms gaan dieren nadat ze ergens voedsel hebben gevonden juist op een andere plaats naar meer voedsel zoeken (spontane gedragsvariatie). Soms leren ze iets door de situatie uitsluitend passief waar te nemen, dus zonder actie en bekrachtiging. Een systematische weerlegging van het behaviorisme is onder andere te vinden in Rey (1997).

1.3.4 Modern onderzoek aan leren bij dieren

In principe heeft het werk van Skinner een solide methodologische basis gegeven voor vele soorten diergedragsproeven in het laboratorium. We kunnen er met zijn methode bijvoorbeeld goed voor zorgen dat dieren ons met hun gedrag vertellen of ze iets al dan niet hebben waargenomen. Dit is de basis van veel belangrijk



Figuur 3 Dieren kunnen verbazingwekkende dingen leren, mits die aansluiten bij hun natuurlijk gedrag en via geduldig conditioneren verder worden gevormd. We zien hier een ara die de hartenas kan vinden door met zijn tong een klein gleufje aan de achterkant van de kaart te herkennen. Linksonder een basketbalspelend wasbeertje en rechtsonder een pianospelend varken (M. Breland-Bailey, 1986).

waarnemingsonderzoek aan allerlei diersoorten. De methode moet men dan los zien van de nu als achterhaald beschouwde theorie van het behaviorisme.

M. Breland-Bailey (1986) heeft sinds 1947 samen met haar echtgenoot (K. Breland) in hun bedrijf ABE (Animal Behavior Enterprises) op bestelling dieren de meest fantastische acties geleerd (figuur 3). De Brelands kunnen dieren complete toneelstukjes op laten voeren, maar M. Breland-Bailey vat de ervaringen hiermee als volgt samen: *“A particular animal might make associations easily, others not at all. There is no general learning ability. The kind of association to*

be mastered should be related to the kind of associations that are important in the animal's niche." Er bestaat dus niet zoiets als een algemeen leervermogen, maar wel een taakspecifiek en soortspecifiek leervermogen.

De opkomst van de ethologie heeft ook geleid tot waarnemingen aan leerprocessen in de natuur, waar dieren (inclusief de mens) vaak door imitatie van soortgenoten leren (na-apen), of door verwerking van één enkele ervaring (one-trial-learning), maar natuurlijk ook door conditioneren via straf en beloning en door allerlei vormen van instructie. Dankzij deze waarnemingen is de complexiteit van het natuurlijk gedrag beter zichtbaar geworden en is de bereidheid gegroeid ook voor andere soorten dan de mens mentale processen aan te nemen. In het geciteerde artikel van mevrouw Breland-Bailey benadrukt zij dat ze – net als vele andere behavioristen in de Verenigde Staten – de ethologische artikelen uit Europa in de vijftiger en zestiger jaren als ‘eye-openers’ ervoer. Ze vat die les onder andere samen als: *“Every animal is the smartest for the ecological niche in which it lives – if it were not, it would not be there.”*

Bij de drie besproken vormen van conditioneren speelt de associatie (koppeling) van een *externe* gebeurtenis, situatie of object met een bepaald gedrag van het dier de hoofdrol. In klassiek conditioneren leert het dier de geconditioneerde stimulus voortaan als aankondiging te zien van de beloning (voedsel) en associeert deze dus met eetgedrag, waarbij het voedsel de bekrachtiger is. Bij het instrumentele leren wordt een hele gedragsafloop (bevrijden uit de puzzlebox) beloond en leert het dier dus dat gedragsprogramma met de beloning te associëren. Bij operante conditionering wordt bepaald gedrag door de leraar ‘gewenst’ gevonden en beloond, waarna het dier het betreffende gedrag en de beloning leert associëren. De associatie betreft in al deze gevallen externe omstandigheden (stimuli, *S*) met gedrag (responsen, *R*) en de behavioristen gingen ervan uit dat alle gedrag uit ketens van zulke *S-R* paren moest bestaan. Interne toestanden of subjectieve ervaringen die zouden kunnen interveniëren tussen *S* en *R*, spelen in hun theorie en proefopzetten geen rol. In de vrije natuur, maar ook in het laboratorium, kunnen dieren echter vrij veel leren door exploratie en spelen en je kunt je afvragen wat daarbij nu de bekrachtiger is, wat wordt met wat geassocieerd? Of men kan zonder bekrachtiger leren, of de bekrachtiger is een intern proces, zoiets als ‘er lol in hebben’.

Thorndike vond tevredenheid een acceptabele bekrachtiger, maar de behavioristen niet, omdat ze alles in termen van stimulus-respons ketens zonder tussenliggende (interveniërende of interne) variabelen wilden verklaren. Tolman nam, al noemde hij zich behaviorist, toch interne processen aan als interveniërende variabelen tussen stimulus en respons, bijvoorbeeld de al genoemde cognitieve kaart, een complexe vorm van ‘kennis’ dus. Een cognitieve kaart van de directe leefomgeving wordt door exploratie of spelenderwijs opgebouwd. Bij exploratie en spelen wordt de bekrachtiger niet door een experimentator gegeven, maar is zoiets als wat we bij mensen ‘bevredigen van nieuwsgierigheid’ of ‘lol’ zouden noemen. Dat dieren zoiets als exploreren van de omgeving ondernemen, betekent dat ze gedrag kunnen starten zonder externe stimulus. Dat type gedrag zonder stimulus noemde men vroeger wel ‘instinctief’, maar dat woord heeft zijn populariteit in de wetenschap een beetje verloren. In het begin van de eeuw had dit concept in de psychologie een zeer ruime betekenis en viel er bijna alle gedrag onder dat spontaan, zonder externe stimulus, kon ontstaan. Ethologen gebruiken het woord tegenwoordig (als ze het al gebruiken) in een veel beperktere zin voor zeer stereotype gedragspatronen, zoals vaste actiepatronen. Men heeft ontdekt dat zulk stereotiep gedrag zelfs als taxonomisch criterium kan dienen, dat wil zeggen als criterium om verwantschap tussen soorten vast te stellen. Lorenz nam aan dat de basis van een vast actiepatroon een zogenaamd centraal programma is, waarvan het verloop en de timing niet afhankelijk zijn van prikkels uit de omgeving, geen terugkoppeling nodig hebben. Zo’n programma moet volgens hem – onder andere omdat het soortspecifiek is, – erfelijk bepaald zijn, een fylogenetisch ontwikkeld programma. Deze ‘programma’-terminologie is te verkiezen boven de meeste psychologische termen, zoals ik in §1.4.1 zal betogen, omdat die directer verwijst naar onderliggende neuronale netwerken, die hersenprogramma’s zouden kunnen worden genoemd.

Een aantal vormen van leren die door ethologen zijn ontdekt, hebben veel weg van een invulprogramma. Het aangeboren gedragsprogramma ligt bijna geheel vast, maar enige niet in detail voorspelbare parameters of details moeten door ervaring worden ingevuld. Het meest bekende voorbeeld hiervan is ‘imprinting’, het inprenten van de kenmerken van de ouder of van de soort. Dit is het meest bestudeerd bij de wilde eend, onder andere door K. Lorenz.

Zo'n tien tot achttien uur nadat het eendekuiken uit het ei is gekropen staat moeder eend op van het kraambed en wandelt weg. De kuikentjes moeten haar dan volgen en bij haar blijven, dus niet achter een verkeerde moeder aanlopen. Rond die tijd blijkt bij de kuikentjes kortstondig het 'ouder-inprent' programma in actie te zijn. Wat dan op de juiste tijd op de juiste manier beweegt en eventueel aan nog wat perceptuele randvoorwaarden voldoet, wordt ingeprent als moederbeeld. Vanaf dat moment is die eend of dat vervangende voorwerp de moeder voor de kuikentjes. Laat men in plaats van de moeder een speelgoedtreintje voorbij gaan of zelfs een mens dan kunnen de arme kuikentjes die beelden inprenten als 'moeder'. Ze zullen dan hun leven lang het treintje of de mens als moeder zien of na seksuele rijping als soortgenoot waarmee gepaard kan worden. In de natuur, zonder onderzoekende etholoog in de buurt, zal deze invuloefening 'dit-is-moeder' normaal gesproken goed gaan. De timing is prima en het principe zorgt ervoor dat de kuikentjes ook in de drukte van grote groepen volwassen eenden en kuikentjes bij de juiste moeder kunnen blijven. Het 'moeder-volgen' programma ligt geheel en al klaar voor gebruik en alleen de vraag 'hoe ziet moeder eruit?' moet nog na de geboorte worden beantwoord en wel snel en definitief tijdens een relatief korte gevoelige periode. Voor de moeder is het zaak tijdens die gevoelige periode bij haar kuikentjes te zijn, anders lopen die voortaan achter een buurvrouw aan.

Een vergelijkbaar invulprogramma, maar van minder rigide aard kennen veel vogels voor het leren van vijandbeelden. Oudere vogels kennen de lokale jagende vogels die geneigd en in staat zijn hen te consumeren of hun kindertjes op het menu te zetten. Als zo'n gevaarvogel in de buurt komt roepen ze als het ware "aanval-len!", de 'mobbing call' (verjaagroep), waarna vele moedige soortgenoten toesnellen om in groepsverband de jager te verdrijven. Het blijkt nu dat de jonge vogels via deze verjaagroep leren hoe de vijand eruit ziet. Curio (1978) heeft dit in een elegant experiment aangetoond.

Twee kooitjes met respectievelijk volwassen vogels en hun 'leerlingen' keken uit op een soort draaibaar toneeltje waarop opgezette vogels stonden. Terwijl de volwassenen een roofvogel zagen en hun verjaagroep schreeuwden, keken de leerlingen echter naar een onschuldige vogel. Die bleek voor de leerlingen vanaf dat moment een vijand, want vanaf dat moment schreeuwden zij de ver-

jaagschreeuw en toonden tekenen van angst of verjaaggedrag zodra ze de onschuldige vogel zagen. De verjaaggroep van de volwassen vogels betekent dus voor de jonge vogels zoiets als: 'kijk zo ziet een gevaarlijke vijand eruit, onthoudt dat goed'. Het aangeboren programma omvat 'wat te doen als een vijand opduikt', maar vereist als invuloefening 'hoe zien vijanden eruit?'.

Dit doet denken aan Pavlov's idee dat er stimulussubstitutieschema's worden ontwikkeld. In de tabel 'vijand' komen een aantal 'beelden' van vijanden te staan en de tabel kan langer en langer worden met ervaring, maar de (lege?) tabel 'vijand' is aangeboren. Er is geen speciale tijdsdruk bij het invullen van vijandbeelden. Men moet wachten tot een vijand opduikt. Daarin verschilt dit invulprogramma van het ouderinprenten en terwijl er natuurlijk maar één ouderbeeld hoeft te worden vastgelegd, moet er ruimte zijn voor een groot aantal vijandbeelden.

Wat opvalt bij deze bevindingen, is dat zeer effectief leren op kan treden zonder enig denkwerk van de kant van het lerende dier. Er is nauwelijks of geen individuele slimheid nodig. De ethologie heeft inderdaad laten zien dat er veel meer slimheid aangeboren is, dat wil zeggen van evolutionaire aard is, dan men vroeger dacht. Bovendien is die slimheid van beperkte aard, de programma's zijn nogal feilbaar in veranderde omstandigheden. Het lijkt niet zo'n goed idee om kuikentjes bloot te stellen aan het risico dat ze een zwerfkat of etholoog als moeder adopteren! Echter, het principe is eenvoudig en zeer succesvol onder normale natuurlijke omstandigheden en dat is voldoende.

Iets dergelijks geldt voor de vaste actieprogramma's. Een broedende gans die een ei buiten het nest meent te ontwaren, gaat erop af en sleept het ei achteruit lopend terug het nest in door er met de achterkant van de snavel tegen te duwen en heen en weer gaande kopbewegingen te maken. Wat het dier 'mijn ei' noemt is nogal rekbaar en ook kubusjes en veel te grote eieren, of verkeerd gekleurde eieren vallen onder de definitie en worden het nest ingesleept. Als het dier begint een ei naar binnen te slepen en je haalt het ei stiekem weg, dan zeult ze toch gewoon door met dezelfde snavelbewegingen. Een vast actieprogramma kan, als het eenmaal door een tekenstimulus gestart is, niet gestopt worden voor het af is. Dit alles is natuurlijk zeer bekend en ik spel het daarom niet verder uit. Het voorbeeld laat weer zien dat aangeboren programma's met een beetje slordige criteria (wat is mijn ei?) meestal suc-

cesvol genoeg zijn in de natuur, zolang onderzoekers maar niet ingrijpen in de omstandigheden. Het toont ook waar de aangeboren slimheid zijn grenzen heeft, namelijk in de preciese definitie van de feitelijke kenmerken die ‘mijn ei’, ‘mijn moeder’, ‘vijand’, ‘voedsel’, enzovoorts definiëren.

Spreekt al deze bevindingen van vaste actiepatronen, imprinting en conditioneren niet het idee dat dieren kunnen denken tegen? Ja en nee. Ja in de zin dat veel gedrag en gedragsmogelijkheden al vast blijken te liggen bij de geboorte. Nee in de zin dat de relatief primitieve vaste programma's ook bij een beperkt aantal hersencellen nog ruimte laten voor andere zaken, die minder invariant zijn en meer creativiteit vereisen. Veel soorten vogels zijn bijvoorbeeld zeer flexibele navigatoren en kunnen zeer goed de weg vinden in een complex leefgebied. Ook zijn er soorten met een zeer gevarieerd dieet en flexibele strategieën om aan de kost te komen. We hebben verder in §1.2.3 het voorbeeld besproken van de bevers, waar men redelijkerwijs van kan aannemen dat ze een vorm van technische inventiviteit bezitten, en het voorbeeld van de uitvinding om voedsel te wassen door een makaak-aapje. De ethologie heeft het behaviorisme dus van twee kanten uitgehold. Enerzijds door aan te tonen dat er veel aangeboren, dus evolutionaire in plaats van individuele slimheid is, en anderzijds door te laten zien dat natuurlijk gedrag zo complex kan zijn dat men in veel gevallen denken en flexibiliteit bij het individu moet veronderstellen. Mentale processen, zoals bijvoorbeeld nieuwsgierigheid, speelsheid of tevredenheid, cognitieve kaarten en verwante kenstructuren, zijn weer bespreekbare opties voor het dierenrijk.

1.4 Hersenprogramma's voor intelligent en autonoom gedrag

1.4.1 *Hersenprogramma's*

J.Z. Young (1978) schreef een zeer lezenswaardig boekje met als thema, dat de werking van het brein goed kan worden beschreven als een serie hersenprogramma's die ons leven regelen. De hersenen bevatten informatie en kennis beschreven in de eigen taal (codes) van de hersenen:

“The brain operates in certain organized ways that may be described as programs, and the actions of these programs constitute the entity that we call the mind of a person”.

Een programma is in deze opvatting een ‘plan voor actie’ en ons leven bestaat voor een groot deel uit het kiezen uit diverse klaarliggende plannen voor actie. Programma’s kunnen vóór de geboorte tijdens de ontogenie en/of ná de geboorte tijdens leren ontstaan en/of veranderen, of aangeboren zijn, dat wil zeggen fylogenetisch zijn ontstaan. Het is van belang in te zien dat dit begrip ‘programma’ breder is dan is bedoeld in een term als ‘computerprogramma’, hoewel dit laatste natuurlijk ook valt onder de definitie van programma als een plan voor actie. Een machine omvat altijd één of meer ‘plannen voor actie’, ongeacht of het een sortermachine, computer of fiets betreft. Een plan voor actie is een schema van gedetailleerd vastgelegde processen met hun causale samenhangen die leiden tot een bepaald doel, een bepaalde toestand. De causale samenhangen, vastgelegd in de koppeling van de trappers via de trapas met tandwielen, ketting en achteras, leveren een programma voor het omzetten van verticale beenbewegingen in wielrotatie en de verdere fietsconstructie is zodanig dat dit tot het verplaatsen van het fietsend organisme leidt. De causale samenhangen zijn van tevoren zo op elkaar afgestemd, dat er een bepaald doel mee bereikt kan worden, de fiets belichaamt een programma voor verplaatsing. De meeste machines (tot op heden) ‘belichamen’ mechanische programma’s, maar de computer belichaamt naast elektronische ook symbolische programma’s.

Bepaalde toestandveranderingen in de computer hebben van de ontwerper een symboolwaarde toegekend gekregen, bijvoorbeeld 0 of 1 van het binaire getalstelsel. Patronen van deze symbolen hebben ook per definitie betekenis gekregen, zoals via de ASCII-code die het alfabet met leestekens op ‘bytes’ (woorden van acht binaire cijfers) afbeeldt. De algebra van Boole (schakelalgebra) wordt dan in de machine gebruikt om deze nullen en enen (binaire cijfers) via logische poorten, schuifregisters en dergelijke logisch te combineren. In de randapparatuur kunnen de reeksen nullen en enen op allerlei wijze in acties worden omgezet. Bytes kunnen bijvoorbeeld op grijswaarden op een scherm of printer worden afgebeeld, alles volgens afspraak tussen ontwerpers en gebruikers. Alles wat volgens afspraak via invoerapparatuur afgebeeld kan worden op de interne hardware-operaties en via uit-

voerapparatuur weer afgebeeld kan worden in symbolen die de gebruiker aan kan, kan in computerprogramma's worden opgenomen of erdoor worden omgevormd. Alles wat in de computer gebeurt heeft alleen zin per afspraak, per conventie! Computerprogramma's hebben uitsluitend een syntactische structuur, dat wil zeggen dat ze uitsluitend de relaties tussen de tekens onderling regelen. De semantiek, de relatie tussen de tekens en de werkelijkheid waarnaar ze verwijzen, wordt door de ontwerper en gebruiker, dus door externe levende systemen, bepaald. Dit ligt voor hersenprogramma's anders, omdat daarbij de betekenis, de relatie tussen de tekens en de externe werkelijkheid, niet via conventie (afspraak) door een externe ontwerper en/of gebruiker wordt bepaald. We komen hierop nog terug als we de stelling bespreken dat computers geen lichaam hebben en organismen wel. Hier is van belang te benadrukken dat het woord 'programma' in dit boek een bredere betekenis heeft dan wanneer het uitsluitend zou verwijzen naar de syntactische structuren die tezamen een computerprogramma worden genoemd.

Een algoritme (genoemd naar de Arabische mathematicus al-Chwarizmi) is een schema dat men zonder nadenken kan volgen om tot een voorafbekend (soort van) resultaat te komen, zoals een rekenschema om de vierkantswortel uit een getal te bepalen. Het is te vergelijken met een gedetailleerd recept waarin stap voor stap wordt beschreven welke combinatie van ingrediënten en welke handelingen tot een bepaald gerecht leiden. Het kenmerk van een algoritme is het mechanisch karakter, er is geen inventiviteit vereist om de algoritme (het recept) te volgen. Een nadere mathematische karakterisering is niet triviaal, maar voor ons doel ook niet van groot belang. Computerprogramma's zijn algoritmen, maar hersenprogramma's hoeven dat niet te zijn. Ook in de wiskunde zijn er overigens problemen die niet door een algoritme opgelost kunnen worden. Een *beschrijving* van de interactie tussen wind en een windmolen kan zuiver symbolisch zijn en als algoritme op de computer worden gesimuleerd, maar daarmee is een windmolen nog geen algoritme, noch kan men zeggen dat de windmolen een algoritme volgt. Dat zou een verwarring zijn van de kaart met het landschap, van de beschrijving met het ding. Dit is een verwarring van categorieën die in de cognitieve psychologie en in kunstmatige intelligentie nogal veel voorkomt. Men analyseert bijvoorbeeld een interactie van een organisme met zijn omgeving wiskundig (dus benaderend!), simuleert die vervolgens op de computer en

zegt dan (expliciet of impliciet) dat het organisme datzelfde rekenprobleem oplost, diezelfde berekeningen uitvoert. Het lichaam van de vis heeft de beschrijvende hydrodynamische vergelijkingen echter echt niet nodig om te kunnen werken en de hersenprogramma's voor zwemmen hoeven zeker geen vergelijkingen voor de interactie tussen het lichaamsoppervlak en het omringende water te omvatten. De hersenen bedienen de spieren via regelingen die door de omgeving en de sensoren lopen. Zo'n hersenprogramma voor zwemmen heeft dus meer van een regelsysteem-met-lus-door-de-omgeving dan van een rekenautomaat (zie §1.4.4).

Een plan voor actie wat klaar ligt voor gebruik, moet natuurlijk een soort symbolische representatie van de acties bevatten. Een symbool is iets (proces, ding) dat verwijst naar, in de plaats staat voor, iets anders. Objecten (zoals brokken voedsel) en acties (zoals eten), kunnen in het zenuwstelsel slechts symbolisch zijn gerepresenteerd, want in het zenuwstelsel vinden we alleen elektrochemische activiteit van zenuwcellen, geen stukjes kaas of spelende hondjes. Er is in die zin sprake van een symbolische representatie in het zenuwstelsel, een interne representatie van de buitenwereld in termen van neuronale activiteiten en neuronverbanden. De aard van die representatie is nog niet erg duidelijk, maar het woord hersenprogramma verwijst naar dit idee. Hersenprogramma's zijn belichaamd in neuronverbanden en werken op neuronale activiteitspatronen. Voorzover men zo'n activiteitspatroon als een interne representatie van iets aanwijsbaars in de buitenwereld kan zien zou men kunnen stellen dat hersenprogramma's deze interne representaties manipuleren, transformeren. Men moet openstaan voor de mogelijkheid dat deze interne representaties volledig tegenintuïtief van aard zijn. Ze zijn niet gegeven maar juist onderwerp van onderzoek.

We hebben denken al gedefinieerd als het maken van een nieuw programma voor een gewenste doelgerichte actie en gesteld dat 'doelen' hypothesen zijn in onze theorie over organismen. In zeker opzicht is dat wat al te vrijblijvend. Het is bekend dat de hypothalamus bij vertebraten standaarden levert waaraan bepaalde meetwaarden, zoals de concentratie van stoffen in het bloed of de lichaamstemperatuur, moeten voldoen. Vanuit de hypothalamus worden regelmechanismen aangestuurd, die ervoor zorgen dat de ingestelde standaarden worden aangehouden. Zulke instelpunten

van regelsystemen kan men doelen noemen en het organisme is inderdaad een flink deel van de tijd bezig aan deze doelstellingen te voldoen. De hersenprogramma's die voor deze homeostase zorgen zijn aangeboren en voor alle dieren van een bepaalde soort hetzelfde (afgezien van pathologieën natuurlijk). Toch zijn de parameterwaarden van deze programma's niet steeds precies hetzelfde. De wijze waarop een bepaalde grootte geregeld wordt (het programma) is meestal wel invariant, maar de meetwaarden waarbij bepaalde activiteiten starten en stoppen, kunnen van individu tot individu enigszins verschillend zijn. De parameters van deze fylogenetisch ontwikkelde programma's kunnen ontogenetisch nauwkeurig worden afgesteld en zelfs worden bijgesteld door postnataal leren, dat wil zeggen afgestemd worden op de leefomgeving. Denk aan de invuloefeningen bij het leren van het moederbeeld of vijandbeeld als onderdeel van een aangeboren programma, zoals besproken in §1.3.4. Dit zijn als het ware vaste programma's met binnen relatief nauwe grenzen variabele parameters. Voor de aansturing van spieren hebben dieren evenzeer een aantal vaste programma's met afstembare parameters, die postnatale kalibratie toestaan. Het lijkt redelijk aan te nemen dat het leren van een nieuwe beweging bestaat uit het op nieuwe wijze combineren van eenvoudige 'laag-niveau' programma's, waarbij van die laag-niveau programma's nog parameters afstembaar zijn. Men kan zich zo voorstellen dat bij denken en leren nieuwe programma's kunnen worden opgebouwd door combinatie van grote aantallen relatief vaste laag-niveau programma's. Uiteraard denken we bij het concept 'hersenprogramma' niet aan vrij verplaatsbare ('software') programma's, maar aan relatief vast gelocaliseerde ('hardware' of liever 'wetware') programma's, aan neuronale netwerken waarvan de verbindingen (synapsen) worden bijgesteld of veranderd. Ook denken we niet of niet bij voorkeur aan seriële programma's, waarbij alle stappen na elkaar worden uitgevoerd, zoals bij de meeste hedendaagse computers, maar primair aan parallele verwerking.

1.4.2 *Intelligentie*

In encyclopedieën en leerboeken vind je meestal definities van intelligentie die ongeveer als volgt luiden: *Intelligentie is het vermogen om met cognitieve middelen het gedrag succesvol aan te passen aan nieuwe en onverwachte omstandigheden.* Met de term 'cognitieve middelen'

wordt dan zoïets bedoeld als een complex geheel van waarnemen, denken, leren, doen. Mijn eerdere definitie van denken vertaalt dit ongeveer in: “*Intelligentie is het vermogen succesvol te denken*”. Intelligentie zou dus gekwantificeerd kunnen worden als de mate van succes van het denken. Strikt genomen kun je alleen de mate van succes van het ‘doen’ meten, niet van het denken dat er vermoedelijk aan ten grondslag ligt, want denken is niet zichtbaar/meetbaar, doen wel. Je zou intelligentie dan kunnen kwantificeren door dat succes te meten in een aantal omstandigheden en dat is precies wat in de psychologie in de afgelopen eeuw op enige schaal is gedaan. Intelligentie werd in de psychologie lange tijd voornamelijk gezien als een kwantitatieve maat voor cognitieve vermogens van de mens, gemeten aan zichtbaar handelen. Die vermogens werden dan geoperationaliseerd als prestaties op een batterij testen, wat een soort ‘prestatierapport’ opleverde met een aantal cijfers. Dat rapport, al of niet tot één eindcijfer (bijvoorbeeld een IQ) teruggebracht, karakteriseerde de intelligentie van een geteste persoon ten opzichte van een hypothetische gemiddelde burger. Gould (1984) geeft van de trieste geschiedenis van geharrewar, fraude en vooroordelen bij het gebruik van intelligentietests een goed leesbaar en vaak amusant relaas. Sternberg (1985) geeft een goed overzicht van de achterliggende theorieën en van de factoren die men volgens verschillende modellen onderscheidde bij intelligentietests. Dat kon variëren van enkele factoren (taalvaardigheden, ruimtelijk inzicht en dergelijke) tot 150 of meer. Guilford onderscheidde die factoren in twee groepen: de gekristalliseerde vermogens (geleerde en culturele kennis en vaardigheden) en de flexibele aspecten van intelligentie, die tot innovaties kunnen leiden. In de cognitieve stroming is de nadruk meer komen te liggen bij de operaties die ten grondslag zouden kunnen liggen aan intelligentie.

Een evident probleem van de genoemde algemene definitie van intelligentie is de term ‘cognitieve middelen’. Immers men spreekt ook wel over een intelligente voetballer of intelligente autocoureur en dan gaat het vaak niet over denken in zijn intellectuele betekenis. Ik zal in §1.4.4 betogen dat ook het begrip ‘lichamelijke intelligentie’ nodig en nuttig is. Een intelligente boekhouder hoeft nog geen intelligente schaker of voetballer te zijn. Met andere woorden intelligentie (denken/leren) lijkt modulair opgebouwd te zijn en niet alleen hogere cognitieve vermogens te omvatten. Dit uitgangspunt leidt tot de volgende variant van onze

definitie: *X*-intelligentie is het vermogen het gedrag succesvol aan nieuwe en onverwachte *X*-omstandigheden aan te passen. Als je dat vermogen hebt, kost het relatief weinig moeite om op gebied *X* succes te hebben en omdat je vermogens niet, maar resultaten (de mate van succes) wel kunt meten, leidt dit tot mijn voorstel:

Intelligentie op gebied X is een maat voor de verhouding tussen reproduceerbaar succes op gebied X en de daartoe benodigde hoeveelheid moeite (of tijd).

‘Succes op gebied *X*’ refereert aan het vermogen nieuwe problemen op te kunnen lossen en onverwachte situaties aan te kunnen op gebied *X* en dat vaak op innovatieve wijze. Het succes moet niet uitsluitend gebaseerd zijn op routine en hard werk, of op het volgen van aangeboren, ingeslepen of geoefende manieren. Er mogen wel aangeboren of geoefende vaardigheden bij worden gebruikt, maar dan op nieuwe wijze gecombineerd of gecombineerd met nieuwe componenten. Dat intelligentie met *reproduceerbaar* succes te maken moet hebben, is al duidelijk uit het feit dat we menen het te kunnen herkennen en zelfs te kunnen meten. Omdat we braaf en vlijtig uitproberen van alle denkbare oplossingen van een probleem niet intelligent plegen te vinden, moet intelligentie omgekeerd evenredig zijn met de geïnvesteerde moeite voor het succes. Een toevallig éénmalig succes noemen we niet direct intelligent, wat de reden is om het woord reproduceerbaar in de definitie op te nemen.

Uiteraard kan veel ervaring, veel oefening op gebied *X*, de intelligentie in deze zin verhogen, omdat dan veel geoefende vaardigheden klaar liggen voor gebruik en het met dit rijke materiaal gemakkelijker is originele combinaties tot stand te brengen in kortere tijd. Deze voorafgaande ervaring kennen we bij een ander in het algemeen niet, zodat we die niet mee kunnen rekenen in de geschatte hoeveelheid ‘geïnvesteerde moeite’ van de ander. Dat betekent, dat we intelligentie overschatten op gebieden waarop een bepaald organisme veel meer ervaring en oefening heeft dan we denken. Dat is niet erg, want dat is inherent aan het intuïtieve idee van intelligentie op gebied *X* als het resultaat van een combinatie van talent (aangeboren of ontogenetisch ontstaan vermogen om problemen van een bepaalde aard op te lossen) en inzet, oefen-

ning. Creativiteit refereert in het algemeen aan de combinatie van intelligentie op een bepaald gebied, ijver op dat gebied en bereidheid veel van de resulterende producten weg te gooien, zodat alleen de uitschieters gepresenteerd worden.

In feite kan men nooit echt weten of waargenomen gedrag 'intelligent' is in deze zin, want men weet niet welke vaardigheden een organisme door oefening heeft verkregen en kan dus gemakkelijk een goed geoefende vaardigheid voor 'intelligent' gedrag verslijten. Net als bij de begrippen 'doel' en 'denken' hebben we bij 'intelligentie' te maken met een term die gebruikt wordt door een waarnemer W , die gedrag van een waargenomen complex systeem S beschrijft. W heeft een theorie over de aangeboren en aangeleerde vaardigheden van S en als S iets succesvol doet op een wijze die niet uitsluitend verklaarbaar lijkt op basis van de al bekende vaardigheden van S , noemt W dit intelligent. De theorie over complexe systemen zoals organismen, is altijd zeer onvolledig en de theoretische termen zijn dus altijd van voorlopige aard. Desondanks kan men niet gemakkelijk over het waargenomen gedrag en de vermoedelijk onderliggende mechanismen praten zonder zich van zulke termen te bedienen. We zullen ze gaandeweg moeten uitwerken en invullen, vaak ook exemplarisch, dat wil zeggen aan de hand van voorbeelden.

Mijn definitie van intelligentie is ook goed toepasbaar op machine-intelligentie, waar men evenzeer domeingebondenheid vindt en waar ook het aftasten van alle mogelijk oplossingen door een systeem als onintelligent wordt ervaren. Als er niets nieuws in het tentoongespreide gedrag voorkomt, zelfs geen nieuwe combinatie van bestaande gedragelementen, is de karakterisering 'intelligent gedrag' niet op z'n plaats. Men zegt dan wel 'het gedrag is voorgeprogrammeerd'. Dit is overigens een pleonasme, omdat 'geprogrammeerd' al betekent dat het gedrag van tevoren is vastgelegd. (Immers een programma is een *plan* voor actie). Al kunnen we dit pleonasme beter vermijden, het geeft wel aan, dat er gradaties van 'geprogrammeerd' gedrag bestaan: van 'alleen in grote lijnen' tot aan 'in ieder detail van tevoren vastgelegd' gedrag. Hoe meer specifieke details open zijn gelaten in de programmering, hoe flexibeler het programma. Naarmate die flexibiliteit in een grotere variëteit van omstandigheden tot succesvol gedrag leidt, is het systeem intelligenter.

1.4.3 Autonomie en intelligentie

Autonomie wil zeggen een relatief grote onafhankelijkheid ten opzichte van de momentane toestand en mogelijkheden van de omgeving, een relatief grote keuzevrijheid in de interacties met de omgeving, gevoegd bij zelfverzorgend gedrag. Natuurlijk zijn organismen bijvoorbeeld voor hun voedsel in laatste instantie geheel afhankelijk van hun omgeving, maar systeeminterne processen bepalen wanneer voedsel gezocht wordt, hoe en waar, welk type voedsel gezocht wordt, en hoe het zal worden verworven en gegeten. Er zijn zoveel details verschillend van vergelijkbare vorige gedragingen en de voorspelling van de details van het gedrag door externe waarnemers is zo moeilijk, dat men aan moet nemen dat er relatief veel vrijheid is in de planning en uitvoering van het gedrag. Hoewel de globale doelen wel vast lijken te liggen, dat wil zeggen onze hypothesen dienaangaande hebben voorspellende waarde voor het globale gedrag over langere tijd, is er grote autonomie in de wijze waarop ze worden nagestreefd.

Autonomie is een relatief grote onafhankelijkheid van de momentane omgeving en een relatief grote keuzevrijheid bij interacties met de omgeving tengevolge van: (1) zelfverzorgend gedrag door systeeminterne processen (homeostase); (2) zelfverplaatsend gedrag (locomotie); (3) 'plannen' van de interacties met de omgeving in tijd en plaats.

Hoewel er waarschijnlijk geen principiële redenen zijn waarom toekomstige machines niet tot op zekere hoogte autonoom zouden kunnen zijn en wellicht ook ten dele zelforganiserend, zijn er op dit moment geen machines die in deze opzichten vergelijkbaar zijn met organismen (zie ook §1.4.4). Van een machine kan de bouwer ons vertellen wat het doel is en dat doel ligt in de functie van de machine voor de gebruiker: de machine is een gereedschap. Een levend systeem is geen gereedschap in die zin. De doelen van een levend systeem kennen we niet met zekerheid, het zijn hypothesen in onze theorie. De aanname dat overleven, verhogen van de overlevingskansen en kans op voortplanten de hoofddoelen van organismen zijn, heeft voorspellende kracht. Hierop kunnen preciese biologische theorieën worden gebouwd en de aanname is dus wetenschappelijk zinvol gebleken: ze leidt tot nieuwe voorspellingen en verklaart oude bevindingen. In het

kader van de evolutiegedachte kunnen we zeggen dat als we organismen al 'machines' zouden willen noemen, het 'overlevingsmachines' zouden zijn, maar deze term is niet direct verhelderend. Immers, we kennen geen enkel door de mens gebouwd systeem met deze doelstelling, er is geen machine die deze vorm van (organismale) doelgerichtheid vertoont. De metafoor 'overlevingsmachine' leidt dus niet tot nieuwe voorspellingen gesuggereerd door de analogie. De uitspraak is een tautologie $A = A$, omdat volgens de uitspraak dieren overlevingsmachines zijn, maar de enige ons bekende overlevingsmachines zijn dieren! Het helpt ons niet verder organismen 'machines' te noemen; er volgen geen nieuwe voorspellingen uit. Het geeft slechts aan dat we organismen en machines beide alleen als fysisch-chemische systemen kunnen onderzoeken onder hantering van hypothesen betreffende hun doelstellingen. We bestuderen organismen alsof het machines zijn in de zin dat we trachten de causale koppelingen in het systeem en tussen systeem en omgeving in kaart te brengen en in hun samenhang te begrijpen. We trachten de functies van het geheel en van de delen te weten te komen. Zowel machines als organismen beschouwen we als doelgerichte systemen en daarmee zijn ze beide verschillend van alle andere fysisch-chemische processen.

1.4.4 *Lichamelijke intelligentie*

De gepostuleerde hoofddoelen van organismen leiden tot de voorspelling, dat organismen in het algemeen zullen trachten hun eigen lichamelijke integriteit te bewaren, dat ze ernaar zullen streven die ook voor de toekomst zeker te stellen en dat ze naar voortplanting zullen streven. Dit maakt gedrag als vluchten voor gevaar, schuilen, voedsel zoeken, spelen en exploreren, partner zoeken, hofmakerij, paren, nestbouw, territoriumgedrag en dergelijke 'zinvol', dat wil zeggen passend bij de doelstelling. In het organisme komt dit tot uiting in de homeostase, het geheel van alle lichamelijke regelprocessen. Ieder van die regelprocessen heeft een afgeleid doel dat zinvol past in het doel van de totale organisatie. Deze afgeleide doelen liggen onder andere vast in de instelpunten, de streefwaarden van de regellussen. De complexiteit van dit samenspel van regellussen is indrukwekkend en omvat zowel het zenuwstelsel, het neuro-endocrien stelsel en het endocrien stelsel, alle overige organen en weefsels, als moleculaire processen.

Bovendien lopen vele regellussen door de omgeving. Vochttekort bijvoorbeeld leidt tot dorstgevoel en het zoeken van drinkmogelijkheden en drinken. Naarmate de interne regellus verder van de norm komt, wordt de 'drang' om dat te corrigeren groter. Dit alles lijkt triviaal, omdat we eraan gewend zijn zo naar de levende natuur te kijken. Daardoor realiseren we ons vaak niet dat deze lichamelijke processen dag en nacht en parallel (tegelijktijd, zonder steeds op elkaar of op tussenresultaten van elkaar te hoeven wachten) aflopen en gestuurd worden. Onze hersenen werken altijd, ook tijdens de slaap. Dan worden temperatuur, ademhaling, bloedsomloop, enzovoorts, feilloos bijgehouden en geregeld. Een zeer groot deel van ons zenuwstelsel staat in dienst van deze lichamelijke processen. Bovendien zijn de intellectuele functies mede uitingen van de complexe regellussen door de buitenwereld, die nu en op de langere termijn zorgen voor ons overleven en voortplanten. Ook musiceren, schaken en dichten hebben overlevingswaarde, bijvoorbeeld doordat ze ons veilig inbedden in een sociale structuur.

De stelling dat vrijwel alle natuurlijke intelligentie betrekking heeft op succesvolle overleving en voortplanting, moet ook voor de mens gelden. Onze 'hogere hersenfuncties' zijn nieuwere evolutionaire verworvenheden. De veranderingen in het zenuwstelsel ten opzichte van dat van andere primaten of zelfs andere zoogdieren waarop deze functies gebaseerd zouden kunnen zijn, zijn relatief gering en moeilijk aantoonbaar. Net als bij alle andere diersoorten bemoeit vrijwel het hele zenuwstelsel van de mens zich met onze koppeling met de omgeving via het lichaamsoppervlak, met de strategieën voor overleven in een natuurlijk en sociaal milieu. Dit is de lichamelijke intelligentie die de psycholoog en de onderzoekers van de kunstmatige intelligentie zo triviaal vinden, en die de schoolmeester als storend ervaart. De mens heeft een zo grote bewondering voor symboolmanipulatie, zoals die in wiskunde, logica, taal en dergelijke tot uitdrukking komt, dat we direct daaraan denken als we het over 'intelligentie' hebben. Bij pogingen menselijk gedrag te mechaniseren is langzamerhand duidelijk geworden, dat lichamelijke intelligentie heel wat moeilijker te mechaniseren is dan ons vermogen tot symboolmanipulatie. Het is moeilijker een goed voetballende robot te ontwikkelen dan een programma dat zelfstandig wiskundestellingen ontdekt en bewijst, of beter schaakt dan 99,9% van de mensheid. De basis van onze culturele en intellectuele ontwikkeling, van techniek en we-

tenschap, is in feite erg smal als we die willen uitdrukken in de neuronale en lichamelijke verschillen tussen ons en andere hogere zoogdieren. Een nog duidelijker perspectief op deze smalheid krijgen we door hersenen van ‘domme’ en ‘intelligente’ mensen te vergelijken en ons af te vragen welke neurofysiologische basis er is voor de hoogbewonderde symboolprocessen (zie hoofdstuk 4).

Een op het eerste gezicht triviaal, maar in feite fundamenteel verschil tussen organismen en computers is dat computers geen lichaam hebben in de biologische betekenis van het woord. Alles in de computer is in een relatief arbitraire, door de ontwerper met de gebruiker afgesproken code gezet. De vorm, behuizing en omgeving van de machine zijn volledig irrelevant voor de symboolstructuren in de computer. De machine kent en acht het eigen lichaam (de behuizing en bedrading en dergelijke) niet en tracht niet zijn lichamelijke integriteit te bewaren. De computer is uitsluitend een gereedschap van de mens, geen autonoom systeem. In een autonoom systeem ontlenen de signalen hun betekenis aan de causale lussen door de omgeving en moeten dus zijn wat ze zijn om het geheel te laten werken. In een computer ontlenen de signalen hun betekenis aan de afspraken tussen ontwerper en gebruiker en ze zouden net zo goed anders hebben kunnen zijn.

De synergie van organisme en omgeving heeft in een honderden miljoenen jaren durend proces geleid tot hersenprogramma's die zijn afgestemd op de dynamische gebeurtenissen, de causale relaties en de mogelijkheden van de leefomgeving. De relevante wetmatigheden zitten in de lichaamsvorm, het scheidingsoppervlak met de omgeving, de bijbehorende afgestemde stuurschakelingen in het zenuwstelsel en de causale relaties van en met de omgeving. Zwemmen van een vis is een goed voorbeeld van deze gedistribueerde lichamelijke intelligentie. De aangeboren kennis van zwemmen omvat zelfs specialisatie voor wat betreft de zwempatronen. Sommige vissoorten zijn gespecialiseerd in manoeuvreren en zijn één en al roer, zoals de klipvis. Andere vissen zijn zeer goed in accellereren (de snoek bijvoorbeeld, die zijn prooi als het ware bespringt) of kunnen lang en gestaag zwemmen, kruisen, zoals de tonijn. De neuronale netwerken die dit zwemmen van de vis sturen, kunnen we een hersenprogramma voor zwemmen noemen. Daarin spelen vele parallel verlopende regelsystemen een rol en er is geen sprake van een digitaal of een sequentieel (stap voor stap) proces. Kennis van de voedselzoekstrategieën van de soort is dus

in deze lichaamsvormen en de bijbehorende hersenprogramma's meegegeven, aangeboren. De neuronale stuurprogramma's voor snel accelereren zullen anders zijn dan voor langdurig kruisen of soepel manoeuvreren. Bij de mens zijn de bipedale voortbeweging die de handen vrijlaat, de duim in oppositie, ons stembandsysteem en dergelijke, componenten van onze aangeboren kennis over de typisch menselijke interactie met de omgeving. Onze hersenprogramma's zijn daarop afgestemd.

Een aardig voorbeeld van de onderschatting van lichamelijke intelligentie is het fenomeen van de contactinstabiliteit in robots die kunnen tasten en grijpen. Een robot met tasters en vrije, stabiele bewegingsmogelijkheden van de 'armen' blijkt veelal in een onstuitbare trilbeweging (tremor) te komen zodra een rigide oppervlak wordt aangeraakt. Dit wordt wel als een uitdaging van de eerste orde voor de robotica gezien (zie Hogan e.a., 1990). Biologische systemen daarentegen hebben geen moeite met contact maken met, betasten en manipuleren van rigide voorwerpen. Pas als men het probeert na te bouwen blijkt het een geenszins triviaal probleem te zijn! Hogan e.a. (1990) zeggen het zo:

"In biological systems, we see the solutions; the underlying problems are typically disguised. In contrast attempts to accomplish comparable behavior in robotic systems quickly reveal the problems; however, solutions are often less obvious."

Wanneer we rustig rondwandelen, realiseren we ons niet hoeveel regellussen er tegelijkertijd actief zijn om dit mogelijk te maken. In ons zenuwstelsel stromen tijdens dit wandelen miljoenen signalen parallel (tegelijkertijd) binnen van bijvoorbeeld de spierspoeltjes en peeslichaampjes, gewrichten, voetzool, otolietorganen, halfcirkelvormige kanalen, het visuele en auditieve systeem, de huidzintuigen, enzovoorts. Al die signalen worden continu en parallel verwerkt in de neuronale netwerken die ons wandelen sturen en bijsturen. Deze zenuwnetwerken houden bij het sturen van de spieren onder andere rekening met de vorm en het gewicht van ons lichaam en de ledematen, en met de aard van de ondergrond en ons schoeisel. We zijn ons van al deze zintuig- en motoractiviteit niet bewust. Vrijwel alle zintuig-motor (*sensorimotor*) activiteit gaat buiten ons bewustzijn om en is desondanks zeer duidelijk doelgericht en adaptief. Het betreft hier zeker geen geheel van reflexmatig werkende regellussen, want we kunnen naar

willekeur commando's geven om de afloop te beïnvloeden, al hebben we introspectief geen idee hoe dit werkt. We kunnen desgewenst ineens stilstaan of gaan huppelen, knielen of opspringen. Het enige waar we ons van bewust zijn is de opdracht 'sta stil', niet hoe die wordt uitgevoerd door zenuwstelsel en lichaam (zie ook hoofdstuk 5). De neuronale netwerken die verantwoordelijk zijn voor de realisatie van de doelstellingen zijn van een overweldigende complexiteit, maar volledig ontoegankelijk voor introspectie. Hetzelfde geldt als we een voorwerp zien of voelen. We hebben geen introspectieve toegang tot de zintuigprogramma's, deze zijn cognitief (introspectief) ondoordringbaar. Dit verklaart grotendeels de grove onderschatting van de complexiteit van de sensorimotor programma's die eerder werd gesignaleerd.

1.4.5 *Het coïncidentieprincipe als basis van lichamelijke intelligentie*

Hoe raken de sensorimotor programma's afgestemd op de omgeving en hoe ontstaan zinvolle koppelingen tussen de diverse functionele subsystemen? Laten we volstaan met een karikaturale samenvatting van dit epigenetisch proces. Tijdens de ontogenese worden initiële hersenprogramma's geschreven in een voortdurende interactie tussen de macromoleculaire programma's van proteïnesynthese en de omgeving waarin die processen zich afspelen. Dit epigenetisch proces is zeer complex, maar een vorm van coïncidentiedetectie lijkt daarbij steeds een rol te spelen. Als gebeurtenissen binnen een bepaald tijdsinterval en binnen een bepaalde beperkte ruimte samenvallen (coïncideren) ontstaat iets nieuws; er wordt bijvoorbeeld een elektrische impuls opgewekt of een verbinding wordt versterkt. Het zelfstructureren, zelfprogrammeren, zelforganiseren van het zenuwstelsel is mogelijk omdat zenuwcellen mobiele axonen uitsturen als groeiende plantewortels. Deze navigerende uitlopers bewegen langs elektrochemische gradiënten op zoek naar zogenaamde 'trofische' stoffen. Een axon dat contact maakt met een andere cel of celuitloper wisselt trofische stoffen uit (wat A nodig heeft maakt B en vice versa) zodra ze vrijwel tegelijk actief zijn, bijvoorbeeld door elektrisch te depolariseren. Omdat er buiten het organisme, in de fysische omgeving, coherentie heerst, zijn in het ontwikkelend zenuwstelsel coïncidenties mogelijk en kunnen verbindingen stabiliseren.

Spiertrekkingen in een ontwikkelend embryo bijvoorbeeld zullen

spierspoeltjes van de bijbehorende spieren activeren en door de resulterende beweging en de wetten van de fysica ook de gewrichtsreceptoren, het evenwichtsorgaan en dergelijke. De vezels van al deze systemen vertonen daardoor coherent gedrag en hebben dankzij het coïncidentieprincipe een vergrote kans verbindingen aan te gaan. Wat bijeen hoort vindt elkaar zo. De causale relaties in de buitenwereld maken als het ware een afdruk in het zenuwstelsel.

Ook postnataal zou tijdens leren een vorm van coïncidentiedetectie een rol kunnen spelen bij het leggen of verstevigen van neuronale verbindingen. De analogie met het begrip ‘associatie’ is duidelijk, omdat het in beide gevallen om het koppelen van eerst ongekoppelde activiteiten in de hersenen gaat. De mogelijk in neuronale werkingsprincipes verankerde coïncidentiedetectie maakt in zekere zin ook de neiging tot bijgeloof verklaarbaar. In het algemeen nemen organismen causale samenhang aan tussen wat bijna tegelijkertijd optreedt. In §2.1.2 bespreek ik het voorbeeld van de bijgelovige gokker. Als een voetballer met afgezakte kousen een succesvolle actie onderneemt, kan hij het idee ontwikkelen dat tussen de coïncidentie van succes en afgezakte kousen een causaal verband bestaat en dan voortaan met afgezakte kousen voetballen. Coïncidentiedetectie als basis van hypothesen over causaliteit heeft dus zowel goede als slechte (of althans misleidende) kanten. Er zijn aanwijzingen dat ook dieren bijgeloof kunnen vertonen, wat we zouden verwachten als de coïncidentie-operatie tot het algemene repertoire van zenuwnetwerken behoort.

De uitspraak “*Cells that fire together wire together*” (Shatz, 1992) geeft een bondige samenvatting van het voorstel van Hebb uit 1949, dat een synaps zou groeien of op andere wijze meer invloed zou krijgen, als hij tegelijk met de postsynaptische cel actief is. Een synaps is een contactruimte tussen twee zenuwcellen (neuronen), waarbij neuron *A* – zodra er een actiepotentiaal aan de synaps van *A* naar *B* arriveert – via de synaps een transmitterstof naar het membraan van neuron *B* stuurt. Op het ‘postsynaptische’ membraan aangekomen bedient de chemische stof, de transmitter, een aantal receptormoleculen. Deze eiwitten veranderen direct of indirect de verdeling van geladen deeltjes over het postsynaptisch membraan en kunnen zo cel *B* depolariseren (een meer positieve lading geven) of hyperpolariseren (een meer negatieve lading geven). Bij voldoende depolarisatie zal cel *B* een

actiepotentiaal op kunnen wekken die weer andere cellen kan aansturen via de uitgang van cel B, zijn axon met synapsen. Men heeft synapsen ontdekt die effectiever worden als de postsynaptische depolarisatie samengaat met presynaptische depolarisatie, wat voor onze cel B betekent dat cel A mede oorzaak van zijn vuren was. Dat is niet altijd het geval als cel B vuurt, want een neuron kan ingangssignalen van wel duizend verschillende cellen ontvangen en ieder van die cellen of ieder deelgroepje zou op een bepaald moment de directe oorzaak van de depolarisatie in B kunnen zijn. Als het echter A is, zal de synaps tussen A en B krachtiger worden en zullen andere synapsen wat zwakker worden. Vandaar de uitspraak waar deze alinea mee begon en het voorstel van Hebb.

Bij de zogenaamde langetermijnpotentiatie (LTP) in de hippocampus vindt men inderdaad dat een verbinding meer invloed krijgt als hij tegelijk met de aangedreven cel actief is, en dat deze vergrote invloed uren tot dagen aanhoudt. Er zijn inmiddels ook receptormoleculen gevonden in het postsynaptisch membraan, die alleen op een presynaptisch signaal reageren als de postsynaptische cel gedepolariseerd is. Hoewel onder andere nog niet duidelijk is welke moleculaire processen de 'geheugensporen' definitief bevestigen, gaan de ontwikkelingen de laatste jaren zeer snel. De basismechanismen van potentiatie, kortetermijngeheugen en langetermijngeheugen zullen ongetwijfeld in de komende jaren verder ontrafeld worden (Kandel & Hawkins, 1992; Cruikshank en Weinberger, 1996). We komen op de cellulaire aspecten en netwerkaspecten van dit soort geheugenprocessen nog terug, vooral in hoofdstuk 5.

1.5 Uitgangspunten en opzet van deze studie van natuurlijke intelligentie

- Mijn primaire *biologische uitgangspunt* is de *evolutionaire continuïteit* van de levende natuur en de bijbehorende variëteit aan vermogens, structuren en habitats.
- *Analogiepostulaten* zijn een onmisbaar onderdeel van de studie van complex gedrag in de levende natuur, maar vereisen voor hun toepassing grote kennis van de structuur, het *natuurlijk gedrag* en de *habitat* van de vergeleken organismen.

- De neuronale leermechanismen zijn redelijk universeel (*coïncidentiemechanismen*), maar de resulterende leervermogens op gedragsniveau zijn *taakspecifiek* en *soortspecifiek*. Ieder dier is in zijn eigen niche de slimste.
- Denken is een *adaptieve hersenactiviteit* waarmee een organisme tracht een nieuwe oplossing voor een probleem te vinden. Een dier kan in elk geval denken als het flexibel kan anticiperen, psychologisch inzicht heeft en/of speelt, leert, oefent.
- Intelligentie is domeingebonden en ik definieer het als de verhouding tussen reproduceerbaar succes op gebied X en de daartoe benodigde hoeveelheid moeite of tijd.
- De mate van intelligentie, de noodzaak tot denken, hangt af van de mate van *autonomie*. Autonomie is een relatief grote onafhankelijkheid van de momentane omgeving die organismen bereiken dankzij zelfverzorgend gedrag (homeostase), zelfverplaatsend gedrag (locomotie) en planning voor de relatief lange termijn van de uiteindelijk noodzakelijke interacties met de omgeving. Autonomie vereist lichamelijke intelligentie, die bij organismen groot is en bij machines nul.
- Een programma is een *plan voor actie* en een hersenprogramma is een plan voor actie vastgelegd in de neuronale netwerken en hun interacties met de overige lichamelijke structuren en processen. Dit begrip (hersens)programma is breder dan het begrip computerprogramma, omdat het noch beperkt is tot algoritmen, noch tot seriële afwerking, noch tot symbolische processen. Het omvat onder andere regellussen, mengvormen tussen parallel en serieel, asynchrone processen, fysische mechanismen met causale niet-symbolische samenhangen, fysisch-chemische processen op een grote variëteit aan (afmeting)schalen. Een hersenprogramma is betekenisgevend, een computerprogramma ontleent betekenis aan de gebruiker/ontwerper.
- Definities van mentale processen dienen *diersoortneutraal* te zijn om niet te vervallen in diersoortsolipsisme (zoals antropocentrisme). Als we intelligentie, denken en bewustzijn onlosmakelijk verbinden met taal, hoeven we het alleen bij de mens te zoeken. Dat standpunt is vanuit de biologie gezien niet te verdedigen. Ik zal daarom nauwelijks iets zeggen over taal, logica

en dergelijke. Alle argumenten zullen we baseren op de studie van waarneming en ruimtelijk gedrag van dieren en dan met name op visuele waarneming en het daardoor geleide ruimtelijke gedrag. Van alle hersenprocessen zijn de visuele het best onderzocht en begrepen. Visuele objectherkenning, het zien van ruimtelijke structuur, visuele attentie, visueel geleide emoties, visuele qualia, bewust versus niet-bewust zien, beeldgeheugen en beelddenken, zijn voor ons thema van groot belang. Omdat de meeste dieren een goed ontwikkeld visueel systeem hebben, is deze aanpak voldoende universeel.

Hoe gaan we verder? Allereerst geef ik in hoofdstuk 2 een inleiding in enkele wetenschapstheoretische problemen die met ons thema te maken hebben, culminerend in een beschrijving van de mogelijkheden en beperkingen van neuroreductie. Het is namelijk mijn bedoeling gedragsonderzoek en neurowetenschappelijk onderzoek in wederzijdse samenhang te bespreken. Neuroreductie is het streven gedrag te verklaren in termen van de onderliggende neuronale processen. We moeten stilstaan bij de vraag aan welke eisen en randvoorwaarden voldaan moet worden bij de neuroreductie van (visuele) waarneming en (visueel) bewustzijn?

In hoofdstuk 3 ga ik in op de (visuele) waarneming in samenhang met natuurlijke intelligentie. Het empirisme is een filosofische stroming die ervan uitgaat dat alle kennis via de zintuigen ontstaat. Het nativisme daarentegen gaat ervan uit dat de meeste kennis aangeboren is. We zullen in hoofdstuk 3 zien dat beide stromingen een beetje gelijk en een beetje ongelijk hebben, en dat ze beide nog een rol spelen in moderne theorieën. De ecologische fysica beschrijft wat er in principe waar te nemen valt en we zullen de kracht van die aanpak illustreren voor de visuele analyse van ruimtelijke structuur. De volgende vraag is dan wat feitelijk wordt waargenomen door bestaande dieren, en hoe dat gebeurt. Psychofysica en hersenonderzoek leveren ieder een deel van de resterende puzzel. Hoewel we de mogelijkheden van neuroreductie van psychofysische bevindingen nog in hoofdstuk 3 exploreren, komen de visuele hersenprocessen pas in hoofdstuk 4 aan de orde.

In hoofdstuk 4 wordt de neuronale basis van waarneming en gedrag eerst in wat algemene zin besproken, als filosofisch probleem, en vervolgens toegespitst op het probleem van de functielocalisatie in de visuele hersenen. Daarbij wordt duidelijk dat we met de

neuroreductie van visuele waarneming al vrij ver kunnen komen, en dat de relatie tussen visuele psychofysica en visuele neurowetenschap tegenwoordig zeer nauw is. Het moderne onderzoek aan het visuele systeem is nu zover gevorderd, dat het niet meer overmoedig lijkt te proberen ook inzicht te verwerven in de verschillen en overeenkomsten tussen bewust en niet-bewust zien.

In hoofdstuk 5 worden dan ook een aantal klassieke vraagstellingen aangepakt betreffende bewustzijn en de mogelijkheden daarvoor tot neuroreductie te komen. Na een algemene inleiding waarin weer kort de filosofische voorgeschiedenis wordt besproken, kiezen we voor nadere studie van de visuele aspecten van bewustzijn, zoals visuele attentie, zien zonder en met bewustzijn, de visuele qualia en hun mogelijke localisatie.

In het slotwoord maken we de balans op. Hoever zijn we gekomen met de beantwoording van onze vragen, met de oplossing van de problemen van denken, intelligentie en bewustzijn bij dieren? Wat kunnen we van de toekomst van dit onderzoeksgebied verwachten?

2 Neuroreductie van natuurlijke intelligentie

2.1 Wetenschappelijke versus persoonlijke en subjectieve kennis

2.1.1 *Wetenschap als sociaal proces*

In het vorige hoofdstuk heb ik gesteld dat anecdotes over bijvoorbeeld slimme kanaries of hamsters niet acceptabel zijn als onderdeel van de wetenschappelijke studie van intelligentie in het dierenrijk. De wetenschap staat natuurlijk wel toe dat zo'n anecdote wordt gebruikt als motivatie voor wetenschappelijk onderzoek. De motivatie is in feite irrelevant en dus is in de praktijk iedere motivatie acceptabel, van gevaarlijke vooroordelen of bijgeloof, via geldelijk gewin of zucht naar macht tot onschuldige nieuwsgierigheid. Maar het onderzoek of de inzichten en ideeën die uit die motivatie voortspruiten, zijn pas 'wetenschappelijk' als ze aan bepaalde strenge *spelregels* voldoen. Het geeft dus niet *waarom* je een bepaald onderzoek doet: of het wetenschappelijk acceptabel is of niet, wordt bepaald door *hoe* je het doet. Een eerste toets of aan de spelregels is voldaan is de acceptatie van een verslag van het onderzoek door collegae-wetenschappers (reviewers en editors) voor publicatie in een wetenschappelijk tijdschrift. Daarna is het artikel open voor beargumenteerde aanvallen door andere auteurs. Toch hebben we aan het voorbeeld van slimme Lumpi gezien dat dit niet altijd voldoende garantie voor kwaliteit is. De kans dat er slecht werk of onzin door het beoordelingsproces slipt kan nooit nul zijn, ongeacht de status van het tijdschrift. We kunnen te maken krijgen met verschijnselen als vriendjespolitiek, de incrowd, wetenschappelijke machtspolitiek en allianties, slordigheid, onverschilligheid, beoordelingsfouten, enzovoorts. Wetenschap is een *sociaal proces* en de bewaking van de kwaliteit is goed, maar niet perfect. Geniaal werk blijft weleens 50, 100 jaar of zelfs voor eeuwig onopgemerkt of ongeciteerd, en zwak werk leidt wel eens tot een hele hype en verlegging van de geldstromen voor

onderzoek. Ook de politiek en het bedrijfsleven beïnvloeden dit alles. Voeg hieraan toe dat het totaal aantal wetenschappers enorm groot is en dat we dus niet kunnen verwachten dat dit allemaal mensen met een hoog ontwikkeld gevoel voor ethiek zijn, en je neigt tot het beeld dat vele cynici van de wetenschap hebben.

Toch heeft de wetenschap de mensheid (wat iets anders is dan alle mensen) bevrijd van armoede en van veel angsten, bijvoorbeeld voor demonen of heksen. Begrijpen is een goed middel tegen angst gebleken en de wetenschap heeft het aantal zaken die begrepen kunnen worden enorm vergroot en zelfs de nog onbegrepen zaken minder mystiek doen schijnen. Wetenschappelijke kennis ‘werkt’ gewoon, levert wat het belooft, levert bruikbare kennis om bijvoorbeeld bruggen te bouwen of mensen en dieren te genezen. De spelregels van de wetenschap blijken dus nogal goed te werken en een brede uitstraling te hebben. Wat zijn echter die spelregels? Wat is de preciese aard van het sociale proces dat wetenschap heet? Wat is de sleutel tot het succes van de wetenschap? Aan welke eisen moeten ideeën, theorieën en meetgegevens voldoen wil het toegestaan zijn ze ‘wetenschappelijk’ te noemen? Om dit soort vragen te beantwoorden moeten we kort ingaan op de wetenschapstheorie, een onderdeel van de ken(nis)theorie oftewel ‘epistemologie’, een filosofische discipline. Ik ga uiterst bondig op de gestelde vragen in en verwijs voor uitgebreidere argumentatie naar Ziman (1978), die er een bijzonder goede verhandeling over heeft geschreven.

Wetenschappelijke kennis is dat deel van publieke (!) kennis dat door – meestal opzettelijk en doelgericht – empirisch onderzoek en/of nadenken over empirische gegevens is verkregen. Het vergaren van wetenschappelijke kennis is een sociaal proces van bepaalde aard met bepaalde spelregels. Alvorens op de spelregels in te gaan (§2.1.2) eerst iets over de aard van het proces.

Wetenschap is een sociaal proces, waarbij gestreefd wordt naar een vrijwillige consensus van rationele opinies. Het proces wordt gedragen door georganiseerd scepticisme en competitieve kritiek van de wetenschappelijke gemeenschap.

De aard van dit proces leidt ertoe dat de invloed van religieuze en politieke overtuigingen relatief gering is. Uiteraard is wetenschappelijke kennis daarmee niet waardenvrij. Het consensusprincipe veronderstelt een gemeenschappelijke achtergrond, waarin ongetwijfeld vele gemeenschappelijke vooroordelen van culturele, emotionele, religieuze, bijgelovige, politieke en andere aard een rol spelen. Een soort grootste gemene deler van het subjectieve denken wordt bij het opgroeien en tijdens de opleiding op ons allen overgedragen en dit induceert weer persoonlijke vooroordelen (door keuze uit het aanbod van opinies), ook in wetenschappers. Maar de wetenschap evolueert door kritische selectie en toont zowel enige tolerantie voor afwijkende ideeën als kritiek op dissidentie. Er moet een voortdurende toevloed van suggesties, ideeën, modellen, analogieën, metaforen, theorieën en empirische gegevens zijn om het wetenschappelijke evolutieproces te voeden. Wie lange tijd in isolement aan z'n wetenschappelijke levenswerk knutselt, krijgt geen kritische terugkoppeling en prikkels van anderen en bereikt daardoor zelden een hoog niveau. Hierop zijn natuurlijk een aantal beroemde uitzonderingen (Darwin, Mendel, Newton, Einstein) en in het algemeen kan men ook vaststellen dat de moderne publicatiedwang naar het andere uiterste is doorgeslagen. Het bestaan van de wetenschapper is zo heftig geworden dat er van reflectie niet veel meer terecht komt. Regelmatig publiceren en voordrachten houden is nodig om deel te kunnen nemen aan het sociale proces 'wetenschap', maar men moet zich ook regelmatig voor langere tijd terug kunnen trekken voor reflectie. In veel vakgebieden komen onderzoekers nauwelijks nog aan iets anders toe dan het publiceren van korte berichten over nieuwe bevindingen in wetenschappelijke nieuwsbladen, zoals *Nature* of *Science*. Een kenmerk van een rijp wetenschapsgebied is echter dat er naast enige activiteit van koorstachtige aard ook regelmatig meer bezonken reviews en goede overzichtsboeken verschijnen. Wetenschap is een autonoom sociaal proces in de zin dat het *inhoudelijk* niet onderworpen mag zijn aan enige restrictie afkomstig uit andere sociale processen of verschijnselen, zoals religie, economie, politiek en dergelijke. Zulke sociale processen zullen natuurlijk wel invloed hebben op de omvang van het wetenschapsbedrijf, de prioriteiten of de plaats waar het onderzoek gebeurt. Dat is in vele opzichten al erg genoeg.

In de rest van §2.1 bekijken we de spelregels van de wetenschap en een aantal belangrijke wetenschappelijke 'gereedschappen' met

hun gebruiksmogelijkheden en beperkingen. Daarna zal ik in §2.2 eerst ingaan op het algemene probleem van ‘reductie’ in de wetenschap om het daarna meer specifiek voor ons probleemgebied te bekijken. Daarbij speelt de psychofysica een belangrijke rol, omdat die vaak bruikbare aanzetten levert voor reductie van psychische verschijnselen tot neuronale processen. Het verklaren van mentale verschijnselen in termen van hersenprogramma’s, wat we neuroreductie zullen noemen, zal dan wat verder worden geanalyseerd. Ik zal betogen dat bij neuroreductie koppelhypotheseën en analogiepostulaten nodig zijn, die helaas vaak verborgen blijven in de redenties die we in de literatuur vinden. Veel verwarrende discussies over de relatie tussen psychische en neuronale verschijnselen zijn gebaseerd op het feit dat de discussianten verschillende koppelhypotheseën gebruiken zonder zich daarvan bewust te zijn.

2.1.2 *Enkele spelregels van de wetenschap*

Ik noem de kennis die een willekeurige persoon over de wereld inclusief haarzelf bezit ‘persoonlijke kennis’. Deze kan zeer bruikbaar zijn of juist niet, het kan vermeende kennis zijn of eigen gevoelens betreffen (subjectieve ervaringen: §1.1.1), het kan op misvattingen over allerlei zaken berusten, zorgen omvatten of waandenkbeelden, bijgeloof en wat al niet. Naast persoonlijke kennis kan de moderne mens wetenschappelijke kennis hebben. De vraag is waarin die twee vormen van kennis zich onderscheiden. Wetenschappelijke kennis moet in elk geval beschrijfbaar en toetsbaar zijn, en in een systematisch geheel passen dat al door een deel van de wetenschappelijke gemeenschap wordt geaccepteerd. Persoonlijke kennis is tenminste voor een deel niet-beschrijfbaar in algemeen toegankelijke ondubbelzinnige vorm, denk maar aan beelddenken of intuïtie. Voor een ander deel is het niet toetsbaar, zoals vooroordelen en geloof of kunst. Ten slotte is veel persoonlijke kennis niet systematisch van aard, zoals losse feiten, onderling tegenstrijdige overtuigingen, emoties. Persoonlijke kennis is direct gerelateerd aan het individu en niet noodzakelijkerwijs geldig voor andere individuen, terwijl wetenschappelijke kennis interindividueel is. Het woord kennis houdt hier niet automatisch in dat het om juiste, bruikbare kennis gaat, om waarheid of feitelijkheden. Wie alles van kabouters denkt te weten heeft ‘persoonlijke kennis’ van het onderwerp, ook als anderen dit onzin vinden. In

de wetenschap blijkt ‘kennis’ van een vorige generatie vaak ook onzin te zijn voor de volgende – of omgekeerd. Kennis omvat alles wat we (menen te) weten.

Wetenschappelijk denken en wetenschappelijke kennis zijn natuurlijk uit persoonlijk denken en persoonlijke kennis ontstaan en hebben er parallellen mee. Echter voor wetenschappelijke kennis zijn de volgende spelregels van kracht, waaraan veel persoonlijke kennis niet voldoet:

1. Wetenschappelijke kennis moet *toetsbaar* zijn, dat wil vooral zeggen dat het tot waarneembare, liefst meetbare (kwantificeerbare), niet-triviale voorspellingen moet leiden.
2. Wetenschappelijke kennis moet *expliciet beschrijfbaar* zijn in natuurlijke taal, computertaal, wiskunde, plaatjes, en dergelijke, zodat de kennis intersubjectief wordt, dat wil zeggen bezit van de gemeenschap.
3. Wetenschappelijke kennis moet *systematisch* zijn, dat wil zeggen aansluiten bij een systeem van al beschikbare wetenschappelijke ideeën en uitgangspunten. Dat systeem (een verzameling van theorieën en modellen) mag bij toevoeging van de nieuwe kennis in principe geen tegenstrijdigheden opleveren of de nieuwe kennis moet daar tevens een oplossing voor bieden.

Het toetsen van kennis

In de wetenschapstheorie wordt, zeker sinds het werk van Popper (1959), falsificatie van een theorie of hypothese als iets positiefs, als ‘vooruitgang’, gezien, ongeacht of die falsificatie langs empirische weg gebeurt of via een gedachtenexperiment. Bij persoonlijke kennis is empirische falsificatie voor het organisme in de regel iets negatiefs. Een voorbeeld is de vogel die meent dat katten ongevaarlijk zijn, of de platgereden egel die oordeelde dat hij de straat wel veilig kon oversteken. Falsificatie van persoonlijke kennis moet bij voorkeur gebeuren tijdens spel of tijdens voorspellend denken, opdat de verschijnselen die voor het organisme nadelig zijn niet écht optreden. Voor het persoonlijke, al of niet bewuste, denken is daarom interne manipulatie van idealisaties en modellen van belang. Ze maken het mogelijk het effect van ‘denkbaar’ gedrag te voorspellen en zo keuzes te maken voor het feitelijk gedrag.

Voor het organisme is het dus van belang dat de kans op empirische falsificatie van de juistheid van zijn kennis en het erop gebaseerde gedrag zo klein mogelijk blijft. Tot op zekere hoogte geldt dat ook wel voor wetenschappelijke theorieën en hypothesen, die door de opsteller(s) meestal aantrekkelijker worden gevonden naarmate de falsificatiekans lager lijkt. Echter, wil men een reële wetenschappelijke bijdrage leveren, dan moet lage falsificatiekans wel samengaan met een groot aantal *mogelijkheden tot falsificatie*. Een theorie of hypothese is sterker naarmate de voorspellingen die hij doet onwaarschijnlijker lijken en toch blijken te kloppen. Een goede theorie levert voorspellingen die verder onderzoek stimuleren, en biedt goede falsificatiemogelijkheden. Correct uitgevoerde falsificatiepogingen die niet tot falsificatie leiden, verschaffen 'evidentie' voor de theorie. De evidentie neemt ook toe met het aantal door de theorie of de hypothese juist voorspelde niet-triviale uitkomsten van experimenten, met andere woorden met het aantal verificaties. Geloof en vooroordeel zijn vooral niet-wetenschappelijk, omdat ze niet (of niet op de juiste wijze) aan de toetsbaarheidsspelregel voldoen.

Toetsen van hypothesen alleen is niet voldoende voor wetenschappelijkheid. Een kenmerk van magisch denken is bijvoorbeeld dat er zowel hypothesen worden geformuleerd als getoetst, maar dat eventuele falsificatie leidt tot uitbreiding van de hypothese in plaats van tot verwerping. Nemen we het voorbeeld van de bijgelovige (magisch denkende) gokker (Weizenbaum, 1976). Zo iemand kan op grond van één spelletje roulette wat hij gewonnen heeft, de hypothese (zijn verklaring) bedenken, dat het van belang was dat hij tijdens het rollen van het balletje de benen over elkaar deed. Als hij deze beweging de volgende keer weer uitvoert tijdens het rollen van het balletje en toch verliest, verwerpt hij de hypothese niet, maar breidt hem uit door bijvoorbeeld aan te nemen dat het alleen op dinsdagavond voor elf uur werkt. Als de wintruc de volgende dinsdagavond voor elfen ook niet werkt, zal hij aannemen dat het bovendien essentieel was dat er de eerste keer een sigaarrokende blonde dame achter zijn stoel stond, enzovoorts. Het voornaamste kenmerk van magisch denken of bijgeloof lijkt de overtuiging te zijn dat er *noodzakelijkerwijze een oorzaakelijk (causaal) verband bestaat tussen gelijktijdig of direct na elkaar optredende gebeurtenissen*. Iets in de situatie moet het succes veroorzaakt hebben en dat succes moet reproduceerbaar zijn, als je maar weet wat de oorzaak was. Aan intrinsiek toeval gelooft de magicus dus niet. Het lijkt op het eerste gezicht misschien merkwaardig dat

bijgeloof nog steeds wijdverbreid is in deze tijd van wetenschap en technologie, maar het interpreteren van coïncidentie als teken van een causale samenhang is nu eenmaal in het zenuwstelsel van vrijwel alle organismen verankerd (zie §1.4.5). Kennelijk is dat een strategie voor interactie met de wereld die meestal werkt en in andere gevallen geen direct levensgevaar oplevert, een strategie die meestal baat en zelden schaadt. We zagen het principe al eerder bij de bespreking van associatieleren, van conditioneren. De hond die gaat kwijlen als een bel rinkelt, heeft ook een verband gelegd dat niet universeel geldig is. De bijgelovige gokker doet in principe hetzelfde als de hond van Pavlov, maar op aanzienlijk minder solide gronden, namelijk slechts één enkele ervaring.

Het voorbeeld van de bijgelovige gokker illustreert waarom het van groot belang is dat in de wetenschap een hypothese die gefalsifieerd wordt, in het algemeen niet meer acceptabel is en niet door uitbreiding gered mag worden. Tot op zekere hoogte wordt hiertegen in de praktijk wel gezondigd, vooral als het om voorspellingen van vaak geverifieerde en algemeen geaccepteerde theorieën gaat. Als zo'n voorspelling wordt gefalsifieerd, wordt vaak niet de gehele theorie verworpen, tenzij het om een echt cruciaal aspect van de theorie gaat. Volgens sommige wetenschapstheoretici gaat iedere belangrijke theorie wel ergens binnen zijn beoogde geldigheidsgebied mis. Tot er een theorie is opgesteld die de discrepantie opheft, wordt dan meestal toch aan de deels gefalsifieerde theorie vastgehouden. Men hoeft op dit punt natuurlijk geen puritein te zijn. *Theorieën zijn als het ware gereedschappen voor het denken* en als een gereedschap goede diensten bewijst, gooit men het niet weg louter en alleen omdat het niet voor alles geschikt is. Zodra er betere gereedschappen zijn, is het handig daarmee te leren werken of te trachten die nog verder te verbeteren. Zoals gereedschappen en organismen evolueren onder 'selectiedruk', evolueren ook theorieën. Het proces van theorie-evolutie lijkt wel wat op het eerder beschreven proces van hypothese-uitbreiding in het magisch denken, maar verschilt ervan door de eisen die eraan gesteld worden. Bij theorie-evolutie moet er coherentie zijn (samenhang tussen nieuwe en bestaande componenten van de theorie), een streven naar een minimum aantal basisproposities (het scalpel van Occam: zie §2.2.5), en evidentie voor de uitbreidingen. Verder moet een gemeenschap van vakgenoten rationeel over de theorie discussiëren en er moeten potentieel falsifieerbare en bruikbare nieuwe voorspellingen uitkomen. Kortom de concurrentiedruk moet groot zijn en de nuttige op-

brengrt aan toetsbare voorspellingen moet voldoende zijn. Discrepanties tussen theorieën en bevindingen trekken in het algemeen bijzonder sterk de aandacht en er wordt meestal veel energie geïnvesteerd om ze op te heffen, omdat iemand daarmee naam kan maken in de wetenschap. De competitieve kritiek doet hier zijn werk.

Wat men onder ‘evidentie’ mag verstaan, is lang niet zo eenvoudig in algemene zin te beschrijven als men op het eerste gezicht zou denken. De zogenaamde confirmatietheorie houdt zich hiermee bezig (Salmon, 1973) en heeft een aantal lastige paradoxen opgeleverd, die het begrijpen van het proces van empirisch toetsen van hypothesen bemoeilijken. Paradoxen ontstaan echter gemakkelijk als men ervan uitgaat dat logica een perfect model van het wetenschappelijk denken verschaft. Dit zou onjuist kunnen zijn. De logica geeft redenatieschema’s die geldig zijn ongeacht de betekenis van de woorden die in het schema worden ingevuld. Dat ‘fill-in-the-blanks’-principe vonden we onder andere ook bij leren van een vijandbeeld door vogels. Het gedragsprogramma voor de reactie op de vijand is aangeboren, alleen moet ieder individu nog even invullen wat de vijand is. Dat de mens ‘logisch’ kan denken hoeft niet onjuist te zijn, maar dat logica een volledig model biedt van alle denken en dus de enige mogelijkheid is om geldige redenaties op te stellen, moeten we betwijfelen. Logica is sterk gekoppeld aan symboolmanipulatie en ‘lineair’ denken, dat wil zeggen aan sequentiële (‘stap voor stap’, oftewel algoritmische) processen. Veel denken kan mogelijk zonder zulke sequentiële symboolmanipulatie plaatsvinden, en bij een aantal van die denkprocessen zou de betekenis invloed kunnen hebben op het denkproces zelf, zouden er terugkoppelingen op kunnen treden. Logica houdt geen rekening met tijdsduren en vertragingen, lussen of ruisverschijnselen in causale verbanden en is daardoor niet altijd op de beschrijving van fysische processen van toepassing. Het bekendste biologische voorbeeld is het probleem van de kip en het ei, dat logisch gezien een paradox is maar ‘bio’logisch gezien bevredigend wordt verklaard in de evolutietheorie, die een teruggekoppeld tijdsproces met variatie en selectie aanneemt.

K. Popper formuleerde zijn bekende demarcatie criterium, dat stelt dat alleen falsifieerbare uitspraken ‘wetenschappelijk’ zijn en alle andere buitenwetenschappelijk en subjectief. Dit hield geen waardeoordeel in, dat wil zeggen niet-falsifieerbare kennis is niet noodzakelijkerwijs minder waardevol, het is alleen volgens Pop-

per geen onderdeel van de wetenschap. Popper's definitie leidt echter tot een te beperkte opvatting over wat wetenschappelijke kennis is, althans te oordelen naar de praktijk van het wetenschapsbedrijf. Er zijn ook theorieën of onderdelen van theorieën die wetenschappelijk worden genoemd, ondanks het feit dat ze niet in strikte zin falsificeerbaar zijn. In het algemeen moet er voor zo'n theorie (onderdeel) evidentie zijn, de theorie moet expliciet en coherent zijn, en dus een scenario of model opleveren dat tenminste ten dele toetsbaar is. Geschiedkundige theorieën kunnen als voorbeeld dienen. Onderdelen van die theorieën kunnen tot falsificeerbare voorspellingen over gebeurtenissen in heden of verleden leiden, maar het geheel blijft bij falsificatie van die voorspellingen vrijwel altijd overeind. De meeste theorieën omvatten namelijk zoveel gegevens, hypothetische termen en constructies, dat een falsificatie meestal kan worden opgevangen door bijstelling van onderdelen van de theorie of veranderen van de definitie van bepaalde termen. Toch geldt dat hoe meer deelfalsificaties door de theorie opgevangen kunnen worden, hoe 'zachter' de theorie is. In de natuurwetenschappen streeft men naar harde theorieën die onmiddellijk zullen vallen, als een voorspelling die eruit volgt gefalsificeerd wordt.

Wetenschappelijke kennis is beschrijfbaar en systematisch

De evidentie die een wetenschappelijke theorie acceptabel maakt mag geen persoonlijke evidentie zijn, het moet publieke, dat wil zeggen in principe door iedereen controleerbare, evidentie zijn. Wetenschap is intersubjectief, wat – als aan de andere spelregels ook is voldaan – wel 'objectief' wordt genoemd. De eis van expliciete beschrijfbaarheid is een directe vertaling van de eis dat de evidentie publiek moet zijn. Hoe geniaal iemands gedachten ook zijn, zolang ze niet overdraagbaar (interindividueel) zijn gemaakt kunnen ze geen bijdrage aan de wetenschap betekenen. Met 'systematisch' wordt onder andere bedoeld dat de proposities en feiten die tot een bepaalde theorie of een bepaald model behoren, niet onderling tegenstrijdig mogen zijn en dat ze niet (of slechts marginaal) mogen overlappen. Ook minder goed te karakteriseren eisen als 'elegantie', 'eenvoud' en 'voorspellende kracht', spelen een rol bij de vraag of de ordening van de kennis systematisch en coherent wordt gevonden.

Het zal uit deze ruwe schets van de wetenschapstheorie wel duidelijk zijn dat dit geen eenvoudig en oncontroversieel terrein is,

en dat het moeilijk is een preciese status toe te kennen aan een bepaalde theorie op basis van éénduidige criteria waarmee alle wetenschapsbeoefenaren het eens zijn. Toch is er in de praktijk vaak een redelijke consensus over het belang en de kracht van een theorie. Naarmate een theorie meer fenomenen die eerst ongereleerd leken in relatie brengt en tegelijkertijd meer preciese, falsifieerbare (liefst verrassende) voorspellingen oplevert, zal zijn status in het algemeen hoger zijn. Dit is een zuiver utiliteitscriterium, maar naar mijn mening het belangrijkste aspect van een theorie:

Een theorie of model is een denkgereedschap en het gereedschap wordt beoordeeld op zijn bruikbaarheid tijdens het onderzoek. Hoe meer niet-triviale voorspellingen de theorie (het model) oplevert die verrassenderwijs nog blijken te kloppen ook, hoe groter het vertrouwen.

2.1.3 Metafoor, theorie en model

Een metafoor is een vergelijkingsbeeldspraak, zoals ‘een kameel is het schip der woestijn’. Zo’n metafoor kan praktische waarde hebben, omdat men ermee suggereert dat ideeën en samenhangen van een bepaald bekend verondersteld kennisgebied ook toepasbaar zijn of gelden op het minder vertrouwde gebied waarover men nieuwe uitspraken wil doen. Een metafoor is een soort informeel model, maar wordt vaak niet als ‘model’ herkend. Zo zegt men wel ‘de mens is een informatieverwerkend systeem’. Deze metafoor is suggestief maar vaag. Sommigen bedoelen ermee dat computers of robots geschikt zijn als model van de mens, anderen bedoelen dat die machines het enige acceptabele model zijn, weer anderen bedoelen wellicht dat mens en machine tot eenzelfde klasse van nog niet begrepen systemen behoren. Op zich redelijke metaforen worden vaak te ver doorgetrokken en zo dus bedoeld of onbedoeld misbruikt. Toen bijvoorbeeld werd meegedeeld dat Watson en Crick “de genetische code hadden gekraakt”, riep dat bij velen een beeld op van een bouwplan van organismen geschreven in een tot dan toe geheime taal die nu ontcijferd was, zodat men vanaf nu kon lezen hoe de resulterende structuur van het organisme zou worden. De terminologie versluiert epigenetische processen. Ook Einstein’s relativiteitstheorie leidde via ontoelaatbaar uittrekken van de metaforische naamgeving in het begin nogal eens tot het idee dat alles in het leven relatief is en dat dit nu

door de wetenschap was bewezen. Metaforen zijn suggestief en kunnen een belangrijke aanzet tot een theorie of model leveren, maar men moet goed letten op de grenzen van geldigheid. De belangrijkste gevaren zijn oversimplificatie en te ruime of juist te letterlijke interpretatie.

Een theorie is een samenhangend geheel van feiten, begrippen en relaties (wetmatigheden), dat als totaal en in onderdelen symbolisch een bepaald werkelijkheidsgebied representeert en gebruikt kan worden om over dat gebied voorspellingen te doen.

Men kan een verzameling feiten, begrippen en wetmatigheden opvatten als een soort tabel van uitspraken. Deze tabel wordt pas een theorie als er samenhang is tussen de tabelregels en in dat geval is een landkaart wellicht een betere metafoor. Zo zegt Weizenbaum (1976, p.142): “*The way theories make a difference in the world is thus not that they answer questions, but that they guide and stimulate intelligent research*”. Dat wil zeggen ze genereren ‘zinvolle’ vragen.

Een theorie T van werkelijkheidsgebied A kan vaak het eenvoudigst getoetst worden door de theorie te vertalen in de vorm van een model M van A . Het model M moet een van A verschillend en er niet causaal mee verbonden systeem zijn, waarvoor dezelfde theorie T (of een belangrijk deel van T) net zo goed geldt als voor A . Als voorbeeld kunnen we denken aan een weerstand-condensator schakeling (M) als model voor een zenuwcelmembraan (A), waarbij de potentiaalveranderingen van beide door dezelfde differentiaalvergelijkingen (T) worden beschreven. Een model helpt ons de theorie en de door theorie en model gerepresenteerde werkelijkheid te begrijpen. Men kan zelfs zover gaan dat men begrijpen opvat als het hebben van een model. Zo stelt MacKay (1966): “*Begrijpen betekent meestal dat we in staat zijn te wijzen naar een theoretisch model van het proces wat ons eerst verbijsterde en te zeggen, ‘zo werkt het’.*” Lord Kelvin (1824-1907) formuleerde het volgens MacKay krasser: “*I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. If I can make a mechanical model, I can understand it. As long as I cannot make a mechanical model all the way through, I cannot understand it.*”

Tegenwoordig staan ons betere modelmiddelen ter beschikking

dan mechanische, bijvoorbeeld speciale elektronische schakelingen of computers met simulatieprogramma's. Toch noemt men dit streven naar begrijpen in termen van een werkend model nog wel 'mechanistisch'. Wat Kelvin toen en moderne mechanistische denkers nu onderscheidt van anderen is dat ze niet tevreden zijn met de beschrijving van de mathematische relatie tussen uitgangsen ingangsvariabelen van een systeem (stimulus-respons terminologie). Ze vinden zo'n 'black box'- of zwarte-doosbeschrijving niet voldoende kennis over een systeem bieden en willen aangeven hoe de zwarte doos vanbinnen eruitziet (ook de interveniërende variabelen beschrijven). Uiteraard kan men deze aanpak niet tot in het absurde doortrekken, want in iedere zwarte doos zitten weer andere zwarte dozen. Ergens moet men stoppen en besluiten: 'diepere' niveaus interesseren me niet. Denk bijvoorbeeld aan het verklaren van gaswetten in termen van molecuulbewegingen, waarbij men meestal de moleculen als laagste niveau, als zwarte doosjes – of in dit geval – als biljartballetjes opvat. Of men een model zinvol of verhelderend vindt, hangt dus mede af van de interessen die men heeft, of de doelen die men ermee nastreeft.

In dit verband is het nuttig te wijzen op de veel voorkomende en vaak onuitgesproken misvatting dat een dieper niveau (kleinere ruimtelijke afmetingen) automatisch 'fundamentelere' kennis geeft. De natuurkunde is steeds kleinere splinters materie gaan bestuderen en heeft decennia lang nauwelijks nieuwe theorieën ontwikkeld voor de fysische processen op het oppervlak tussen organismen en hun omgeving (ecologische fysica). Pas zeer recent heeft men de fenomenologische en ecologische fysica herontdekt als belangrijke tak van de natuurwetenschappen. Als we hydrodynamische processen willen begrijpen, hoeven we ons niet in gluonen te verdiepen en is dat diepere afmetingenniveau dus niet fundamenteeler en zelfs irrelevant.

In de biologie ziet men iets vergelijkbaars. Velen menen dat moleculaire en submoleculaire processen 'fundamenteeler' zijn dan de studie van bijvoorbeeld diergedrag. Als men echter wil begrijpen waaraan een vogel ziet of een bepaalde plek geschikt is om er een nest te bouwen, zijn moleculaire en submoleculaire processen niet fundamenteel maar irrelevant. 'Fundamenteel' staat tegenover 'toegepast' en verwijst naar de drijfveren van het onderzoek, niet naar de afmetingen van de onderzochte procescomponenten. Voor het bestuderen van de meeste levensverschijnselen zijn vrijwel alle niveaus van belang en dient men filosofie, psychologie,

ethologie, fysica, chemie, wiskunde, informatica, moleculaire en macroscopische biologie, neurowetenschappen, enzovoorts, te integreren.

Fundamenteel onderzoek is dus onderzoek dat in principe en in hoofdzaak gedreven wordt door verwondering en nieuwsgierigheid, zonder dat de onderzoekers van tevoren worden gedreven door potentieel ‘nut’, door toepasbaarheid. Merkwaardigerwijs toont de geschiedenis van het wetenschappelijk onderzoek op vrijwel alle gebieden aan dat juist het onderzoek ‘uit nieuwsgierigheid’ voor de mensheid het meest heeft opgeleverd aan bruikbare kennis. Een te grote nadruk op ‘nuttig’ onderzoek, waarvan helaas te vaak sprake is, verkleint de kans op doorbraken, ongezochte ontdekkingen (serendipiteit) enorm. Men kan niet van tevoren weten welke nieuwe kennis nodig is. “*Vrijheid is de gelegenheid van het onverwachte te kunnen profiteren*” (Van Andel, 1994). Het beste kan men goede wetenschappers vrij laten in de keuze wat ze willen onderzoeken en hoe. Het is nu eenmaal hun vak en specialisme waaraan ze werken in internationale concurrentie en coöperatie. Onzin kunnen ze niet gemakkelijk verkopen en zeker niet lang, daar zorgt het competitiemechanisme voor. Binnen dat krachtenveld drijft de ambitie en vakkundigheid hen voort. Wetenschappelijk onderzoek is een dag-en-nacht bezigheid voor het leven.

2.1.4 Conceptanalyse

Iedere empirische wetenschap kent – naast empirische ‘objectieve’ feiten, die in principe door iedere waarnemer die de ‘juiste’ methoden gebruikt, gecontroleerd kunnen worden – ook *concepten* oftewel termen van theoretische aard. Deze hebben voor een deel de vorm van afspraken over taalgebruik, de zogenaamde definities. Een ander deel functioneert als niet of nauwelijks gedefinieerde termen in de theorieën. Zulke concepten blijven gehandhaafd als hypothetische constructies, zolang ze een rol vervullen in het doen van voorspellingen of het opstellen van verklaringen.

Vaak is er juist over zulke concepten heftige strijd. Een voorbeeld hiervan is het idee dat een systeem een doel zou kunnen hebben (zie ook §1.2.1). Vroeger zei men wel dat een steen die van een berg omlaag rolde daarmee een doel nastreefde, namelijk het bereiken van de laagst mogelijke plaats. Tegenwoordig gaat

men ervan uit dat de niet-levende natuur geen doelen heeft. Teleologisch denken, het denken in termen van doelen en doelgerichtheid, is in de natuurkunde in het algemeen taboe. Technische systemen hebben normaliter wel een doel, maar dat is het doel van gebruikers, niet van de systemen zelf. Of levende organismen doelen nastreven, doelen 'hebben', is een interessante vraag. Hier nemen we aan dat het concept doel wèl een nuttige term is in onze theorie over organismen en niet in onze theorie over niet-levende systemen.

De bereidheid om concepten, zoals hier 'doel', aan een nader kritisch onderzoek te onderwerpen moet echter steeds blijven bestaan. Concepten zijn overbodig wanneer ze geen aanwijsbare verklarende of voorspellende functie (meer) vervullen in een redelijk expliciete theorie. Alle concepten (begrippen) in de wetenschap zijn voorlopig, zijn gereedschappen die we gebruiken tot we eventueel betere vinden.

Ook in het dagelijks leven gebruiken alle mensen ongeacht opleidingsniveau of leefomstandigheden concepten om de wereld te 'ordenen'. Dit zijn enerzijds namen voor (equivalentie)klassen van objecten met gebruikswaarde (bijvoorbeeld 'stoel'), voor fysieke processen met gebruikswaarde (bijvoorbeeld 'stroom') of voor eenvoudige handelingen van organismen (bijvoorbeeld 'kruipen'). Anderzijds zijn er abstracte concepten betreffende niet direct waarneembare, dus gepostuleerde, entiteiten. (Het woord entiteit wordt vaak in filosofische verhandelingen gebruikt omdat het nog algemener is dan 'ding' of 'zaak' en zowel concrete als abstracte dingen/zaken kan omvatten). Voorbeelden van abstracte concepten zijn in overvloed te vinden in de psychologie van het dagelijks leven: hij is gelukkig, kwaad, een bedrieger. Ook in de alledaagse metafysica vinden we abstracties: god, het goede, het kwade, het einde der tijden. Algemene ideeën over de natuur zijn eveneens abstract, bijvoorbeeld de aanname dat alles een oorzaak moet hebben (causaliteit), dat een handeling of proces ruimte en tijd inneemt, enzovoorts. Hetzelfde geldt voor algemene opvattingen van de gemiddelde mens over redeneren (een juiste redenering met juiste uitgangspunten leidt tot een juiste conclusie) of rekenen (bijvoorbeeld: twee is meer dan één en drie is nog meer; de som van 1 en 2 entiteiten is een groep van 3 entiteiten, ongeacht of het mensen, knikkers of verlangens betreft).

Een belangrijke vraag is in hoeverre al deze menselijke concepten aan de taal zijn opgehangen of ook zouden bestaan als we geen

taal zouden hebben. Categoriseren dieren de wereld net als wij? Hebben ze ook concepten als stoel of geluk, getal of waar/onwaar? In principe kunnen zulke vragen experimenteel onderzocht worden als je de concepten kunt operationaliseren, dat wil zeggen kunt vertalen in waarneembare handelingen oftewel operaties. De term 'operationalisatie' is een overblijfsel uit de filosofische leer van het operationalisme, die stelde dat de betekenis van alle termen en zinnen is gelegen in de procedure van hun empirische verificatie. De leer is verdwenen, maar de term wordt veelvuldig gebruikt bij empirisch onderzoek.

Om bijvoorbeeld na te gaan of dieren eenzelfde concept van 'waar versus onwaar' hebben als mensen, heeft men wel gepoogd te toetsen of ze de zogenaamde algemene denkwetten volgen, die bij mensen waarschijnlijk voor de classificatie in 'waar' en 'onwaar' zorgen. Van oudsher ziet men vier denkprincipes als basis van zulke waar-versus-onwaar classificaties:

1. *Identiteit*: elk ding is gelijk aan zichzelf.
2. *Tegenspraak*: geen ding is wat het niet is (in tegenspraak met zichzelf).
3. *Uitgesloten midden*: elk ding is òf A òf niet-A (maar niet beide).
4. *Voldoende grond*: alles heeft buiten zichzelf een grond die voldoende en noodzakelijk is.

De eerste drie principes zijn de basis van logische systemen zoals de predikatenlogica en de algebra van Boole, het laatste principe motiveert empirisch onderzoek. Met enige inventiviteit kan men gedragsproeven opzetten die aangeven of dieren zich ook aan deze beginselen houden. In het algemeen blijkt dat zo te zijn. De denkwetten operationaliseren als het ware de concepten 'waar' en 'onwaar' en maken daarmee empirisch onderzoek mogelijk naar de vraag of dieren zulke concepten hebben.

2.1.5 *Natuurwetenschap versus religie en het scalpel van Occam*

Religie behoort tot het persoonlijk denken, niet tot de wetenschap. Deze uitspraak is gelukkig in de meeste landen niet omstreden. Gelukkig voor beide terreinen, zoals ook de scheiding van religie en staat voor beide gunstig is en die van wetenschap en staat eveneens. Natuurwetenschap evolueert dankzij competitieve kritiek, beargumenteerde dissidentie, voorspellen en toetsen. Dat zijn geen van alle aspecten die bij religie gunstig werken. De eer-

ste twee zouden trouwens ook in een autoritaire staat erg slecht vallen, zelfs in open samenlevingen worden ze niet zo geweldig op prijs gesteld.

Wetenschap is anders dan religie, het heeft andere spelregels en doelstellingen. Dat is vaak aardig te zien in de vruchteloze discussies tussen creationisten en evolutionair biologen. De laatste worden door creationisten vaak bij wijze van verwijt ‘evolutionisten’ genoemd. Ik ga daar niet inhoudelijk op in, want alles wat er zinnigerwijze vanuit de natuurwetenschap – vooral de paleontologie, vergelijkende anatomie, vergelijkende fysiologie en ethologie – over te zeggen valt, is al gezegd. Het beste wellicht door Douglas Futuyma (1982, 1995) naar aanleiding van de vele ‘equal-time’ rechtzaken die in de Verenigde Staten door creationisten zijn aangespannen. Hier wil ik alleen nog eens benadrukken dat op de twee terreinen geloof en natuurwetenschap totaal verschillende spelregels gelden.

Het bijzondere aan levende systemen is dat ze autonoom zijn en het resultaat van een proces van ‘zelforganisatie’ tijdens fylogeneze, ontogenese, epigenese en leren. De onbekendheid van de gemiddelde mens met de kracht van zelforganisatie leidt heel gemakkelijk tot het ‘argument van het ontwerp’ dat creationisten vaak tegen de evolutietheorie in stelling brengen: “Dit biologische systeem is zo geweldig mooi en effectief dat het wel ontworpen *moet* zijn”. De theorie van zelforganiserende systemen, waarvan de evolutietheorie een voorbeeld is, kan dit argument (‘argument of design’) ontkrachten. Complexe effectieve systemen kunnen uit simpele componenten en interacties ontstaan, zonder ontwerp vooraf. Daarmee kan waarschijnlijk worden gemaakt dat er voor levende systemen geen ontwerper *hoeft* te zijn, wat natuurlijk niet hetzelfde is als aantonen dat er geen ontwerper *is*. Als je het postulaat van een ontwerper echter niet nodig hebt, vervalt het als onderdeel van de wetenschappelijke theorie. Slechts empirische evidentie kan de wetenschap tot een andere theorie met zo’n additionele, niet a priori noodzakelijke, aanname van een ondoorgrondelijk ontwerper verleiden. Die evidentie is er niet en dat is maar goed ook, want het zou verder onderzoek vrijwel blokkeren. Immers waarom zouden we nog verder zoeken als er een toch niet te doorgronden ontwerper aan het werk is geweest?

De wetenschap zegt dus niets over de subjectieve inhouden van geloof of de noodzaak hiervan voor een groot deel van de wereldbevolking, maar heeft geen reden het scheppingspostulaat van dat

geloof in enige theorie in te bouwen. Integendeel, niet toetsbare aannamen of aannamen die niet tot nieuwe voorspellingen leiden of anderszins overbodig zijn, horen niet in een wetenschappelijke theorie thuis. Dit is een belangrijke spelregel die voor het eerst door William Occam geformuleerd is. William Occam (ca. 1284-1349) was een Engelse monnik (hij wordt ook wel met de Nederlandse naam Willem van Ockham opgesierd) die de eis formuleerde, dat geen concepten of hypothesen mogen worden ingevoerd die voor een verklaring overbodig zijn. Zulke overbodigheden moeten worden weggesneden met het onverbiddelijke 'scalpel van Occam' ('Occam's razor').

In Van de Grind (1996a) heb ik deze eis als volgt verwoord. Wetenschappelijke theorieën en modellen zijn denkgereedschappen die ons aan niet-triviale toetsbare voorspellingen moeten helpen. In principe is een natuurwetenschappelijke theorie of een model dus nooit in enige absolute, religieuze of essentiële zin 'waar'. Ze is alleen waardevol in de zin van bruikbaar. Vooral de media begrijpen dit aspect van de natuurwetenschap niet goed. Het is veel flitsender een nieuwe absolute waarheid of zekere bevinding te presenteren dan met de verklaring te komen dat er een nieuwe nuance aan een complexe theorie is toegevoegd. Meestal wordt zo'n nieuwe zekerheid op de tv dan nog onderstreept door een uitgenodigde 'autoriteit', Dr. Clavan, die op meer subsidie hoopt.

De pers en andere buitenstaanders menen tevens vaak dat de wetenschap moet kunnen aantonen dat iets niet waar is of niet bestaat, en ook dat is een ongelukkig misverstand. In de discussie over creationisme versus evolutietheorie duikt bijvoorbeeld steeds het argument op dat de wetenschap niet heeft aangetoond dat er geen creatie van leven door god heeft plaatsgehad. Hetzelfde geldt voor discussies over parapsychologie en astrologie, voor homeopathie en vele andere kassuccessen. De wetenschap kan niet bewijzen dat de betreffende 'geloven' fout zijn, ze kan slechts vaststellen dat ze geen meerwaarde opleveren voor de krachtige, preciese, reproduceerbare voorspellingen die de goederen zijn die de wetenschap de mensheid levert. Ze worden dus met Occam's scalpel weggesneden uit de wetenschap.

De natuurwetenschappen bewijzen niet en doen geen uitspraken over absolute waarheden. De wiskunde bewijst wel allerlei stellingen onomstotelijk, maar dat is mogelijk omdat de wiskundigen zelf de spellen maken die ze spelen. De axiomastelsels, symbool-

systemen, wiskundige modellen zijn gesloten systemen waarbinnen uitspraken zeker waar of zeker onwaar, goed of fout kunnen zijn. Als een wiskundig systeem als model wordt gebruikt voor een natuurwetenschappelijk onderzoeksgebied ontstaan dus ook binnen dat model uitspraken die waar of onwaar zijn. Wat echter in die zin onwaar is, kan in de natuur een feit blijken te zijn en kan zo de aanzet vormen tot het verwerpen van het model. Het wiskundig systeem is daarmee niet ineens fout, maar gewoon niet meer van toepassing, niet meer bruikbaar voor dat onderzoeksgebied. Vandaar dat in de natuurwetenschappen altijd de feiten het laatste woord hebben. Als feiten in strijd zijn met een idee, hypothese of theorie kan men dus binnen de natuurwetenschappen niet doodleuk, zoals indertijd Hegel, zeggen dat dit dan jammer is voor de feiten, maar moet men het idee, de hypothese of de theorie aanpassen (G.W.F. Hegel, 1770-1831, Duits filosoof.)

Natuurwetenschap werkt met voorspellingen en wat het beste voorspelt met de eenvoudigste middelen is de theorie van onze keuze, de 'voorlopige wetenschappelijke waarheid', die anders kan zijn dan de subjectieve, persoonlijke, waarheid. Iedereen die daaraan behoefte heeft, heeft recht op beide (of nog meer) soorten waarheid, mits hij of zij maar de wetenschappelijke waarheden gebruikt bij praktisch handelen (bijvoorbeeld ontwerpen en bouwen van een brug, opereren van een patiënt), want alleen die waarheden zijn getoetst op hun voorspellende waarde in onze habitat en dus niet 'vrijblijvend'. Als onze arts zegt dat we voor onze genezing het beste hard kunnen bidden, zoeken de meesten van ons een andere arts. Religies vervullen een rol in het persoonlijk denken van veel mensen en daar is niets op tegen, zolang we daarin maar de vrije keuze hebben en er niet op hoeven te vertrouwen dat ze ellende voorkomen of genezen.

2.1.6 Misleiding door foutieve beeldspraak

Niet alleen Amerikaanse politici en komieken zijn goed in het bedenken van wat tegenwoordig 'sound bites' heet. Ook veel filosofen, geestelijken, genezers of journalisten hebben korte beeldspraken bedacht waarmee moeilijke problemen worden weggezet of kortgesloten. Vaak zijn dit metaforen, die zo worden ingeslepen dat de meeste mensen denken dat daarmee het probleem volledig is opgelost. Ze verwarren een beeldspraak met een werkend model of wetenschappelijke theorie. Het is niet moeilijk hiervan en-

kele duizenden voorbeelden te geven, maar ik beperk me tot een paar voorbeelden die bij ons onderwerp passen. Ze illustreren hoe een conceptanalyse vaak nodig is en ten onrechte niet wordt uitgevoerd, omdat de metafoor suggereert dat we iets begrijpen, terwijl we het niet begrijpen. Zulke beeldspraken kunnen verder denken volledig blokkeren. Wie het toch probeert wordt gestopt met de beeldspraak zelf en een opmerking in de trant van “dit is een gepasseerd station”. Toch zijn we blij dat Copernicus, Galilei en meer grote denkers nog eens over zo’n gepasseerd station nadenkten.

De beeldspraken *Moeder natuur* en *Vadertje staat* suggereren dat de natuur goed is, ons als een moeder verzorgt, opvangt bij moeilijkheden, troost en beschermt tegen gevaar en dat de staat hier krachtig het zijne toe bijdraagt. Als we langzamerhand ontdekken dat we er in het leven toch zo goed als alleen voor staan, spreken we teleurgesteld over een ‘jungle’, over het ‘establishment’ en over de staat als onderdrukker of uitzuiger. De fout zit natuurlijk in de metafoor, die ons weerhield van verder nadenken. De natuur is goed noch slecht en heeft geen boodschap aan ons als individu, net zomin als de staat. Ze zijn noch onze vader noch onze moeder of wat voor verwanten dan ook, het zijn geen mensen of organismen. De natuur is zoals ze is en biedt mogelijkheden en grenzen aan ons bestaan. De evolutie heeft ons uitgerust met een arsenaal aan gereedschappen om van de natuurlijke mogelijkheden gebruik te maken – en dat niet met het oog op ons als individu of met liefde voor onze soort, maar als zelforganiserend proces. Evenmin als een neushoorn of mug is de mens een optimaal systeem in enige zin van het woord optimaal. We zijn evolutionair voldoende aangepast aan een niche die niet meer bestaat. Als onze leefomgeving zich snel en ongunstig voor onze soort verder ontwikkelt, sterven we uit. Moeder natuur is gewoon de leefomgeving die zowel voor onze soort als voor miljoenen andere soorten mogelijkheden biedt en randvoorwaarden stelt. De rest is statistiek, niet liefde voor het individu. Iets dergelijks geldt voor vader-tje staat, ook al zal deze wijsheid niet aan politici besteed zijn.

We hebben het over *psychische* versus *lichamelijke ziekten*. Als een arts geen diagnose kan stellen en/of geen geneesmiddel ter beschikking heeft, trekt hij een dubieus labeltje uit de kast en zegt dat psychische oorzaken ons welbevinden hebben aangetast. Dit suggereert de omarming van het dualisme, het idee van een onaf-

hankelijke niet-materiële geest die autonoom ziek kan worden en daarmee minder optimaal ons lichaam bestuurt. Vreemd genoeg nemen mensen daarmee genoegen, in plaats van te eisen dat de arts gewoon zegt dat hij niet weet hoe hij ons verder kan helpen. Een ziekte betekent natuurlijk altijd dat er iets in het samenspel van lichamelijke processen (vanzelfsprekend inclusief de hersenprocessen) mis is gegaan. De vraag is alleen wat. Van ziekten die de hersenen betreffen (met psychische verschijnselen samenhangen), weet men nog minder dan van stoornissen van lever, hart, nieren, huid of longen. Als er bepaalde evenwichten in neurotransmittersystemen in het brein verstoord worden, kunnen we bijvoorbeeld lijden aan waanvoorstellingen. Die evenwichten kunnen verstoord worden door interacties met de niet-levende omgeving (zoals eten en drinken, vallen en botsen), maar natuurlijk ook door informatieprocessen (bijvoorbeeld interacties met andere mensen). Informatie moet immers onze hersenschakelingen kunnen veranderen, wil het voor ons informatie zijn in plaats van betekenisloze ruis. Dat continue angst, voortdurende ruzie, eenzijdige informatievoorziening (bijvoorbeeld het verwerken van een continue stroom pornoliteratuur of ophitsende politieke pamfletten) de homeostase in de hersenen kunnen verstoren, is bijna vanzelfsprekend.

Als we iets onthouden, komt dat door een verandering in hersenschakelingen. Als we bepaalde emoties ondergaan, worden bepaalde transmitters, hormonen en peptides geactiveerd. Emoties werken op dezelfde schakelingen in als drugs, alcohol en allerlei voedingsmiddelen. Principieel is er geen verschil tussen psychische en lichamelijke ziekteverwekkers, alleen het deel van het lichaam dat aangetast wordt verschilt van stof tot stof, van ziekteverwekker tot ziekteverwekker. Door het ontorechte onderscheid in psychische en lichamelijke ziekten is ook de betekenis van het woord ziekte verziekt. Als we nu bij een psychisch probleem zouden zeggen dat de hersenen ziek zijn zou de patiënt wellicht verwachten dat hij daaraan geopereerd moet worden, terwijl we misschien bedoelen dat er te weinig acetylcholine beschikbaar is in één of andere hersenkern, of dat een neuro-endocriene regellus niet optimaal functioneert. Een behoorlijke conceptanalyse zou mogelijk helpen de geneeskunde te ontwikkelen tot een geneeswetenschap, maar zou waarschijnlijk moeilijk aan de man/vrouw te brengen zijn. Dus modderen we door met artsen en chirurgen, homeopaten en gebedsgenezers, wonderdoeners, psychotherapeuten, iriskijkers, scharrelkippen en ecovoed-

sel, overgoten met (bij)geloven over reïncarnatie en karma, yoga, bidden om gezondheid of bedevaarten.

We zijn *overspannen* en moeten *stoom afblazen*. Het is eigenaardig dat mensen via beeldspraken de eenvoudigste wetten uit de mechanica en machinebouw geldig verklaren als (impliciet) model voor complexe psychische processen. Veelal zijn die beeldspraken door hun eenvoud ernstig misleidend en toch zijn er weinig mensen die ze kritisch bezien. Veel studenten menen dat ze door studeren, praktika volgen, boeken openen en sluiten, zoveel interne spanning opbouwen dat ze die in het weekeinde moeten 'ontladen'. Ze blazen dan stoom af. We zijn 'gestressed' (wat in de mechanica met trek of druk te maken heeft) en moeten dus 'ontspannen'. Wie zijn 'gevoelens opkropt' (zoals een vogel voer in de krop kan bewaren), wordt ook overspannen en moet stoom afblazen of ontspannen om niet te breken of barsten.

Zou dit soort mentale processen echt zo eenvoudig zijn dat een lineair verband, zoals de wet van Hooke (stress) of de gaswetten (stoommachine), of het volraken van een beperkte ruimte als de krop van een vogel, erop van toepassing is? Natuurlijk niet. Als je met enige tegenzin studeert, raak je vermoeid en willen de hersenen wellicht slapen. Maar wie met woeste interesse studeert, wordt daardoor niet vermoeid maar juist verheugd en fris! Als je slaperig bent kun je na een goede nachtrust weer verder. Je zamelt geen vermoeidheid op als stoom in een stoommachine, waarbij de druk toeneemt en je op een bepaald moment druk moet afblazen. Tegenzin wordt niet ongedaan gemaakt door in een lawaaiige rokerige ruimte alcohol te consumeren en vermoeidheid al helemaal niet. Wel kan de homeostase van de hersenen natuurlijk leiden tot de behoefte aan gevarieerdheid van ervaringen, maar daar spelen processen als gewenning doorheen.

Als we zeggen dat de *hersenen informatie verwerken*, zeggen we òf niets òf iets verkeerd, tenzij we zorgvuldig analyseren wat we met 'informatie' bedoelen en wat met 'verwerking'. Als we bedoelen dat de hersenen niet materie verwerken, zoals ons spijsverteringsorgaan, maar zich bezig houden met patronen, is dat nietszeggend. Niemand twijfelt daaraan en het kan dus niet voor diepe wijsheid doorgaan. Als we met 'informatie' verwijzen naar het technische begrip, zoals dat in de informatietheorie is gedefinieerd en een rol speelt in telecommunicatie en computers (denk aan de bits en bytes), dan is de uitspraak dat onze hersenen informatie

verwerken klinkklare nonsens. Bij technische informatie is de betekenis van de boodschap irrelevant en gaat het alleen om de onwaarschijnlijkheidswaarde (informatie) van de overgezonden reeksen tekens. Technische systemen die tekens, bits en bytes verwerken of opslaan, geven aan de tekens geen betekenis, dat doen uitsluitend levende organismen, de gebruikers van de systemen en tekens. Wat de computer ingaat en eruit komt heeft uitsluitend betekenis voor de gebruiker, niet voor het systeem zelf. Ons brein verwerkt geen bits en bytes, geen informatie in de technische (betekenisvrije) zin des woords.

Als we de metafoor dat de hersenen informatie verwerken dus als inspiratiebron voor een zinvolle theorie willen gebruiken, moeten we de concepten informatie en verwerken eerst analyseren en herdefiniëren. Ik heb daar in §1.4.2 een begin mee gemaakt. De metafoor dat de hersenen informatie verwerken met de bijna vanzelfsprekende implicatie dat ze een sterke analogie vertonen met computers, is een goed voorbeeld van een misleidende beeldspraak. Deze beeldspraak heeft echter al menig onderzoeker geld opgeleverd en zal dus niet zo snel verdwijnen. De ‘computationele neurowetenschap’, ‘computationele psychologie’ en ‘computationele X’ zullen er voorlopig wel voor zorgen dat de informatieverwerkingsterminologie onderzoeksgelden aan blijft trekken. Degene die aandringt op een kritische analyse van de vlag die de lading dekt, termen als informatie en computationeel, hoeft dan ook niet op grote sympathie te rekenen.

Het beeld van de hersenen als een informatieverwerkend systeem, een computer, wordt verder doorgevoerd in de beeldspraak van *software versus hardware* in de hersenen. Bij de ontwikkeling van de computer was de uitvinding van het ‘stored-program’ principe van eminent belang. Reeksen instructies en gegevens worden apart opgeslagen en op afroep doorgegeven aan de centrale verwerkingseenheid. Daardoor hoeft de centrale verwerkingseenheid niet een specifiek programma te ‘belichamen’ en maakt het niet uit waar (waarin) het programma wordt opgeslagen. Dit is mogelijk, omdat alles in een uniforme code wordt opgeslagen (binnaire getallen) en de operaties die door de programma’s worden gespecificeerd niets anders zijn dan logische combinaties van binnaire getallen. Door de metafoor van de hersenen als informatieverwerkend systeem werd het idee geboren dat ook in onze hersenen sprake zou zijn van vrij verplaatsbare programma’s, van zogenaamde software. Voor gelovigen die techniek en natuurwe-

tenschap met hun geloof in overeenstemming wilden brengen, was dit idee een uitkomst. We weten natuurlijk dat het lichaam na de dood wordt opgegeten door wormen of verbrand, maar als er vrij verplaatsbare informatie is, waarom zouden de bits en bytes die tesamen een persoon vormen dan niet naar de hemel kunnen opstijgen om daar op een ander type machine (engeltje) te 'draaien'? Als onze 'computer' is geschapen kent de schepper de code en kan hij het programma herstarten op de nieuwe machine. Hoewel ik me niet kan voorstellen dat deze herformulering van de bijbel voor traditionele gelovigen acceptabel is, zijn er wel dergelijk aanhangers van dit idee onder gelovige 'hackers'.

We herkennen hier hopelijk het probleem dat de computer een specifieke door mensen ontwikkelde machine is, die goedkoop te produceren moet zijn met de toevallig beschikbare technologie van het betreffende tijdsgewricht. Bij een fiets of auto hebben we niet een centrale verwerkingseenheid waar we het remprogramma, het versnellingsprogramma, het kruissnelheidsprogramma en dergelijke naartoe sturen als ze nodig zijn, terwijl die programma's de rest van de tijd in een apart geheugen worden opgeslagen. Door toepassing van het computerprincipe zou zoiets tegenwoordig wellicht realiseerbaar zijn, maar hier gaat het me erom dat er genoeg machines zijn die niet met 'software' werken. In die machines zijn alle causale relaties die ooit nodig zijn in materiële structuren vastgelegd en niet vrij verplaatsbaar. Waarom denken we dat in onze hersenen de potentiële causale relaties in de vorm van vrij verplaatsbare universele codes opgeslagen liggen in een centrale opslag? Niets wijst daarop. Integendeel, alles wijst erop dat de causale verbanden die we hersenprogramma's noemen in de neuronale structuren verankerd liggen daar waar ze nodig zijn. De software-metafoer is misleidend, omdat de implicaties – vrije verplaatsbaarheid van hersenprogramma's, een gescheiden centrale verwerkingseenheid en een apart random access geheugen – onjuist blijken te zijn. Het is opvallend hoe gemakkelijk velen in deze val trappen en onbekommerd de software-metafoer toepassen.

2.2 Neuroreductie: van gedrag tot zenuwcel

2.2.1 Argumenten vóór en tegen reductie van biologie

De natuurwetenschappen worden wel onderscheiden in natuurkunde en scheikunde enerzijds en biologische of levenswetenschappen anderzijds. Sommigen vinden dit onderscheid fundamenteel en stellen dat leven nooit begrepen kan worden in termen van zuiver fysisch-chemische processen. Anderen vermoeden dat alle theorieën over levensverschijnselen, nu of te zijner tijd, volledig (om)geformuleerd kunnen worden in termen van theorieën en modellen over fysisch-chemische processen.

Reductionisme is de doctrine die stelt dat alle levensprocessen (inclusief gedrag) volledig verklaard kunnen worden met de wetten van de natuurkunde.

Met ‘reductie’ bedoelt men hier dus het verklaren van complexe fenomenen in termen van eenvoudiger verschijnselen. Daarbij wordt meestal gedacht aan een vertaling van fenomenen op een bepaald afmetingenniveau, zoals het hele organisme, naar verschijnselen op een kleiner afmetingenniveau, zoals cellulaire, moleculaire of submoleculaire processen. Een bekend voorbeeld is de reductie van een macroscopisch concept als temperatuur tot een statistische parameter van deeltjesbeweging. Vroeger noemden reductionisten zich ‘materialisten’ en trachtten de eigenschappen van alles wat kenbaar is terug te brengen tot eigenschappen van de materie. Tegenwoordig is ‘materie’ niet zo’n elementair begrip meer in de natuurkunde en noemen vele reductionisten zichzelf ‘fysicalisten’. Zo zouden ecologie, sociologie en psychologie gereduceerd kunnen worden tot biologie, en biologie zou gereduceerd kunnen worden tot chemie en natuurkunde. (De chemie op zich zou volledig tot natuurkunde gereduceerd kunnen worden.)

Reductionisten wijzen erop dat levende systemen geen andere elementen bevatten dan niet-levende systemen. Alles is sterrenstof. Slechts zestien van de 92 natuurlijke elementen komen in levende systemen voor als intrinsiek onderdeel van de systeemorganisatie. Deze zestien stoffen vormen een bijzondere groep, waaruit door middel van combinatie moleculen van ongelofelijke

complexiteit opgebouwd kunnen worden, die in de natuur alleen in levende systemen voor komen. In zoverre is leven dan toch in elk geval iets bijzonders. Het vertoont een complexe organisatie van complexe moleculen die alleen in levende systemen of in daarvan nagebootste systemen (in het juiste milieu) een bepaalde molecuulspecifieke rol kunnen vervullen. Het idee van reductionisme is dus dat de fysische wetmatigheden en randvoorwaarden desondanks voldoende zijn om alle levensverschijnselen te begrijpen.

Het *nonreductionisme* (een voor de gelegenheid bedachte term) stelt daar tegenover dat voor levende systemen een aantal specifieke eigenschappen en wetmatigheden gelden, die niet opgaan voor niet-levende systemen. Volgens vele nonreductionisten zijn de wetmatigheden en theorieën van de natuurkunde en scheikunde slechts deelverzamelingen van de wetmatigheden en theorieën die de gehele natuur, inclusief leven, beschrijven. Omdat het begrip organisatie van een andere orde lijkt dan begrippen als materie of energie, twifelen ook velen die tot reductionisme neigen aan de juistheid van een strikt, hard en letterlijk reductionisme, behalve wellicht voor de scheikunde. Dit gematigd nonreductionisme gaat ervan uit dat wat niet tot fysisch-chemische wetmatigheden reduceerbaar is toch uitstekend wetenschappelijk onderzocht kan worden, bijvoorbeeld met wiskunde en informatica erbij als hulpwetenschappen. Wiskunde en informatica worden door deze nonreductionisten meestal gezien als goede voorbeelden van niet tot fysische wetmatigheden te reduceren vakgebieden en ze wijzen er dan op dat de *beschrijving* van fysische wetmatigheden dus evenmin reduceerbaar is tot de beschreven processen (het verschil tussen de kaart en het landschap). Nonreductionisten vinden de methoden en resultaten van het reductionisme wel een *noodzakelijk* onderdeel van de biologie, maar niet *voldoende* voor het begrijpen van het leven.

Extremere nonreductionisten, die we *antireductionisten* zullen noemen, vinden de methoden en resultaten van het reductionisme noch voldoende noch noodzakelijk voor de biologie en zelfs meestal misleidend of ontoelaatbaar. Ze gaan bijvoorbeeld ervan uit dat er zoiets als een specifieke, niet verder wetenschappelijk analyseerbare, levenskracht zou bestaan. Dit uitgangspunt heet *vitalisme*. Het is echter niet vruchtbaar om ervan uit te gaan dat iets niet verder analyseerbaar is, nog voordat je ondubbelzinnig en

aantoonbaar op de betreffende harde grenzen van de analyse gestoten bent, en het leidt alleen maar tot taboes. Het vitalisme vindt dan ook nauwelijks aanhang in de hedendaagse wetenschappelijke wereld. Wellicht de laatste bekende bioloog die dit idee serieus verdedigde was H. Driesch (1867-1941), die de oerlevenskracht *entelechie* noemde, een begrip van Aristoteles, waaraan Driesch een andere invulling gaf.

Voorzover men aanneemt dat deze oerlevenskracht ook in niet-levende systemen op een of andere wijze aanwezig is of kan zijn, spreekt men over *animisme* (bezielde materie, van het Latijnse woord *anima* voor ziel). Het geloof aan geesten en aan de kracht van totems, amuletten en andere dode dingen berust onder andere op animisme. De animist leidt meestal geen vrolijk leven, met angsten voor allerlei bovennatuurlijke krachten waarmee je op complexe manier om moet gaan (voodoo) of die ongebreidel slecht zijn (zwarte magie). Deze extreme vormen van antireductionisme vinden in de natuurwetenschappelijke literatuur geen enkele verdediging, maar beheersen helaas nog het dagelijks leven van miljoenen mensen! Het is een van de meest positieve aspecten van de wetenschap en de op wetenschap gestoelde cultuur, dat ze mensen van deze gevoelens van onmacht en redeloze bedreiging kan genezen.

Het *holisme* (van het Griekse woord *holos* voor geheel) kent aan het organisme als geheel dusdanig andere, holistische, eigenschappen toe dat het geheel niet uit de eigenschappen der delen begrepen zou kunnen worden. Levensverschijnselen kunnen volgens het holisme niet op dezelfde wijze verklaard of onderzocht worden, als de verschijnselen waarmee natuur- en scheikunde zich bezig houden, omdat 'alles met alles' samenhangt. Sommige gematigde holisten leggen er slechts de nadruk op dat de totaliteit van het organisme meer is dan de som der delen en dat de onderlinge samenhang en samenwerking der delen in het onderzoek op het eerste plan moeten staan. De Gestalt-psychologie heeft, zoals we in het volgende hoofdstuk zullen zien, dit type standpunt met enig succes op waarnemingsonderzoek toegepast. De meeste biologen zullen met deze milde vorm van holisme geen probleem hebben. Organisatie of structuur, systeem of bouwplan staan dan voorop in onderzoek en de componenten zijn van ondergeschikter belang. Dit wetenschappelijk acceptabel holisme lijkt tot op zekere hoogte verdedigbaar, zeker als de aanhanger ervan het reductionisme als onderzoeksstrategie aanvaardt. Het holisme heeft

echter ook sterkere, antireductionistische, varianten opgeleverd, die meer politiek of religieus gemotiveerd lijken. Zo stellen sommige van deze (super?)holisten dat reductie of het isoleren van systemen om eraan te kunnen meten principieel en altijd onjuist is. Ze vinden dat de wetenschap met zijn reductionistische aanpak volledig op de verkeerde weg is. Veelal prijzen ze de meer mystieke inzichten aan, zoals Oosterse wijsheden, en zijn ze wat betreft de Westerse ‘beschaving’ cultuurpessimisten. In zoverre ze geen koelkast, radio, tv, computer, auto, bus of trein, telefoon en dergelijke gebruiken, of vrijwillig in Bangladesh gaan wonen, lijkt me hun kritiek serieus bedoeld. Dit superholisme is meestal antiwetenschappelijk en bestempelt de hele wetenschap als dwaling, of zelfs als levensbedreigend. Een iets mildere vorm accepteert de wetenschap wel tot op zekere hoogte, maar wantrouwt de reductionistische kernmethode van vrijwel alle natuurwetenschap iets meer dan de gemiddelde onderzoeker.

De aanname dat iets niet verder te analyseren of ontleden is, zoals die in diverse varianten van antireductionisme wordt gepostuleerd, is uiteraard niet erg productief. Het werkt ontmoedigend of als taboe, waaruit geen nieuwe bruikbare kennis voort kan vloeien. Het attractieve van het reductionisme is juist het onvermoeibare streven om alle natuurlijke processen met een zo klein mogelijk aantal algemene natuurwetten te beschrijven en daarbij a priori geen taboes te accepteren. Dit uitgangspunt is steeds productief gebleken en benadrukt de eenheid van alle natuurverschijnselen en alle wetenschap. Dit is een van de redenen waarom reductionisme het meest gebruikelijke wetenschappelijke uitgangspunt is. Daar komt bij dat ‘herleiding tot in het ongerijmde’ (reductio ad absurdum) een vruchtbare strategie is gebleken, zodat kennelijk ook een verkeerd uitgangspunt naar de goede conclusie kan leiden, mits maar consequent wordt doorgeredeneerd tot een tegenspraak optreedt. Zelfs uitgesproken tegenstanders van het reductionisme kunnen volgens deze strategie van de werkhypothese uitgaan dat het reductionisme geldig is. Door vervolgens consequent verder te werken met dat uitgangspunt, voorspellingen te doen en empirisch te toetsen, moet dan ergens een tegenspraak optreden die aantoonde dat het uitgangspunt onjuist was. Velen gaan daarom van het reductionisme uit zonder te geloven dat het ‘in laatste analyse’ juist is. Ze beschouwen het slechts als een effectieve onderzoeksstrategie. Omgekeerd zijn reductionisten vaak bereid ervan uit te gaan dat om allerlei praktische redenen niet

echt alles reduceerbaar zal zijn tot de wetten van natuur- en scheikunde. Een belemmering zou de te grote complexiteit kunnen zijn, die het in de praktijk onmogelijk maakt voldoende preciese voorspellingen te doen met bestaande of ooit nog te ontwikkelen computers. De meeste reductionisten zijn tevreden met het idee van een ‘in principe’ reductie.

Ongeacht of men het reductionisme als uiteindelijk totaal fout, beperkt geldig, of absoluut geldig ziet, moet men nadenken over de juiste formulering van de strategie. Wat bedoelen we precies met de stelling dat leven reduceerbaar is tot materiële (respectievelijk fysische) processen? Het is in zekere zin een triviale waarheid dat levende systemen meer zijn dan aggregaten van zestien elementen. Het zijn immers vooral *georganiseerde* eenheden. Moleculen zijn geen willekeurige bundels atomen, maar hebben een specifieke structuur die bepaalde functies mogelijk maakt en andere uitsluit. Moleculaire systemen vormen functionele subeenheden in nog complexere organisaties, de cellen, en deze vervullen weer specifieke rollen in weefsels en organen. De functionele verbanden, de organisatie, kan men niet zomaar zien als een energetisch-materieel proces. Het zijn juist de structurele samenhangen, de interacties, die de systeemeigenschappen bepalen. Immers, alle individuele atomen en moleculen kunnen door andere (soortgenoten) worden vervangen zonder dat de organisatie erdoor verandert. Dat maakt de organisatie tot iets van een andere aard dan materie/energie.

Toch wordt daarmee de organisatie van een systeem, al is die niet identiek met de materie van het systeem, geen mysterieuze niet te analyseren grootheid. Men kan de organisatie met de gebruikelijke natuurwetenschappelijke methoden bestuderen en mathematisch beschrijven. De organisatie bestaat immers uit het geheel van relaties tussen processen, en de relaties kan men meten als verandering in één proces tengevolge van veranderingen in andere processen. De organisatie omvat het geheel van causale (oorzakelijke) verbanden tussen de delen van een systeem.

Een tweede probleem met reductie is, wat D.T. Campbell “neerwaartse causatie” noemde (zie Popper, p.19, in Popper & Eccles, 1977). Macroscopische structuren kunnen vaak direct invloed hebben op de ‘onderliggende’ microscopische processen, zodat deze laatste niet een voldoende verklarende grond voor het geheel kunnen zijn en reductie dus ook niet werkt. Voorbeelden zijn lasers, masers, hologrammen, diffractierasters, sterren, enzo-

voorts. In een ster bijvoorbeeld treden kernreacties op dankzij de specifieke gevolgen van het bijeenkomen van een enorme hoeveelheid materie. De ster is gewoon een hoop massa, heeft geen a-priorische organisatie en bepaalt desondanks het optreden van kernreacties, die zonder de enorme massa niet plaats zouden vinden. Er is geen eenvoudige reductie mogelijk, waarbij het gehele proces direct volgt uit de eigenschappen van de componenten. Desondanks is er ook niets mystieks aan de hand. Het falen van de soort reductie die men aanvankelijk verwachtte is dus niet desastreus voor de wetenschap. Er zijn gewoon feiten en randvoorwaarden die niet volgen uit de invariante natuurwetten, maar er evenmin strijdig mee zijn. De feiten van een enorme massa en van bepaalde waarden van natuurconstanten leiden samen met de invariante natuurwetten tot een redelijk sluitende verklaring, een goede theorie. De feiten zijn daarmee echter niet verklaard, het blijven meetgegevens.

Een volgend probleem voor het klassieke reductionisme komt ook uit de natuurkunde zelf voort. Terwijl Laplace (1749-1827) nog uitging van een inherent determinisme van alle natuurkundige processen en kansrekening slechts nodig achtte om gebrek aan kennis te overbruggen, ziet de moderne natuurkunde de wereld als inherent niet-deterministisch. Laplace stelde zich in een gedachtenexperiment een superintelligent wezen voor dat op een bepaald ogenblik alle toestanden en krachten van de materie in het hele heelal zou kennen. Omdat de volgende toestand uit de vorige voortkomt, zo redeneerde hij, zou dit wezen de volgende toestand uit deze kennis en kennis van de natuurwetten kunnen afleiden. Dezelfde redenatie geldt op het volgende moment en het daaropvolgende en zo verder, maar ook terug in de tijd. Kortom alle toestanden van verleden, heden en toekomst zouden door dit wezen kunnen worden berekend uit de natuurwetten en de gegevens van één moment. Uiteraard werkt dit alleen als er geen inherente onzekerheden zijn in de toestandsovergangen, dat wil zeggen als de wereld deterministisch is. Dit beeld past goed bij alle religies die een soort 'Grote Ontwerper' postuleren met volledige kennis van alle details van heden, verleden, maar ook toekomst.

Moderne natuurkundigen gaan uit van een inherent niet-deterministische wereld, op een paar markante uitzonderingen na. In zo'n wereld is dat wat ontstaat niet volledig voorspelbaar uit dat wat er al is, ook al is zeker op een bepaald moment niet alles zomaar mogelijk. Zonder hier verder op de moderne natuurkunde in te gaan, zal wel duidelijk zijn dat hiermee de aantrekkelijkheid

van het oorspronkelijke programma van de reductionisten behoorlijk is afgenomen. Emergenties en neerwaartse causatie lijken mogelijk, materie is niet zo simpel als men wel dacht, bepaalde toestanden liggen pas vast als men ze meet. Kortom, de natuurkunde heeft de handen vol aan zichzelf. Het lijkt niet langer een eenvoudige ruggegraat voor alle wetenschappen.

Ik zal hier mijn eerdere toelichting (van de Grind, 1996a, p.3-4) herhalen, waarom ik een milde vorm van nonreductionisme – onder acceptatie van de reductionistische methode – een redelijke uitgangspunt vind voor de biologie. Stel dat ik op een ver strand een schelp vind van een bepaalde kleur en vorm met een opmerkelijk gat erin. Een locale bioloog zou me kunnen vertellen dat de schelp van diersoort x afkomstig is, die juist in die tijd in grote groepen vlak voor de kust op ondiepe gedeelten paart en daarbij door vogelsoort y wordt gebruikt als voedsel, terwijl die vogel precies het type gat maakt wat ik in de schelp zie. Ik kan hem vragen naar de vorm van de schelp en hij kan me vertellen hoe het schelpdier groeit, waarom er alternerend pigment a en pigment b wordt geproduceerd (chemische taal), en hoe de spiraalvorm ontstaat (wiskundige taal). Hij kan me uitleggen waarom deze soort juist hier voor de kust paart (toevallige habitatfactoren), met welke andere soorten het dier verwant is (historische aspecten) en waarom er gedragsverschillen zijn (evolutionair-mechanistische factoren), enzovoorts.

Nergens in ons gesprek is de kwantumtheorie nodig of hoeven we een beroep te doen op de Maxwell-vergelijkingen, zelfs niet als we over de invloed van golfstromen, zandbanken en watertemperaturen op jaagstrategieën van de strandvogels of het gedrag van de weekdieren praten. Geen van de onderwerpen uit dit schelpgesprek postuleert mystieke, niet-fysische processen en toch is de fysica grotendeels irrelevant. We praten wel over causale verbanden, maar niet over de onderliggende energetische en materiële interacties op zich. Het gaat eerder over de gevolgen van fysische wetmatigheden voor vormverandering en vormbehoud, dat wil zeggen over feitelijke en deels toevallige dynamische patronen in ruimte en tijd, over de toevallige vormen die de evolutie heeft opgeleverd. Toevalligheden en randvoorwaarden trekken onze aandacht, de invariante eeuwige wetmatigheden van gravitatie en licht, stroming en kracht, electriciteit en magnetisme zijn niet opmerkelijk in dit verband. We praten verder in termen van functies die passen in doelstellingen (zelfpreservatie,

voortplanting, en dergelijke) in plaats van in termen van energetisch-materiële invarianten en wetmatigheden. We zijn met een legitiem ander vak bezig, de biologie.

Het meest opmerkelijke verschil tussen fysica-chemie enerzijds en levens- of gedragswetenschappen (maar ook techniek) anderzijds is de grote rol die functies, doelstellingen, patronen en organisatie in de laatste spelen, en de onbelangrijkheid respectievelijk het taboe daarop in de fysica-chemie. Voor de techniek is dat het eenvoudigst in te zien. De fysica bestudeert in principe een *natuurlijk* systeem dat geen maker en doel heeft en streeft daarbij naar het formuleren van invariante universele wetmatigheden. Een fiets bijvoorbeeld is daarentegen een *gemaakt* systeem. Hoewel het in alle details op fysische wetmatigheden berust, maakt het toch geen onderdeel uit van de niet-gemaakte onpersoonlijke wereld van eeuwige invarianties die de fysica in kaart brengt. Het is een machine, een gereedschap van de mens dat menselijke doelen dient en met het oog daarop ontworpen is. Het heeft een bouwer en gebruiker en specifieke organisatie die naar het gebruik verwijst. Een fiets is onbegrijpelijk als we niet vooral zijn gebruiksdoel kennen, een stelling die voor gravitatie of voor interferentieverschijnselen niet opgaat. De fysische wetmatigheden worden voor de studie van de fiets als gegeven verondersteld en er is geen nieuwe fysicakennis nodig om een nieuwe fiets te ontwerpen. Zonder fysische kennis kun je geen behoorlijke fiets ontwerpen, maar zonder fiets blijven de fysische processen onveranderd.

Reductie van de fietsologie tot de fysica lijkt me niet relevant en niet aan de orde, zelfs niet mogelijk zonder de fietsfunctie (gebruiksdoel voor de mens) kwijt te raken. De fietsologie overlapt een deel van de fysica, maar valt er niet volledig binnen. Het overlapt ook een deel van de psychologie, maar valt ook daar niet volledig binnen. Functies en doelen zijn geen objecten van fysische studie, maar van de vakken die functionele, organisatorische zaken bestuderen. Dat mensen zich willen verplaatsen kan men uit biologische overwegingen 'verklaren', het volgt nergens uit de fysica-chemie. Gegeven die wens is de fiets technisch begrijpelijk als oplossing van een probleem. De technicus moet voldoende kennis van de fysica (en wiskunde) hebben, maar bovenal ook begrijpen welke problemen het leven stelt. Hoewel veel fysici ook technisch talent hebben, is de techniek geen fysica en er niet toe te reduceren omdat bij techniek veel zaken komen kijken die gewoon niet tot de fysica behoren (wat hebben gebruikers ervoor

over, welke kleur geven we dit, enzovoorts). Wie verwacht nu de hamer en zaag met de schuur die de timmerman ermee maakt? Fysici zijn echter niet bescheiden en claimen soms dat alles wat op fysica-kennis berust, ook fysica *is*. Ze claimen dan de uitvinding van de computer en radio, de televisie en telefoon, de oogspiegel en röntgenapparaten, terugkoppeling en regelsystemen. Echter dit zijn net als de fiets geen fysische (natuurlijke) systemen, maar technische (gemaakte) systemen, machines en gereedschappen, systemen met een doel. De technici hebben fysische kennis gebruikt, maar een gebruiksdoel voor de mens leidde tot de uitvinding en dit gebruiksdoel is geen fysische entiteit. Fysica en techniek overlappen, maar niet volledig. Er is een demarcatielijn tussen techniek gebaseerd op fysica plus mensenkennis enerzijds, en de fysica anderzijds, die universele invarianten beschrijft die ook zonder de aanwezigheid van de mens zouden gelden. Deze demarcatie verdoezelen, dat wil zeggen de gebruiker wegmoffelen, is een stapje naar ongefundeerd fysicalisme. “Alles is in principe één pot nat en we noemen het fysica” lijkt me geen verhelderend uitgangspunt. Het is het soort betekenisloze herstructurering van de wetenschap tot megalomaan systeem dat normaliter alleen bij politici opkomt.

Een landkaart is noch het gerepresenteerde land, noch de inkt en het papier, noch een verzameling wiskundige objecten (Mandelbrot sets, cirkels, rechten, enzovoorts), maar een gereedschap om samen met enige kennis in het hoofd de weg te vinden. Het heeft een functie voor levende systemen en ik zie niet hoe je die functie kunt reduceren tot de informatiedragers, de fysisch-chemische structuren op zich, zelfs niet tot de vormen op zich. Waarom accepteert men niet gewoon een rolverdeling waarbij de wetenschappen parallel werken in plaats van een hiërarchie te vormen? Zou het voortkomen uit de arrogantie van de fysica, die geen autonome vakgebieden naast zich accepteert, maar ze als moederdiscipline meent te moeten ‘onderbouwen’? Of heeft het te maken met het Christelijke ideaal van één enkele verklarende grond voor alles?

Non-reductionisme in de geschetste pragmatische zin accepteert niet-fysische en niet-chemische causale verbanden, die gewoon wetenschappelijk bestudeerd kunnen worden en het legitieme onderwerp van de levenswetenschappen en gedragswetenschappen zijn. Er is geen speciale fysica of chemie voor nodig, mogelijk zelfs geen nieuwe wiskunde en we hoeven geen onbe-

kende speciale krachten te postuleren! De functie van de landkaart bestaat uit de causale relatie tussen de symbolische voorstelling en zijn gebruiker. De materieel-energetische processen die als drager dienen, zijn hierbij tamelijk irrelevant. De functie, de vorm-vorm interactie, betreft een relatie tussen complexe verbanden (kennis) in een hoofd en de verwijzing naar de wereld door (de symboliek van) de patronen op het papier. De muziek waarvan u vrolijk wordt is van microfoon tot luidspreker, inclusief de luchttrillingen aan beide uiteinden van de keten, fysica en techniek (technische informatie), maar 'bioinformatie' (betekenisvol) voor u en de muzikanten. Biologen, psychologen en kunstenaars interesseren zich voor deze bioinformatie, technici en fysici voor de technische informatie en energetische processen, waarbij technici met biologen en psychologen gemeen hebben dat ze in termen van functionele, op een doel afgestemde, systemen denken.

Een verschil tussen biologie en fysica is dat de eerste wetenschap zich sterk richt op feiten van de levende wereld zoals die toevallig zijn, terwijl de fysica universele wetten zoekt die compatibel zijn met de feiten, maar waaruit de feiten niet noodzakelijkerwijs volgen. Hunter (1996) bespreekt hiervan onder andere het volgende voorbeeld. Terwijl de codon AGA bij de vertaling van RNA in de constructie van eiwitmoleculen betekent dat er arginine moet worden aangemaakt, had het net zo goed en even compatibel met de natuurkunde, kunnen coderen voor een andere stof. Bij de fruitvlieg is dat zelfs zo en codeert AGA voor serine. Kortom, wat hier voor de bioloog interessant is, is fysisch arbitrair.

Het levend deel van het universum bestaat uit structuren die we niet kunnen afleiden uit natuurkundige wetmatigheden en in die zin dus arbitrair zijn, maar niet strijdig kunnen zijn met de fysische wetmatigheden. De natuurkunde staat systemen toe met en zonder terugkoppeling, maar biologisch is dit een groot functioneel verschil. Mayr (1982) heeft erop gewezen dat biologische verschijnselen zowel 'proximate' als 'ultimate' oorzaken hebben. De gewone fysiologie bestudeert vragen omtrent 'hoe het werkt', zoekt naar de wat Mayr noemt 'proximate' oorzaken van verschijnselen. De evolutionaire biologie (inclusief evolutionaire fysiologie) richt zich op vragen omtrent 'waarom het zo werkt' en zoekt naar Mayr's 'ultimate' oorzaken van verschijnselen. In de biologie is de vraag 'waarom' zinvol in het kader van de evolutietheorie, maar in de natuurkunde zinloos.

Ten slotte iets over de reductionistische methode. De reductionistische methode omvat bij experimenteel onderzoek een stap waarin men tracht de te bestuderen verschijnselen zo goed mogelijk (niets is perfect) van andere te isoleren, om ze beter te kunnen bestuderen en de verbanden ieder apart te kunnen kwantificeren. Dit is zo'n essentiële stap in het meetbaar maken van complexe samenhangen, dat die – los van iedere filosofie – niet uit de moderne wetenschap weggedacht kan worden. Wie dat niet wil accepteren kan gewoon geen empirisch onderzoek doen. Als je bij de berekening van een brug rekening wilt houden met het feit dat de stand van Sirius wellicht het krachtenspel in de zeshonderdste decimaal achter de komma kan beïnvloeden, komt de brug niet af. Dat geldt bij metingen net zo. Theoretisch kun je een invloed van Sirius of van de beurs in New York niet principieel uitsluiten als je wilt meten hoeveel kracht er in de staart van een zeeduivel zit. Wie verstandig is (en geen principieel holist) concentreert zich op de factoren die een reproduceerbare en goed meetbare invloed hebben, en noemt de rest bijvoorbeeld 'variantie'. Hier levert de natuurkunde prachtige voorbeelden van het succes van de formule van isolatie van hoofdzaken.

In de theorievorming komt dit principe tot uiting in de zogenaamde 'idealisatie'. Als er geen kracht op een voorwerp wordt uitgeoefend zal het met constante snelheid (eventueel kan die nul zijn) bewegen, leert Newton ons in navolging van Galileo Galilei. Die situatie van volledige krachtenvrijheid is een idealisatie. We hebben hem in het dagelijks leven nooit meegemaakt. Toch speelt die idealisatie een enorme rol bij het beschrijven van echte omstandigheden en vormde de basis van de grootse ontwikkeling van de mechanica. Isolatie van hoofdinvoeden in het empirisch onderzoek, idealisatie in de theorievorming, en mathematisatie zijn methodologisch krachtige en onmisbare wapens van de moderne wetenschap, ook ver buiten de natuurkunde waarin ze het eerst hun waarde bewezen. Het gebruik van dezelfde methoden en zelfs apparatuur, de geldigheid van dezelfde natuurwetten en natuurconstanten, het gebruik van dezelfde SI-eenheden zijn echter niet genoeg grond om de biologie op te vatten als een soort onvoldoende 'opgeschoonde' natuurkunde. Filosofisch nonreductionisme gepaard aan methodologisch reductionisme lijkt me voor de biologie het meest redelijke uitgangspunt.

2.2.2 Neuroreductie en de psychofysica

De biologie kent dus naast ‘proximate’ ook ‘ultimate’ factoren en we hebben in dat verband gekozen voor een milde vorm van filosofisch nonreductionisme, maar methodologisch reductionisme. Betekent dat nu dat gedrag en de werking van het zenuwstelsel niet voldoende met elkaar in verband gebracht kunnen worden, dat ‘neuroreductie’ onmogelijk is? Nee, dat betekent het niet. Bij de verklaring van het gedrag spelen teleologische (functionele) aspecten een rol en die vinden we niet zozeer in het zenuwstelsel als wel in onze theorie. We kunnen bij de werking van neuronale netwerken natuurlijk ook theorieën formuleren over hun mogelijke functie en fylogenetische oorsprong, we kunnen ze met andere woorden opvatten als hersenprogramma’s. De componenten en structuur van hersenprogramma’s (het antwoord op de vraag *hoe* het hersenprogramma werkt) kunnen weer met de vertrouwde reductionistische methoden worden onderzocht. In §2.2.3 analyseren we precieser welke eisen moeten worden gesteld aan dit proces van neuroreductie. Hier gaan we, na een inleiding over neuroreductie, eerst in op een belangrijke methode om gedragscomponenten kwantitatief te onderzoeken en aan de prestaties van dieren bij die gedragingen maat en getal toe te kennen: de psychofysica.

Neuroreductie is de poging mentale processen te verklaren in termen van hersenprogramma’s, waarbij een hersenprogramma een ‘plan voor actie’ is dat in neuronale structuren en overige lichamelijke processen vastligt.

Het begrip hersenprogramma impliceert een doelstelling (plan voor actie) en afstemming op de middelen, gereedschappen om dat doel te bereiken (lichaam, lichaam-omgeving interactie) en is in dit verband superieur aan een term als ‘neuronale processen’ (zie ook §1.4). Neuronale processen klinkt naar fysico-chemische processen, die men ook in isolement kan onderzoeken en waarbij noch het concept doel noch de aard van het lichaam of de leefomgeving een directe rol speelt. Voorbeelden van neuronale processen zijn immers het opwekken van actiepotentialen, het ontstaan van de rustmembraanpotentiaal, de werking van een bepaalde neurotransmitter, enzovoorts. In het concept hersenprogramma

daarentegen komt goed tot uitdrukking dat het om samengestelde, georganiseerde, processen in het zenuwstelsel gaat, die doelgericht zijn, dat wil zeggen betrekking hebben op overleven en fitness.

Er is veel discussie geweest over het begrip doelgericht (teleologisch), omdat het voor sommigen impliceert 'bepaald door de toekomst'. Ze zien dan bijvoorbeeld de overgang van vissen naar amfibieën als causaal bepaald door het einddoel: de mens als evenbeeld (of onvolmaakte representatie) van god. Die implicatie is hier natuurlijk *totaal afwezig*. Als we het over doelgericht hebben (teleologische processen) bedoelen we steeds programma's die nu of in het verleden door adaptatie (selectie uit variatie) ontstaan zijn, en die tevens vermoedelijke toekomstige problemen kunnen oplossen, omdat de wereld nu eenmaal meestal niet zo snel verandert. Adaptatie van organismen is steeds een respons op bestaande en vroegere problemen, niet een voorzien van toekomstige wenselijkheden of problemen. Wat vandaag goed is zal morgen echter meestal ook nog wel goed zijn, en zo niet, dan is het vaak niet meteen fataal. Daarom zijn de meeste aanpassingen, de meeste ontwikkelde gedragsprogramma's, achteraf beschouwd ook toekomstbestendig, maar natuurlijk niet door de toekomst bepaald. Zoals bekend zijn adaptaties, specialisaties, soms fataal in een veranderende omgeving en sterven diersoorten uit. Doelgerichte systemen zijn 'regelsystemen' met een door het verleden bepaalde 'instelling' en bij dieren lopen vele regellussen door de omgeving (bijvoorbeeld, honger leidt tot voedsel zoeken). Door leren worden hersenprogramma's op de tijdschaal van individuele levens gemodificeerd en door adaptatie worden ze gemodificeerd op een fylogenetische tijdschaal.

De klassieke eerste stap van neuroreductie is een poging zinvolle gedragscomponenten te isoleren, zodat er 'harde' natuurwetenschappelijke studie van kan worden gemaakt. Het voorwerk ligt meestal in waarneming van diergedrag onder natuurlijke omstandigheden, de ethologie. Tinbergen vond bijvoorbeeld dat het jong van de zilverbreeuw bedelde in de richting van de snavel van de ouders. Op die gele snavel bevindt zich een rode vlek. De volgende stap is dan een soort exploratieve perceptiestudie. Wat is belangrijk in de situatie: de grootte van de rode vlek, het contrast, het kleurcontrast, de kleuren op zich, enzovoorts. Daarna kan men kritische factoren, zoals het contrast, kwantificeren in een psychofysische proef en kijken hoe vaak dieren gemiddeld bedede-

len per tijdseenheid (de respons) als functie van het contrast C (de stimulus).

Vervolgens kan men de psychofysische bevindingen in neurobiologische termen vertalen. Meet bijvoorbeeld met micro-elektroden in delen van de hersenen die dit contrast analyseren, en ga na of individuele cellen of neuronale netwerken de eigenschappen hebben die in de psychofysische proeven waren vastgesteld voor het gehele dier. Als dat zo is hebben we een substraat voor dit specifieke gedrag gevonden en kunnen we werken aan de vervolmaking van een theorie over dit gedrag in termen van een hersenprogramma. Daarmee is het gedrag neuroreductionistisch verklaard.

In de psychofysica leggen onderzoekers zich vrijwillig tenminste de volgende drie beperkingen op:

1. De psychofysica accepteert alleen kwantitatieve gegevens over extern observeerbaar en expliciet beschreven gedrag van een organisme. Het meetbare gedrag dient dan als eenduidige symbolische mededeling over de waarneming. Bijvoorbeeld naar rechts of naar links wijzen (met behulp van een knopdruk bij mensen of voedselbakkeuze bij andere dieren) in antwoord op de vraag of rechts of links meer licht te zien is, de beweging sneller is, de tint meer op rood lijkt, enzovoorts. Dit aanwijsgedrag kan dan gemeten worden als functie van een fysische parameter en met gerandomiseerde aanbidding. Mondelinge rapportage of getekende rapportage en dergelijke over hoe men de waarneming ervaart, zijn dus niet acceptabel als primaire evidentie voor of tegen enige psychofysische theorie.
2. Het waarnemend organisme (proefpersoon, proefdier) moet in principe vervangbaar zijn door 'vergelijkbare' soortgenoten. Omdat men soms met speciale, zeldzame waarnemers werkt, zoals iemand die alleen staafjesreceptoren in het netvlies heeft of iemand met een absoluut gehoor, hoeft het waarnemend organisme slechts *in principe* door een soortgenoot te kunnen worden vervangen. Bevindingen die niet op enig moment kunnen worden herhaald blijven echter gewantrouwd en mogen nooit als hoeksteen van een theorie worden gebruikt.
3. De fysische omstandigheden waaronder de proef is gedaan moeten in principe volledig gespecificeerd en reproduceerbaar

zijn. Ook hier ‘in principe’, omdat men experimenten in ruimtevaartuigen of op Mars niet ongeldig kan verklaren alleen omdat men het geld niet heeft ze te controleren. In zo’n geval kan men wel eisen dat de gegevens volledig controleerbaar zijn en automatisch op van tevoren overeengekomen wijze worden vastgelegd.

Een juiste keuze van het gedrag (de responsie), de kwantificering van dat gedrag, een juiste keuze van de proefpersoon of het proefdier (de waarnemer) en van de externe omstandigheden tijdens de proef (de stimulus) zijn dus kritisch in de psychofysica. Als de prestaties van de waarnemer in die omstandigheden op tijdstip t_1 niet reproduceerbaar zijn op een willekeurig ander tijdstip t_2 , dus kennelijk afhangen van een niet controleerbare ‘interne’ toestand, zijn de resultaten verdacht en moeten de verborgen factoren eerst boven water komen, wil men de proef accepteren. Proefpersoonafhankelijke variaties worden wel geaccepteerd, mits het slechts modulaties zijn op een algemeen, voor veel proefpersonen geldend patroon van resultaten. In de meeste psychofysische experimenten gaat het om een tweewaardige classificatie van prikkels, bijvoorbeeld ‘gezien’ of ‘niet-gezien’ (absolute drempelmeting), of ‘is links helderder dan rechts of niet’ (verschildrempelmeting). Het grote voordeel van zulke tweewaardige classificatiemetingen is dat men de waarnemer dwingt tot eenvoudig instrumentachtig gedrag, tot het gedrag van een zogenaamde detector. Als de waarnemer – zeg een getrainde aap bij wie electrodes zijn geïmplanteerd in de juiste delen van het zenuwstelsel – moet aangeven of een stimulus een sinusvormige contrastvariatie met de plaats vertoont of niet, werkt hij als sinusrasterdetector. Vaak is het goed mogelijk aan te geven wat een ideale detector (in het voorbeeld een ideale sinusrasterdetector) zou presteren en kan men de prestaties van het organisme dus ook daarmee vergelijken. Psychofysica, neuronale netwerksimulaties en ideale detectorstudies kunnen gezamenlijk de neuroreductie compleet maken in de zin van de ‘proximate’ factoren, oftewel een antwoord geven op de vraag *hoe* het werkt.

Neuroreductie van gedrag zoals sinusrasterdetectie is in principe eenvoudig. Als ergens in het visuele systeem een cel wordt gevonden die eenzelfde drempelgedrag vertoont voor sinusrasters, bijvoorbeeld als functie van de sinusfrequentie, dan is het gehele netwerk dat aan die cel voorafgaat, inclusief de cel zelf, vermoedelijk

verantwoordelijk voor de voorverwerking en de beslissing (detectie). Als onderdrukken van het vuren van die cel leidt tot het niet zien van de sinusrasters die de waarnemer eerst wel zag, ondersteunt dit de aanname dat het neuronale mechanisme van het classificatiegedrag gevonden is. De celactiviteit is dan kennelijk *noodzakelijk* voor de waarneming. Stimuleert men vervolgens de cel elektrisch zonder dat in de buitenwereld de visuele stimulus aanwezig is, en geeft de waarnemer aan dat de (niet-aanwezige) stimulus gezien wordt, dan is de celactiviteit dus ook *voldoende* voor die waarneming. Via neurobiologisch onderzoek kan vervolgens de gehele neuronale schakeling verder worden uitgedroogd en de beschrijving daarvan functioneert als neuroreductionistisch model.

Dit soort tweewaardige psychofysische experimenten maakt het haalbaar om neuroreductionistische theorieën te ontwikkelen. Veelal doet men uitgebreide psychofysische experimenten bij de mens en daarnaast neurobiologische experimenten met dezelfde stimuli bij andere dieren. Zo komt men dan indirect tot neuroreductionistische modellen van het menselijke waarnemen via de aanname dat de neuronale mechanismen dezelfde zijn. Het nadeel hiervan is dat men apart moet laten zien dat er voldoende overeenkomsten zijn tussen de mens en het gekozen proefdier om ze wat betreft het onderzochte gedrag te vergelijken. Het voordeel is dat de mens het gemakkelijkst te instrueren en motiveren dier is in psychofysische proeven en dat men zo ook redelijke hypothesen op kan stellen over de vermoedelijke perceptie van het dier dat voor de vergelijking is gekozen. (Zie de bespreking van analogiepostulaten in §2.2.3). Het is natuurlijk met wat meer moeite ook mogelijk psychofysische experimenten met allerlei dieren uit te voeren. Men leert ze dan eerst met behulp van conditionering de tweewaardige classificatie uit te voeren, en doet dan de proef waarin wordt nagegaan hoe goed ze dit nog kunnen (door de succeskans en de foutkans te meten), als het onderscheid tussen de twee prikkels meer en meer bemoeilijkt wordt.

Psychofysische metingen aan mens en dier hebben onafhankelijk van neuroreductie ook hun eigen intrinsieke nut, bijvoorbeeld om na te gaan onder welke belichtingsomstandigheden een bepaald organisme een bepaalde activiteit het beste uitvoert. Daarnaast kan men soms ook direct, dat wil zeggen zonder aanvullend neurobiologisch onderzoek, harde conclusies over onderliggende neurofysiologische processen trekken uit psychofysische experimenten.

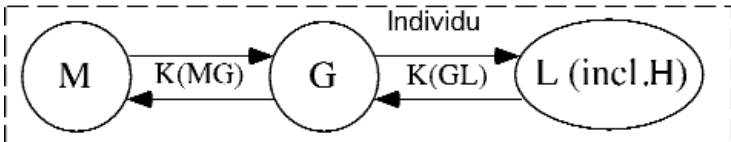
Als voorbeeld noem ik absolute lichtdrempelmetingen bij de mens (overzicht in Bouman e.a., 1985). Onder optimale omstandigheden kan men een zò klein aantal fotonen per flits geven om nog een 70% detectiekans te hebben (drempelcriterium), dat de kans dat er per flits meer dan 1 foton in enige receptor valt vrijwel 0 is. De dwingende conclusie uit dit soort onderzoek was dat staafjesreceptoren onder die omstandigheden (donkeradaptatie, kleine kortdurende flitsen van 510 nm aangeboden op zo'n 20 graden vanaf het fixatiepunt) als fototellers moeten functioneren. Gevoeliger kan een lichtdetector niet zijn. Later electrofysiologisch onderzoek toonde inderdaad aan dat ieder ingevangen lichtkwantum een zogenaamde kwantumrespons geeft. Dit type celgedrag was dus uit psychofysische (dus gedrags-)metingen al onweerlegbaar voorspeld!

2.2.3 Neuroreductie vereist koppelhypothesen en analogiepostulaten

Beschouw bij wijze van voorbeeld de volgende uitspraak: “De perceptie van ‘rood’ is het gevolg van activiteit van celgroep X in hersengebied Y ”. Deze uitspraak heeft de volgende algemene vorm, die we S_1 (statement 1) zullen noemen: *‘Mentale toestand M is het gevolg van activiteit in hersengebied Y ’*. Als mentale toestand M van volledig subjectieve aard is, kan het optreden van M door een externe waarnemer nooit met zekerheid worden vastgesteld en kan de uitspraak S_1 dus ook niet direct worden getoetst. Als M daarentegen op één of andere manier operationaliseerbaar is, bijvoorbeeld in termen van begeleidende meetbare lichamelijke processen L of gedrag G , kan men uitspraak S_1 zien als toetsbare hypothese, die voorspelt dat activiteit in hersengebied Y altijd gevolgd of begeleid zal worden door L of G , die we op hun beurt representatief achten voor M . Bijvoorbeeld als we een proefpersoon vragen op de linkerknop te drukken als iets er rood uitziet en in alle andere gevallen op de rechterknop, dan is dat gedrag G per definitie voor ons een indicator van het mentale proces ‘rood-waarneming’. We hebben de ervaring van het zien van iets roods geoperationaliseerd. De ervaring M (‘rood’) is geobjectiveerd door hem te koppelen aan gedrag G en zo waarneembaar gemaakt voor elke geïnformeerde externe waarnemer.

Daarmee kunnen we uitspraak S_1 zien als een neuroreductionistische hypothese, die zegt dat de ervaring ‘rood’, zoals door ons

vastgesteld aan gedrag G van de proefpersoon, voorafgegaan wordt door steeds eenzelfde hersenproces, namelijk activiteit in celgroep X in hersengebied Y . We kunnen vervolgens de fysische omstandigheden in de buitenwereld manipuleren, vaststellen welke omstandigheden leiden tot drukken van de linkerknop (rood) en zeggen dat die omstandigheden de ervaring 'rood' oproepen. Dit is een psychofysisch onderzoek. Vervolgens kunnen we de neuroreductionistische hypothese toetsen door na te gaan of de buitenwereldomstandigheden die leiden tot drukken op de linkerknop, ook (en iets eerder) leiden tot de bedoelde activiteit in hersengebied Y . Neuroreductie is dus (minimaal) een tweetrapsproces. Eerst stellen we per *koppelhypothese* $K(MG)$ het afgesproken of geconditioneerd gedrag G representatief voor het optreden van mentaal proces (ervaring) M . Als tweede trap trachten we dan gedrag G volledig te verklaren in termen van programma's in de hersenen H , die we zien als 'lichamelijke processen' (L). In feite houdt neuroreductie dus meestal in dat men een relatie legt tussen twee theorieën, waarvan de ene de relatie tussen M en G beschrijft (een psychologische theorie) en de andere de relatie tussen G en L (een neuro-ethologische of neurobiologische theorie). Figuur 4 vat dit idee symbolisch samen.



Figuur 4 M staat voor 'mentaal' proces en G voor gedrag. L staat voor lichamelijke processen, inclusief hersenprocessen of hersenprogramma's H en eventueel ook inclusief lussen door de omgeving ('actie-perceptie'-lussen, die pas later ter sprake komen). Koppelhypothese K postuleren een verband tussen de verschillende processen.

Het pragmatisch neuroreductionisme stelt nu dat het op den duur mogelijk is *alle* psychologische concepten en theorieën (die slaan op M , $K(MG)$ en G) te relateren aan fysiologische concepten en theorieën (die slaan op G , $K(GL)$ en L). Clark (1980) heeft betoogd dat neuroreductie precies dit is, het reduceren van (vertalen van) theorieën in het ene domein (psychologie) naar theorieën in het andere domein (fysiologie). Uiteraard is het achterliggende

idee dat alle fysiologische theorieën op hun beurt eenduidig gereleerd kunnen worden aan fysisch-chemische theorieën.

Er zijn ook sterkere neuroreductionistische claims dan hier geschetst, namelijk claims van ontologische aard. Ontologie is de leer van het zijnde, van dat wat 'is'. De meeste wetenschappers wensen zich niet met zijnsvragen bezig te houden. Toch doet men dat impliciet als men bijvoorbeeld stelt 'geluk is voldoende van die en die neurotransmitter in dat hersendeel'. Men formuleert dan een ontologische reductie van een mentale entiteit tot een fysisch-chemische entiteit. De basis van zo'n uitspraak is (als het geen slordig taalgebruik betreft) het idee dat er maar één soort processen bestaat, namelijk fysisch-chemische en dat alle concepten van de wetenschap dus uiteindelijk uitsluitend op die processen mogen slaan. Zulke sterke ontologisch-reductionistische claims noemt men 'eliminatie-reductionisme'. De aanhangers menen dat uiteindelijk alle psychologische of gedragstermen zullen of kunnen worden geëlimineerd, dat wil zeggen kunnen vervallen of kunnen worden vervangen door fysisch-chemische termen. Deze doctrine van eliminatie-reductionisme lijkt me nogal overspannen qua verwachtingspatroon en ik voel meer sympathie voor een pragmatische vorm van reductionisme zoals die van Clark, of zoals ik het eerder definieerde in termen van hersenprogramma's. Bovendien moet de reductie in de zin van Clark eerst lukken, willen sterkere (ontologische) claims veel zin hebben.

Voor personen die in twee soorten 'zijnden' geloven (dualisten), bijvoorbeeld geest en materie, is de pragmatische reductie meestal wel, de ontologische reductie zeker niet acceptabel. Ook voor gematigde holisten is neuroreductie in de pragmatische zin wel en in de ontologische zin niet acceptabel. Ik zie 'neuroreductie' vooral als een nader te onderzoeken en te ontwikkelen concept en neuroreductionisme als een onderzoek motiverende hypothese. Met mijn definitie van neuroreductie in termen van hersenprogramma's zijn natuurlijk begrippen geïmpliceerd die niet direct van fysisch-chemische aard zijn, zoals (bio-)informatie en doel. Of die begrippen uiteindelijk volledig elimineerbaar zijn, zoals eliminatie-reductionisten geloven, kan men volgens mij voorlopig rustig in het midden laten en zo een dogmatisch ontologisch standpunt omzeilen. We gebruiken, eventueel slechts voorlopig (als eliminatie-reductionisten gelijk blijken te hebben), enige begrippen die in de wetenschap gemeengoed zijn maar die niet als zuiver fysisch-chemische concepten opgevat (kunnen?) worden.

Onze eigen subjectieve ervaring leert ons dat bepaalde gemoedstoestanden samengaan met bepaalde lichamelijke uitingen en gedragstendenties. Bij woede kan dit bijvoorbeeld dreigen of aanvallen zijn of de voorbereiding daartoe en dit kan gepaard gaan met veranderingen van de doorbloeding, de huidweerstand, de hartfrequentie, de chemische samenstelling van het bloed, de hersenactiviteit, enzovoorts. Zodra we nu eenzelfde samenstel van kenmerken in gedrag en lichaamsprocessen van andere mensen of dieren waarnemen of meten, gaan we ervan uit dat er dezelfde gemoedstoestand bij hoort. Zo koppelen we mentale concepten en subjectieve ervaringen aan observeerbare of meetbare gedragskenmerken en lichaamsprocessen. Hoewel we de subjectieve ervaring niet direct kunnen meten, kunnen we de koppelhypothese hanteren dat het betreffende meetbare complex van uitingen en processen reproduceerbaar kenmerkend is voor eenzelfde ervaring. Hieraan kunnen we dan het analogiepostulaat verbinden dat deze koppeling voor alle individuen van dezelfde soort gelden (of voor vrijwel alle, de pathologische gevallen uitgezonderd).

Met 'koppelhypothese' bedoelt men in de literatuur meestal deze combinatie van (1) een individuspecifieke koppelhypothese, en (2) de analogiehypothese dat wat voor dit individu geldt ook voor soortgenoten geldt. Het gebruik van zulke soortspecifieke koppelhypothesen is de enige weg om subjectieve concepten natuurwetenschappelijk hanteerbaar te maken en er empirisch onderzoek aan te doen. Alleen via dit type koppelhypothesen kunnen we subjectieve ervaringen 'vertalen' naar objectieve verschijnselen, en bij het waarnemen van de objectieve verschijnselen bij een ander individu postuleren dat dit individu de bijbehorende subjectieve ervaringen moet hebben. In de meest eenvoudige vorm betreft de koppelhypothese slechts direct en zonder meetinstrumenten waarneembaar gedrag. Bijvoorbeeld voor de mens: boosheid geeft trillende handen, trillende stem en stroevere motoriek. In complexere vormen worden gerapporteerde ervaringen, bijvoorbeeld tijdens hersenoperaties aan wakkere patiënten, gekoppeld met gemeten activiteit van neuronale systemen. Bij een gedetailleerder uitwerking zien we dus dat er individuspecifieke en soortspecifieke koppelhypothesen denkbaar zijn, die subjectieve ervaring (mentale toestand of mentaal proces M) òf koppelen aan gedragsvariabelen (G), òf aan fysiologische variabelen (L), en we hebben al gezien dat dit van groot belang is bij neuroreductie, dat wil zeggen de vertaling van M -verschijnselen al of niet via G -verschijnselen in L -verschijnselen. Het geldig ver-

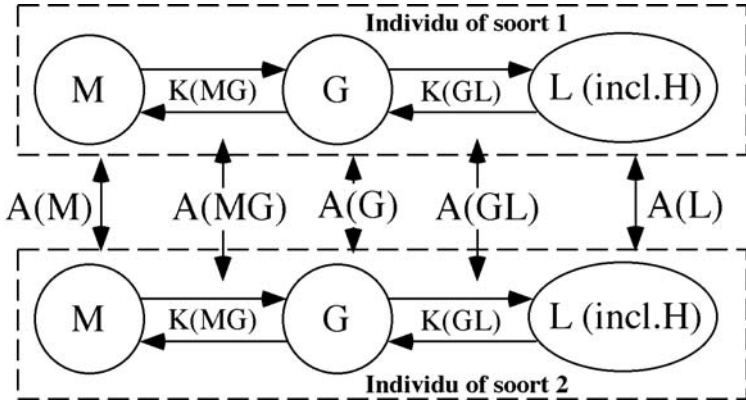
klaren van een bepaalde (soortspecifieke) koppelhypothese voor andere soorten dan waarvoor hij oorspronkelijk gold, is een interspecies analogiepostulaat (zie §1.1.1).

Zolang we koppelhypotheseën betrekken op individuen van eenzelfde soort is het idee, mits met zorg gehanteerd, redelijk bruikbaar gebleken. Moeilijker wordt het als een koppelhypothese via het interspecies analogiepostulaat wordt uitgebreid. Het interspecies analogiepostulaat stelt dat verschillende diersoorten bij analoge gedragingen en/of lichaamsprocessen analoge ervaringen hebben. Dat dit analogiepostulaat geen *algemeen* betrouwbaar uitgangspunt is volgt alleen al uit het bestaan van diersoort- of diergroepspecifieke processen. Denk maar aan echolocatie van vleermuizen, electroreceptie bij sommige vissoorten, enzovoorts. Er kan daarom hoogstens sprake zijn van een aantal analogiepostulaten die op *specifieke aspecten* van gedrag of fysiologie betrekking hebben. We moeten dus zuinig en kritisch omgaan met analogiepostulaten en koppelhypotheseën.

Als een soort leidraad bij de bovenstaande gedachten kan men het schema uit figuur 5 gebruiken, waarbij M weer staat voor een bepaald mentaal proces, bijvoorbeeld pijn lijden of denken. G staat voor een bepaald waarneembaar gedrag, waarvan we menen dat het bij M hoort, diagnostisch is voor het optreden van M . De letters L en H staan voor de lichamelijke processen en hersenprocessen die de basis vormen voor gedrag G . Onder L en H vallen hier gemakshalve alle processen op alle aggregatieniveaus: dat wil zeggen van het gehele lichaam en de hersenen via celgroepprocessen en cellulaire processen tot moleculaire processen. De twee omstippelde blokken staan voor individu 1 (boven) en individu 2 (onder) van een bepaalde soort als het om soortspecifieke (intraspecies) analogiepostulaten gaat of voor twee willekeurige 'typische' individuen van twee verschillende soorten als het om interspecies analogiepostulaten gaat.

Normaliter bedoelt men met de term 'analogiepostulaat' òf $A(MG)$ òf $A(GL)$, dat wil zeggen een analogie tussen één van de koppelrelaties in de ene soort met dezelfde koppelrelatie in de andere soort. In plaats van deze twee koppelhypotheseën $K(MG)$ en $K(GL)$ kan soms direct de relatie $K(ML)$ worden gelegd, die niet is ingetekend (bijvoorbeeld de relatie tussen schaamte en blozen) en dan kan een analogie tussen die koppelrelaties worden gezocht of gepostuleerd. De vergelijkende fysiologie houdt zich in principe met al deze A -relaties bezig, waarbij we dan wel het algemene

‘losse’ begrip analogie uit het bovenstaande moeten vervangen door ‘homologie of analogie’. Als er overeenkomsten tussen diersoorten zijn in structuur en gedrag tengevolge van afstammingsrelaties heet dat een ‘homologie’ en als het een gevolg is van convergente evolutie heet het een ‘analogie’.



Figuur 5 Symbolische voorstelling van het idee dat – naast koppelhypothesen die mentale processen M , gedrag G en lichamelijke processen L (inclusief hersenprocessen en hersenprogramma's) met elkaar in verband brengen (zie figuur 4) – ook analogiepostulaten nodig zijn. $A(M)$ bijvoorbeeld formuleert een analogie in mentale processen tussen individu 1 en individu 2 als het om een soortspecifieke analogie gaat of een analogie in M tussen soort 1 en soort 2 als het een interspecies analogie betreft. Op alle aangegeven niveaus kan men analogiehypothesen postuleren.

In feite zouden we aan de symbolen M , G en L een index i moeten geven, ervan uitgaand dat het geheel van mentale processen, gedragingen en lichaamsprocessen van een diersoort ontbonden kan worden in factoren M_i , G_i en L_i en we voor die factoren afzonderlijk tot reducties, dat wil zeggen K_i -relaties kunnen komen. De analogiepostulaten stellen we dan voor die afzonderlijke componenten afzonderlijk op. We zouden dat bijvoorbeeld kunnen willen doen voor pijn, voor bewegingszien, voor verliefdheid, enzovoorts. De vraag is echter of dat wel mogelijk is. Kan men mentale processen en/of gedragsprocessen en/of lichamelijke processen (tot op moleculair niveau) wel zinvol in corresponderende brokjes onderverdelen? Dit vraagstuk heet wel het ‘decom-

positieprobleem' en het is uiteraard van groot belang voor het opstellen van wetenschappelijk verantwoorde koppelhypothesen en analogiepostulaten.

Al met al zal wel duidelijk zijn dat dit onderzoeksgebied van de neuroreductie zulke complexe vraagstukken omvat, dat het nogal onbezonnen lijkt om er a priori een mening over te verkondigen, zoals vele filosofen en neurowetenschappers. Ik denk in de eerste plaats aan eliminatie-reductionisme (zie hoofdstuk 4), maar ook het omgekeerde dogma, het antireductionistische standpunt, lijkt me volledig ongefundeerd. De wetenschapper die liever niet van een dogma uitgaat, kan gewoon kijken hoever hij met de poging tot neuroreductie komt, en of de eventuele grenzen en struikelblokken in kaart gebracht kunnen worden. Dat zie ik als pragmatisch neuroreductionisme, een onderzoeksstrategie die onze kennis over gedrag en zenuwstelsel kan verrijken.

3 Waarneming en natuurlijke intelligentie

3.1 Het perceptieprobleem

3.1.1 *Rationalisme versus empirisme als basis voor perceptietheorieën*

Het uitgangspunt dat de rede (ratio) de enige betrouwbare bron van kennis zou zijn noemt men in de epistemologie het rationalisme. Dit rationalisme was lange tijd dominant in het Westerse denken vanaf het werk van Parmenides, Socrates en Plato, die benadrukten dat de ervaring (empirie) zeer bedriegelijk is, denk maar aan illusies en hallucinaties. Deze dominantie kwam onder andere tot uitdrukking in een sterke nadruk op de niet-empirische wetenschappen, zoals filosofie, logica en wiskunde. In West-Europa kwam het rationalisme in de 17e eeuw tot grote bloei dankzij het werk van Descartes, Leibniz en Spinoza. Zij namen aan dat alle kennis – dus ook kennis over de buitenwereld – door zuiver denken uit slechts enkele grondstellingen, de aangeboren ideeën (Descartes' *ideae innatae*), kon worden afgeleid. Ze waren door dit uitgangspunt vrijwel gedwongen aan te nemen dat ook de wereld buiten de geest opgebouwd zou zijn volgens de regels van de logica en meetkunde.

Onder invloed van de successen van natuurwetenschappelijke onderzoekers als Copernicus, Kepler, Galilei en later Newton, van Leeuwenhoek, Huygens, Boyle en vele anderen kreeg empirisch onderzoek van de natuur steeds meer aanzien in kringen van geleerden en technici. Buiten de wereld van geleerden heeft de waarneming, de ervaring of empirie, altijd een grote rol gespeeld. Het is de basis van het zogenaamde naïef realisme, de aanname dat er een werkelijkheid is waarover we door waarneming en meten alles te weten kunnen komen. De Romeinse dichter en denker Lucretius (ca. 99-55 v.C.) stelde al de retorische vraag: “Wat geeft zekerder kennis dan de zintuigen?” Volkswijsheden als ‘zien is geloven’ en de grote rol van oor- en ooggetuigen in de rechtspraak suggereren groot vertrouwen in de waarneming, ondanks de

scepsis van rationalistische denkers.

Vooraf in reactie op het werk van Descartes (1596-1650), Spinoza (1632-1677) en Leibniz (1646-1716) baseerden de Engelse empiristische filosofen Locke (1632-1705), Berkeley (1685-1753) en Hume (1711-1776) hun epistemologie geheel op de empirie, dat wil zeggen op de ervaring en waarneming. Dit klassieke empirisme gaat ervan uit dat alle kennis *uitsluitend* op de zintuigelijke ervaring (empirie) berust en dat de mens als ‘tabula rasa’ (schone lei) geboren wordt. Voor de empiristen werd daardoor het onderzoek van de zintuigen en de perceptie de kern of in elk geval het beginpunt van elk zinvol onderzoek aan het denken.

Niet alleen de meningen over het ontstaan van kennis stonden bij rationalisme en empirisme tegenover elkaar, maar ook die over het waarheidsgehalte of de betrouwbaarheid van verschillende soorten kennis. Zuiver denken levert zuivere kennis, waarneming is bedriegelijk, vonden de rationalisten. Locke stelde er het omgekeerde tegenover: zuivere waarneming is betrouwbaar en denken bedriegelijk. Volgens Locke zijn elementaire gewaarwordingen (sensaties) en elementaire waarnemingen (percepties) de enige elementen van onze kennis. Toch ging hij ervan uit dat deze elementen in het geheugen werden opgeborgen en dat de opbouw van de kennis (ideeën) uit die elementen geschiedde door ‘logische verwerking’. Er was dus strikt genomen sprake van een soort aangeboren verwerkingsprincipes en een aangeboren zelforganiserend geheugen, dat wil zeggen van enige aangeboren denkprocessen. De empiristen trachtten deze a-priorische denkprocessen tot een minimum te beperken. Associatie was volgens Locke het enige of het voornaamste ingebouwde verwerkingsproces voor de ordening van waarnemingsgegevens. Hume was sterk geïnteresseerd in het begrip causaliteit (oorzakelijkheid) en stelde dat dit begrip ontstaat door associatie van samen of praktisch samen optredende gebeurtenissen (denk aan de discussie over bijgeloof en coïncidentie in §1.4.5 en §2.1.2.) Hij beschouwde kennis als het aggregaat van door associatie verbonden geheugensporen van elementaire zintuigelijke ervaringen.

In aansluiting hierop benadrukte J.S. Mill (1806-1873) een eeuw later dat ook de logische wetten zelf, die voor de verwerking van gewaarwordingen tot ideeën zorgen, uit de waarneming zouden ontstaan. Alle kennis en daarmee ook verwachtingen over mogelijke toekomstige gebeurtenissen worden door associatie opge-

bouwd. Daarbij ontdekt de waarnemer dat gegevens van de verschillende zintuigsystemen samenhang vertonen (intersensorische associatie.) Bijvoorbeeld een steen voelt hard aan, heeft gewicht, bepaalde visuele kenmerken enzovoorts. Als we deze gegevens eenmaal door associatie bijeen hebben gebracht in het concept steen, zullen we telkens wanneer we een steen zien deze visuele ervaring associëren met hardheid, gewicht, enzovoorts. Op deze wijze zou volgens Mill het idee van onafhankelijk van ons bestaande externe objecten ontstaan. Objectwaarneming is als het ware een associatieketen van elementaire zintuigelijke inhouden.

Het uitgangspunt van dit type empiristische theorieën over de waarneming noemt men wel ‘elementarisme’ omdat sensorische elementen als primair worden gezien. In dit verband is men ook begonnen de term gewaarwording te gebruiken voor een elementaire zintuigelijke indruk. Men stelde zich voor dat complexe waarnemingen als het ware bundels elementaire gewaarwordingen zijn. De gewaarwordingen zouden dan steeds nog onverwerkt zijn en aan een bepaalde ‘modaliteit’ gekoppeld, bijvoorbeeld zien of horen, terwijl de waarneming ook multimodaal kan zijn en gekleurd door emotionele en cognitieve aspecten. Vervolgens dook binnen het empirisme het probleem op of de waarneming nu direct of indirect is. Op de directe-perceptietheorie gaan we later in dit hoofdstuk nader in, zodat ik hier kan volstaan met een korte schets van de principes waarop indirecte-perceptietheorieën gebaseerd zijn.

Een object reflecteert bijvoorbeeld licht, maar van al het gereflecteerde licht bereikt natuurlijk maar een deel ons visuele zintuig. Dat zintuig kan bovendien niet alle lichtinformatie opnemen. Zo wordt ultraviolet licht uitgefilterd, zijn er verliezen in de oogmedia, en slaan in de receptoren niet alle lichtdeeltjes ook pigmentmoleculen aan. Bovendien kan het object gedeeltelijk afgedekt zijn door een ander object, het kan gedeeltelijk in de schaduw staan, in een ongunstige, nooit eerder voorgekomen stand staan ten opzichte van de waarnemer, enzovoorts. Het zien van het betreffende object begint dus als het ware met zeer onvolledige, of soms zelfs misleidende informatie, de ‘sense data’ of zintuigelijke meetwaarden. Op grond van die gebrekkige gegevens moet het visuele systeem besluiten of het object bijvoorbeeld een boom is of een mens, of het groot is of klein, dichtbij staat of ver weg. Von Helmholtz (1821-1894) nam daarom aan dat de waarneming nog een proces van ‘onbewuste gevolgtrekkingen’ omvat, waarbij de

sense data worden geïnterpreteerd, betekenis krijgen. De buitenwereld levert aanwijzingen ('cues') als sense data aan de zintuigen en de onbewuste gevolgtrekking leidt vervolgens tot een waarneming. Illusies zijn dan heel begrijpelijk het gevolg van verkeerde aanwijzingen of van verkeerde gevolgtrekkingen, dus òf te wijten aan de stimuluseigenschappen òf aan de hersenprocessen die de sense data omvormen tot een waarneming. In de waarnemingspsychologie noemde men het buitenwereldobject dan wel de 'distale stimulus' en de sense data de 'proximale stimulus' om het verschil expliciet te maken. Men noemt dit indirecte-perceptietheorieën, omdat de sense data en onbewuste gevolgtrekking intermediairen, een tussenstap zijn, tussen het buitenwereldobject en de waarneming daarvan. We nemen volgens zulke theorieën niet direct de objecten waar, maar baseren ons op de sense data en bijbehorende elementaire gewaarwordingen.

Een probleem met dit type theorieën is dat er een soort homunculus voor de waarneming nodig is, die ergens intern in het brein de binnenkomende aanwijzingen combineert tot een goede gok over het object. De homunculus kijkt dan niet naar de buitenwereld, maar naar de sense data of een bewerkte representatie ergens intern in het systeem en baseert daarop de waarneming. In hoofdstuk 4 zal ik de problemen die het gevolg zijn van zo'n soort model nader bespreken. De onbewuste gevolgtrekking die von Helmholtz postuleerde moet natuurlijk op al bestaande kennis gebaseerd zijn, en die kennis kan na de geboorte vergaard worden uit associatieve combinatie van gewaarwordingen, zoals Locke e.a. voorstelden. Associatie is dan een elementaire vorm van onbewuste gevolgtrekking. De echte empirist gaat uit van het schon-lei principe, dus staat geen aangeboren kennis toe en dus evenmin aangeboren onbewuste gevolgtrekkingen, behalve een elementaire vorm van associatie.

Een belangrijke reden om aandacht te besteden aan deze historische zaken is dat velen ook tegenwoordig nog impliciet of expliciet uitgaan van de beschreven epistemologische doctrines. De ideeën van Hume en Mill zijn later in de psychologie overgenomen in de zogenaamde associatietheorie, waarin het begrip associatie als algemeen verklaringprincipe van denken en voelen werd gehanteerd. In de neuroanatomie noemde men de gebieden van de cortex waar men vermoedde dat de informatie van verschillende zintuigsystemen werd gecombineerd associatiegebieden. Er wordt nog steeds onderzoek gedaan aan associatief geheue-

gen, zowel in de psychologie als in de computertechniek. Wel is men langzamerhand een bredere opvatting gaan hanteren over wat onder associatie moet of mag worden verstaan en over de aard van de elementen die geassocieerd worden. De onbewuste gevolgtrekkingen van von Helmholtz vormen nog steeds het uitgangspunt van veel perceptieonderzoekers (zie bijvoorbeeld Rock, 1987). In machinezien gaat men ook uit van een model met na elkaar een receptorlaag, één of meer verwerkingslagen en ten slotte een gevolgtrekkingsstelsel dat de scène interpreteert. De kenmerkende opvattingen van het empirisme zijn dus: ieder dier begint met een schone lei bij de geboorte, alle kennis ontstaat postnataal uit de waarneming, de waarneming begint met elementaire 'shots of energy' en de bijbehorende elementaire geïmpreteringen, uit deze elementen wordt door associatie en eventueel andere onbewuste gevolgtrekkingen een waarneming gedestilleerd.

Eén van de problemen van het empirisme en de associatieleer is dat het leerproces zo sterk gebonden moet zijn aan de toevallige zintuiglijke ervaringen van een individu, dat het moeilijk te begrijpen lijkt dat overeenstemming tussen personen kan ontstaan over zaken als logische wetten, wiskunde en dergelijke. Ook werd door tegenstanders naar voren gebracht dat het empirisme moeilijk kan verklaren, waarom onze kennis zo vaak toereikend is in geheel nieuwe situaties. Hier herkende men spoedig de algemene vraag naar de relatie tussen waarneming en werkelijkheid. Zijn we het zo vaak eens over allerlei zaken, omdat er een onveranderlijke werkelijkheid is waarvan we allen via de waarneming kennis opdoen? Als je daarvan uitgaat, hoe komt het dan dat we zelfs allerlei waarnemingsillusies gemeenschappelijk hebben, dat wil zeggen waarnemingen die op incomplete informatie en dienengevolge verkeerde gevolgtrekkingen berusten?

Kunnen we kennis hebben die we niet eerst hebben waargenomen? Zo ja, hoe verhoudt die aangeboren kennis zich dan tot wat men later bijleert via waarneming? Hoe kan nieuwe kennis uit waarnemingen worden opgebouwd en hoe komt het dat verschillende individuen met verschillende ervaringen (waarnemingen) het toch over allerlei zaken eens kunnen worden? Hoe ontstaan abstracte concepten, dat wil zeggen concepten die niet direct op waarneming lijken te berusten? Hoe betrouwbaar is de waarneming of het proces van kennisopbouw uit de waarneming? Als we alleen onvolledige aanwijzingen over de werkelijkheid krijgen is de werkelijkheid dan niet in feite onkenbaar?

Veel van dit soort vragen en de bijbehorende terminologische subtiliteiten hebben op het feitelijke onderzoek aan de waarneming relatief weinig invloed. Het onderscheid tussen proximale en distale stimulus of tussen de gewaarwording (de sensatie) en de waarneming (het percept) zal ik vermijden. Ze dragen niet aantoonbaar bij tot helderheid in het onderzoek. Ik noem daarom alles wat er aan innerlijke roerselen ontstaat tengevolge van buitenwereldprocessen die de sensorische systemen (zintuigsystemen) activeren, ‘perceptie’ of ‘waarneming’ (ik beschouw deze begrippen als synoniemen). We zouden de sensorische systemen in principe net zo goed of zelfs beter ‘perceptiesystemen’ kunnen noemen (Gibson, 1966), maar bij de term ‘sensorisch systeem’ denk ik meer aan de anatomische en fysiologische aspecten, bij ‘perceptiesysteem’ meer aan de psychologische en epistemologische aspecten van de waarneming. Het woord zintuigstelsel zal ik vermijden, omdat het voor de meeste mensen het bestaan van een orgaan, een zintuig, suggereert. Er zijn echter zinnen (sensorische systemen) zonder aanwijsbaar ‘orgaan’ of ‘zintuig’ en het is dan ook onzin om te menen dat we slechts vijf zintuigen (die met organen corresponderen) zouden hebben. Ik zal dit in de volgende paragraaf nog toelichten.

3.1.2 *Sensorische systemen als perceptiesystemen*

Sensorische systemen zijn meetsystemen in dienst van het overleven, gezond blijven en voortplanten van organismen. Ze bemeten en interpreteren vele soorten fysisch-chemische processen in en buiten het lichaam. Als we naar het hele dierenrijk kijken zien we bijzonder veel soorten sensorische systemen. Er zijn dieren met sensorische systemen voor het direct meten en interpreteren van elektrische of magnetische velden. Er zijn dieren die de polarisatiegraad van het licht kunnen gebruiken voor navigatie of ultraviolet licht kunnen zien, dieren die luchtdrukgevoeligheid vertonen, infrageluid of ultrageluid kunnen horen, enzovoorts.

Het woord sensor heeft tegenwoordig vaak de betekenis van ‘transducer’ (‘transducer’), iets wat energievorm A omzet in energievorm B. Dat is echter slechts één aspect van sensorische systemen. De receptorlagen, dat zijn de lagen van cellen die het contact tussen buitenwereld en zenuwstelsel onderhouden, dragen zorg voor dit aspect. Dit sensordeel van de sensorische systemen wordt gevolgd door wat wel het voorkantsysteem (‘front-

end') wordt genoemd. Zo'n voorkantsysteem lijkt elementaire bewerkingen uit te voeren, gaat vooraf aan en is dus gemeenschappelijk voor een groot aantal, vaak parallel werkende, gespecialiseerde cortexgebiedjes. De cortex of hersenschors, is heel belangrijk gebleken voor de waarneming van de buitenwereldstandigheden waarover de voorkant, het sensorische systeem, informatie vergaart. Het voorkantsysteem bepaalt natuurlijk al mede wat waarneembaar is en wat niet. Het zin geven ('waarnemen') is daar al begonnen en het is niet goed mogelijk een principiële scheiding tussen dit voorkantsysteem en de rest van een perceptiesysteem aan te geven. Het concept 'front-end' (voorkant) heeft dus alleen heuristische en/of anatomische waarde.

We hebben gezien hoe empiristen ervan uitgaan dat alle kennis vergaard wordt via de zintuigen. Dit verklaart het gebruik van het woord zin voor allerlei denkprocessen en emoties. (Dit heeft geen zin, de zin van het leven, zingeven, ik begrijp de zin hiervan niet.) 'Zin' in engere *zin* (betekenis) wordt gedefinieerd als het vermogen om waar te nemen. Men noemt dan vaak de vijf zinnen: gezicht, gevoel, gehoor, reuk en smaak en spreekt over de 'zesde zin' als er op geheime, wellicht bovennatuurlijke, toegang tot de wereld wordt *gezinspeeld*. Wanneer voor een bepaalde zin de receptoren bijeen liggen in een herkenbaar orgaan spreekt men over 'zintuig' ('tuig' betekent dan ongeveer 'machine'), zoals oog, oor, evenwichtsorgaan, zijlijnorgaan, reukorgaan, tastorgaan, smaakorgaan. Een probleem bij de opsomming van zinnen of zintuigen is dat ze soms benoemd worden naar de informatiedrager waarop ze zijn afgestemd (lichtzin), soms naar de fysische variabele die ze bemeten (versnellingszin, rotatiezin, zwaartekrachtzin), in andere gevallen naar de ervaring die ze bij de mens oproepen (pijnzin, hongerzin), de ligging van de receptorcellen (huidzintuig, oog), of het kennelijke doel van het systeem (evenwichtsin). Dit alles is zeer verwarrend.

De spreektaal houdt al helemaal geen rekening met waarnemingsystemen die de geïntegreerde activiteit van diverse typen receptoren en grote delen van het motorisch systeem vereisen, zoals het haptische systeem. Voor dit technische begrip haptisch uit de waarnemingspsychologie is geen correct spreektaalwoord beschikbaar. Het dichtst in de buurt komen: 'de tast betreffende', tactiel, en tast-(systeem). Het bezwaar van het gebruik van 'tast-' is dat de tastreceptoren weliswaar meedoen bij haptische exploratie, maar ook de diepe-drukreceptoren, de gewrichtsreceptoren,

de temperatuurreceptoren, de tactiele bewegingsreceptoren, de spierspoeltjes en zelfs haarcellen spelen soms een rol. Haptisch komt van het Griekse ‘haptoo’, wat vastmaken, aanvatten, beroeren betekent. Wanneer men actief de vorm van een object op de tast analyseert, gebruikt men dus het zogenaamde haptische systeem dat informatie integreert van diverse soorten huidreceptoren, spier- en gewrichtsreceptoren en motorcommando’s. Boetseren en fysiotherapie vereisen een goed haptisch systeem voor het metend sturen van de tastende interactie met de omgeving. Wat voor de haptiek geldt, geldt natuurlijk ook voor andere sensorische, of eigenlijk dus ‘sensorimotor’-systemen. Voor het zien bijvoorbeeld zijn oogbewegingen, hoofdbewegingen en dergelijke even belangrijk als de receptoractiviteit in het netvlies. Om al deze redenen heb ik een voorkeur voor het woord ‘waarnemings-systemen’.

We hebben dus veel meer dan de klassieke vijf waarnemings-systemen, denk maar aan het juist beschreven haptisch systeem, aan de temperatuurzin, pijnzin, hongerezin, tijdzin. De woorden zintuig of zintuigstelsel zullen uit slordigheid of voor de variatie wel eens worden gebruikt, maar ze zijn zoals aangegeven nogal verwarrend, onder andere omdat de waarnemingsystemen die ons eigenlijk interesseren, geen precies afgegrensde organen zijn. Waarnemingsystemen bestaan niet alleen uit veel celkernen en cellagen die op vrij complexe wijze over de hersenen zijn verdeeld, maar ze omvatten daarnaast ook de sturing van activiteiten die voor de waarneming nodig zijn en van de daarbij horende lichaamsdelen, de emotionele en cognitieve inkleuring, enzovoorts. De biologische functie van sensorische systemen is waarnemen. Soms beperkt men de betekenis van de term waarnemen tot die sensorische processen waarvan we ons bewust zijn, maar dat levert weer problemen bij uitspraken over het waarnemen door platwormen of kwallen. Hier gebruik ik dus de term waarnemen zowel voor bewuste als niet-bewuste processen en stel de volgende definitie voor:

Waarnemen is het meten van gegevens over gebeurtenissen en processen in en buiten het lichaam die voor overleven, lichamelijke integriteit en voortplanting van belang kunnen zijn, en het in een voor het zenuwstelsel bruikbare vorm coderen en interpreteren van deze meetgegevens.

Met ‘in bruikbare vorm coderen’ bedoelen we dus eigenlijk al ‘zin’ geven, oftewel als informatie opvatten. We zullen nog argumenteren dat het beter is te stellen dat waarnemingssystemen voor omgevingsinformatie en zelfkennis zorgen, dan dat ze fysisch-chemische processen bemeten. Als we dat doen, moeten we echter wel aangeven wat we met informatie bedoelen. Een universitaire reorganisatietienota is voor een konijn geen ‘informatie’, maar ruis, dat wil zeggen betekenisloze fysische structuur. In het midden latend voor welke mensen het bedoelde type teksten ‘informatie’ bevat, kunnen we uit dit voorbeeld al concluderen dat een fysisch-chemische structuur of dito proces slechts ‘informatie’ is voor een bepaald systeem, voorzover het bruikbaar is voor de doelstellingen van dat systeem.

Daarnaast moet het bedoelde organisme de structuur kunnen herkennen, het organisme moet over erop afgestemde neuronale analysesystemen beschikken. Het is niet voldoende de structuur fysisch te kunnen bemeten. Als we de hond een briefje voorhouden waarop staat ‘je eten staat in de keuken’ dan kan de hond de vormen van de letters visueel wellicht onderscheiden en de gegevens op het briefje zouden bruikbaar kunnen zijn in het kader van zijn doelstellingen, maar de hond heeft geen neuronale netwerken die de tekst kunnen interpreteren. De hond neemt de boodschap niet waar, de fysische structuur van het briefje en de tekens erop wel. Met ‘waarnemen’, het gebruik van sensorische systemen ten behoeve van de doelstellingen van het organisme, bedoelen we dus het opnemen van de ‘informatie’ uit de betreffende fysisch-chemische structuren. Deze structuren dienen het juiste ‘format’ te hebben, om het in computerjargon te zeggen. Het zenuwstelsel moet de vorm kunnen interpreteren, de samenhang in de fysisch-chemische structuur in plaats van alleen de elementen. We komen zo tot de nog wat vage omschrijving dat een ruimte-tijdproces waar een organisme gevoelig voor is ‘informatie’ kan bevatten of overdragen, voorzover het organisme de samenhangen (patronen) in dat proces kan herkennen en kan relateren aan de eigen doelstellingen.

Informatie wordt gedragen door een fysische structuur die niet volledig ordeloos is, maar ‘patroon’ heeft. Dit patroon moet herkenbaar, interpreteerbaar zijn, wil het organisme er iets mee kunnen doen, wil het iets anders zijn dan ruis. Informatie is een geheel van ecologisch valide adaptieve meetgegevens. Gekoppeld aan de meetsystemen (sensoren) dienen er dus zingevende neuronale

netwerken te zijn geëvolueerd, die zijn afgestemd op de patronen, de globale samenhangen in de sensorgegevens. Deze interpretatiesystemen voor patronen koppelen het organisme aan de habitat en bij die koppeling speelt exploratieve beweging (motoriek) steeds mede een rol. Een vraag is dan of en hoeveel van die interpretatiesystemen voor patronen zijn aangeboren. Wat niet is aangeboren moet worden opgebouwd uit ervaring, een proces dat al direct wonderbaarlijk lijkt. Immers hoe bouwen we het concept fruit op uit de waarneming van appels, peren, pruimen, enzovoorts? Hoe kunnen onze perceptiesystemen zonder leraar uit zichzelf categoriseren? Herkennen van een object (appel) als lid van een klasse van (eetbare) objecten vereist het idee van de klasse (fruit). Maar, het idee van de klasse vereist eerst het idee dat ieder object een potentieel lid is van één of andere klasse, dus aangeboren mechanismen voor classificeren. De categorisatie van de wereld in equivalentieklassen is de zingevende functie van de perceptie en een kernprobleem van epistemologie en perceptietheorieën.

3.1.3 Empirisme versus nativisme en het begin van een synthese

Empiristen moesten nadenken over het probleem hoe uit de toevallige reeks van persoonlijke waarnemingen algemeen geldige kennis kan ontstaan. Wat zijn de ordeningsprincipes en de principes voor het leggen van relaties tussen waarnemingselementen; is associatie voldoende? Hoe werkt associatie precies? Hoe kan er nieuwe kennis ontstaan uit ‘oude’ elementen van vroegere ervaringen? J.S. Mill vergeleek associatie van elementen tot nieuwe eenheden, ideeën, met het ontstaan van nieuwe chemische verbindingen, moleculen uit samenvoeging van perceptieatomen, de sense data. Deze analogie of metafoor maakt duidelijk dat hij onder associatie meer verstond dan simpele aggregatie (bijeenvoeging) van op zich onveranderde elementen. Hij dacht kennelijk aan reacties en het ontstaan van nieuwe elementen met emergente eigenschappen, dat wil zeggen eigenschappen die geen van de samenstellende delen hebben. Mogelijk dacht Mill zelfs aan algemene wetmatigheden voor de combinatie van elementen, aan randvoorwaarden en enzymen.

Associatie is in dat geval toch nog een ingewikkeld proces, een aangeboren informatieverwerkingsproces. De lei zou wat concrete waarnemingen en sense data betreft weliswaar ‘schoon’ zijn bij

de geboorte, maar de hersenen zouden toch een complex start-programma moeten omvatten om de ervaringskennis binnen te halen en te ordenen. Dat lijkt al veel minder op een eenvoudige schone lei. Mill concludeerde uit de chemiemetafoor dat de introspectie, het beschouwen van eenmaal gevormde kennismoleculen, ons niets kan leren over de opbouwelementen, die er immers op onherkenbare wijze in moeten zijn opgegaan als atomen in een molecuul. We kunnen dus concluderen dat doordenken op het empirisme tot enige afzwakking leidt en het mogelijk nodig maakt enkele aangeboren denkprocessen te accepteren, zoals associatie en onthouden. Toch lag de nadruk bij empiristen op het idee van de schone lei, de afwezigheid van data bij het begin van het leven, voorafgaand aan de ervaring.

Wanneer men ervan uitgaat dat door denken alleen, ongeacht de ervaring, kennis over de wereld kan worden verkregen (rationalisme), dan ligt het voor de hand aan te nemen dat deze kennis aangeboren is. Rationalisme leidde zo tot nativisme, de stelling dat de meeste of de essentiële kennis aangeboren is. De rationalist kan er dan van uitgaan dat denken ertoe leidt dat men zich van deze aangeboren kennis bewust wordt. Zo zou het concept vierkant aangeboren kunnen zijn, maar pas na reflectie op de vele voorbeelden die men heeft waargenomen, als concept 'op kunnen duiken' uit de aangeboren voorraadkamer van kennis. De discussie over rationalisme versus empirisme werd zo door velen verlegd naar de tegenstelling nativisme-empirisme, aangeboren versus verworven, 'nature' versus 'nurture'.

Immanuel Kant (1724-1804) ontwikkelde, na zich aanvankelijk tot rationalisme aangetrokken te hebben gevoeld, mede onder invloed van het werk van empirist Hume, een mengvorm van rationalisme en empirisme. Zo noemde hij alle kennis of denkprincipes die vooraf lijken te gaan aan de ervaring en er ook min of meer onafhankelijk van zijn, *a priori* kennis. De niet geheel zekere kennis, zoals die uit de ervaring voortkomt, noemde hij *a posteriori*. Daarnaast maakte Kant een onderscheid tussen *synthetische oordelen*, nieuwe begrippen en ideeën die uit samenvoegen van elementen kunnen ontstaan, en *analytische oordelen*, die alleen een begrip of idee nader analyseren of toelichten. Volgens Kant zijn ruimte en tijd bijvoorbeeld *a priori* begrippen. Het zijn geen eigenschappen der dingen, maar ordeningsprincipes, vormen van de aanschouwing. Kant's *a priori* begrippen zijn als het ware de

aangeboren en onveranderlijke, van ervaring onafhankelijke, denkprincipes. In hoeverre en voor welke dieren deze principes ook – behalve voor de mens – zouden gelden, is in de filosofische literatuur hierover niet altijd even duidelijk. In elk geval acht Kant om het menselijk denken te begrijpen de volgende a priori begrippen nodig en voldoende:

- *kwantitatieve categorieën*: eenheid, veelheid, alheid;
- *kwalitatieve categorieën*: realiteit, ontkenning, beperking;
- *relatiecategorieën*: substantie, oorzakelijkheid, wisselwerking;
- *modaliteitscategorieën*: mogelijkheid, werkelijkheid, noodzakelijkheid.

Wat men ook van de details vindt, het is zonder meer een goed idee gebleken te trachten tot een synthese van empirisme en rationalisme te komen. Althans, dat suggereren de moderne inzichten uit neurowetenschappelijk en gedragsonderzoek. Voor het tot een begin van een moderne synthese tussen nativisme en empirisme kwam (die zeker nog niet geheel is afgerond), is er ondanks Kant's populariteit onder Duitse wetenschappers juist in Duitsland veel strijd tussen de twee scholen geweest. (In de Angelsaksische landen overheerste het empirisme.) Dat ruimtelijk inzicht een a priori categorie van het denken is werd in de vorige eeuw sterk verdedigd door de bekende fysiologen J. Müller en E. Hering. Von Helmholtz en Lotze daarentegen bestreden deze nativistische opvattingen. Zij waren van mening dat alle toen bekende aanwijzingen over aangeboren ruimtezin ook volledig verklaarbaar waren in termen van het empirisme. Zowel Ewald Hering (1834-1918) de nativist, als Hermann von Helmholtz (1821-1894) de empirist hadden in Duitsland en ver daarbuiten grote aanhang en prestige. Ze werden en worden beschouwd als de belangrijkste waarnemingsonderzoekers van de 19e en vroeg 20e eeuw. Hun invloeden zijn ook in het moderne onderzoek nog op veel plaatsen merkbaar en hun publicaties worden nog uitgebreid gelezen en geciteerd. Voor een boeiende beschrijving van hun werk, de schoolvorming, het werk van de volgelingen en vooral de bittere strijd tussen Hering en Von Helmholtz zelf, beveel ik Turner (1994) aan. Op de Hering-Helmholtz controverse ga ik hier niet nader in.

Empiristen als Von Helmholtz wezen er bijvoorbeeld op dat blindgeborenen die op een later tijdstip in hun leven dankzij een cataractoperatie het gezichtsvermogen terugkregen, een zeer moeizaam leerproces moesten ondergaan om enigszins te leren

zien. Sommigen leerden het nooit meer. Dit is gerelateerd aan een klassiek probleem, het zogenaamde probleem van Molyneux, waarover zo meer. Tegenwoordig is uit deprivatiestudies bekend dat de moeite van het later leren zien het gevolg is van postnatale degeneratie van neuronale schakelingen in het visuele systeem. Die schakelingen zijn bij de geboorte aanwezig en redelijk functioneel, maar als ze niet binnen een kritische periode worden gebruikt en geoefend, degenereren ze of de componenten worden voor andere taken ingezet. Regeneratie of functioneel herstel is dan niet respectievelijk nauwelijks meer mogelijk. We zien hier duidelijk een synthese tussen empiristische en nativistische (rationalistische) opvattingen in de moderne neurowetenschappelijke, empirisch getoetste theorieën. (Verwar niet empirisch met empiristisch!)

Het probleem van Molyneux werd in 1688 (en nog eens in 1693) door William Molyneux aan John Locke voorgelegd (Degenaar, 1992) en houdt de vraag in of een persoon die vanaf de geboorte blind is en via het haptisch systeem ruimtelijke vormen als een bol en kubus heeft leren kennen, direct na herstel van het gezichtsvermogen als volwassene de vormen visueel kan onderscheiden, herkennen en benoemen zonder ze aan te raken. Uitstekende verhandelingen over dit probleem en de diverse antwoorden die in de loop van de volgende drie eeuwen zijn geformuleerd zijn Degenaar (1992, proefschrift) en Degenaar (1996). De moderne visie is dat de persoon er niet in zou slagen. In die gevallen waarbij het wel lukt, moet er in de vroege kindheid enige vorm van visuele waarneming zijn geweest voor de blindheid intrad. De kans op een echt Molyneux-geval is tegenwoordig trouwens vrijwel nihil, omdat de meeste vormen van blindheid die vanaf de geboorte optreden niet genezen kunnen worden. Vrijwel alleen bij cataract (troebele lens) ligt dat anders, maar daarbij doet men de operatie tegenwoordig natuurlijk zo jong mogelijk.

Eén van de eerste volledig empiristische theorieën over het ruimtezien was die van Berkeley. Hij stelde dat het netvliesbeeld 'herinneringen' oproept aan vroegere grijp- en tastbewegingen, en dat door associatie met deze motorische herinneringen een diepteschatting mogelijk wordt. Hierbij nam hij aan dat de oogspierinnervatie die nodig was voor convergentie en accommodatie de belangrijkste diepte-indicatie zou geven. Deze motorische verklaring sloot ook goed aan bij het feit dat blinden dankzij beweging, tast en aanraking zowel een ruimtezin als een lichaamsbeeld kun-

nen ontwikkelen. Pas in deze eeuw is duidelijk geworden dat deze motorische verklaring van het ruimtezien niet juist is; het is eerder omgekeerd zo dat het zien de motoriek en de tast 'opvoedt' en domineert, of althans kalibreert (behalve bij blindgeborenen, natuurlijk). Voor een normale ontwikkeling is een rijkgeschakeerde interactie tussen perceptie en motoriek nodig gebleken, en het lijkt ons tegenwoordig waarschijnlijk dat de waarnemingssystemen vanaf de geboorte gecoördineerd samenwerken. Dit maakt hopelijk duidelijk in welke zin neurowetenschappelijk en gedragsonderzoek licht werpen op epistemologische vragen en theorieën. Omgekeerd is het vele scherpzinnige denkwerk van epistemologen een goede leidraad of kapstok voor dit onderzoek naar vragen over denken bij mens en dier.

Leren sluit natuurlijker aan bij empiristische opvattingen en aangeboren kennis sluit beter aan bij rationalistische (nativistische) opvattingen, maar beide fenomenen worden aangetroffen. Men moet direct aan Kant denken bij de synthese van empirisme en rationalisme. Sommige van zijn a priori categorieën blijken ook redelijke suggesties te zijn. De suggestie bijvoorbeeld dat ruimte een a priori categorie zou zijn, strookt onder andere met de volgende moderne bevindingen:

- Berggeitjes kunnen vrijwel vanaf het moment van hun geboorte de diepte van afgronden en de hoogte en plaats van obstakels visueel schatten.
- In het donker opgegroeide kuikentjes aarzelen de eerste keer dat ze in het licht op een platform gezet worden langer met eraf te springen naarmate het platform hoger is. Ze vertonen overigens ook binnen twee dagen na hun geboorte al enige visuele vormherkenning.
- Babies die zich net kunnen voortbewegen (schuiven/kruipen), durven niet over de zogenaamde visuele kloof, een diepte onder een perspexplaat waarop de baby zich beweegt.
- Babies kunnen al na enkele dagen hun ogen richten op een plek waar ze een geluid horen, wat op een aangeboren samenwerking tussen verschillende sensorimotorsystemen wijst bij ruimtelijk handelen.

We moeten hierbij wel opmerken dat Kant ervan uitging dat de aangeboren ruimtekennis Euclidisch zou zijn, dat wil zeggen de wetten van de meetkunde van Euclides zou volgen. Dat aspect van zijn theorie is al in de vorige eeuw door Von Helmholtz bekritiseerd, kort nadat duidelijk was geworden dat er ook bruikbaar

re niet-Euclidische meetkundige stelsels konden worden opgesteld. Het moderne onderzoek maakt deze specifieke aanname van Kant steeds onwaarschijnlijker (§3.3.4), ook al zijn er nog verdedigers van het idee (O’Keefe en Nadel, 1978).

3.2 Enkele actuele perceptietheorieën

3.2.1 *Elementarisme versus Gestalt*

In de perceptietheorie waren en zijn er elkaar fel bestrijdende kampen, zoals het *elementarisme* dat gebaseerd is op empiristische uitgangspunten, versus de *Gestalt-theorie* die gebaseerd is op nativistische uitgangspunten. De discussie tussen deze twee klassieke richtingen wordt in modern jargon voortgezet door aanhangers van de *directe-perceptietheorie*, ook wel neo-Gestalt genoemd, versus aanhangers van de *computationele perceptietheorie*, ofwel neo-elementarisme. De laatstgenoemde theorie wordt door vele onderzoekers uit het kamp van de kunstmatige intelligentie aangehangen. Ik denk dat beide hoofdstromen in een aantal opzichten gelijk hebben en in een aantal andere opzichten ongelijk. Het is van belang een perceptietheorie te ontwikkelen die de goede aspecten van beide scholen combineert. Voor we daaraan toekomen moeten we stilstaan bij de bestaande theorieën en de argumenten die ervoor en ertegen spreken. Dit gaat het beste voor *visuele* perceptie. Ten eerste is hierover het meeste bekend en ten tweede zijn vele vertebraten, inclusief de mens, echte kijkdieren, waarbij het visuele systeem de hoofdrol speelt in hun overlevingsstrategieën.

Het elementarisme is sterk ‘bottom-up’ georiënteerd en heeft als nadeel dat het vrijwel altijd vastloopt op het homunculusprobleem (hoofdstuk 4): men moet een mensje in de mens postuleren dat naar een intern scherm kijkt om de omzetting van neuronale activiteitspatronen in percepten te verzorgen. Voordeel van het elementarisme is dat het geen moeilijke filosofische vragen stelt, maar probeert de zintuigsystemen als meetsystemen te begrijpen. Dat heeft veel waardevolle wetenschappelijke kennis opgeleverd. Toegepast op het visuele systeem, gaat het elementarisme ervan uit dat het zien ‘begint’ met een verzameling van lichtintensiteitswaarden op het netvlies. Bij de mens levert de receptorlaag van ieder oog dan ruim 200 miljoen lichtintensiteitswaarden, de atomen waaruit de perceptiemoleculen moeten worden opgebouwd. Dit

is ook het startpunt in het denken van ingenieurs die een tv-camera als oog voor een computer willen gebruiken. Uitgaande van dit idee dat het zien begint met een verzameling lichtintensiteitswaarden, deden elementaristen bijvoorbeeld onderzoek met lichtflitsjes en andere elementair geachte stimuli. Ze ontdekten zo dat het visuele systeem een soort automatische versterkingsregeling omvat, de licht- en donkeradaptatie.

Het vermogen om naar plaats en/of tijd gemoduleerde lichtintensiteiten te detecteren en de invloed van de spectrale samenstelling van het licht op dit vermogen werden zeer precies kwantitatief bestudeerd. Vervolgens werd ontdekt dat wellicht niet lichtenergie, maar contrast 'elementair' is voor het zien en werden automatische versterkingsregelingen voor contrast, contrastillusies, enzovoorts bestudeerd. Omdat men iedere intensiteitsfunctie (in plaats of tijd) kan beschrijven als som van sinussen, het theorema van Fourier, stelden sommige elementaristen voor dat het visuele systeem alle patronen ontleedt in termen van Fourier-componenten. Zo worden de 'elementen' van de perceptie complexer en gaan meer lijken op een soort sjablonen (sinusrasters), die men met enig recht ook wel 'Gestalt' zou kunnen noemen. Het kenmerkende van het elementarisme blijft echter de vraag wat de elementen zijn en hoe ze worden gecombineerd.

De elementaristische uitgangspunten en de bijbehorende pogingen van empiristen om de elementen van de waarneming te vinden werden heftig gekritiseerd door aanhangers van de Gestalttheorie. De Gestalt-aanhangers benadrukten dat het geheel meer is dan de som van de delen. We zouden dit nuchter kunnen bevestigen door vast te stellen dat het geheel naast de elementen nog de samenhang, de organisatie, omvat. De Gestalttheorie gaat echter wat verder. Een driehoek bijvoorbeeld is triviaal meer dan drie lijnstukken, want de lijnstukken moeten een bepaalde ruimtelijke ordening hebben willen ze een driehoek vormen. Toch blijft ook na deze vaststelling volgens de Gestalt-gedachte een driehoek iets essentieel anders dan een volledige beschrijving van delen en organisatie. Het zou een emergentie zijn, iets met nieuwe eigenschappen die niet reeds in de eigenschappen van de delen en in de ordening van de delen besloten liggen (zoals congruentie, gelijkzijdigheid, de stelling van Pythagoras, enzovoorts).

De Gestalt-gedachte heeft veel onderzoek gemotiveerd naar de organisatieprincipes van de waarneming (§3.2.2) en speelt nog steeds een belangrijke rol in perceptieonderzoek. Ervaringen in

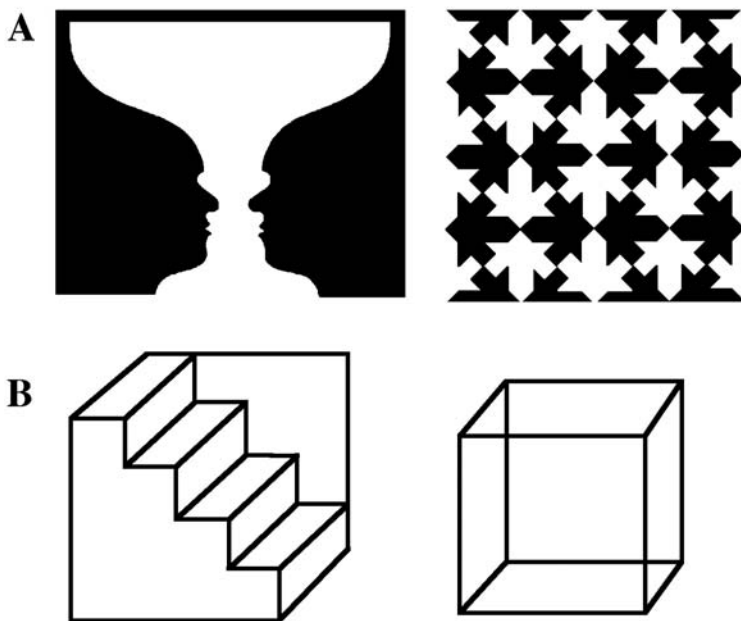
de visuele kunst toonden echter aan dat aangeboren verwerkingsprincipes niet voldoende kunnen zijn, dat er enige plasticiteit is bij het ontwikkelen van nieuwe visuele of visuomotor-concepten, dat men door oefening visuele en visuomotor-kennis kan opbouwen en vastleggen in schemata (§3.2.3).

De directe-perceptietheorie (§3.2.4), in vele opzichten een moderne variant van de Gestalt-traditie, stelt dat organismen afgestemd zijn op invarianten van hogere orde, informatiecomplexen die als geheel (Gestalt) zinvol zijn voor het organisme. Daarbij wordt benadrukt dat perceptie een activiteit is en dat uit de continue stroom sensorische meetsignalen ‘invarianten’ opduiken. De nadruk op actieve waarneming is nieuw ten opzichte van de Gestalt-theorie, maar de Gestalt-aanpak leidde tot een vergelijkbare grote interesse in bewegingszien. Dat wat invariant is in de stroom gegevens op het netvlies als we kijken naar een voorbijrennende leeuw, is de informatie die specifiek is voor de leeuw – en op die informatie zijn we afgestemd. Het zenuwstelsel meet volgens deze directe-perceptietheorie van Gibson dus niet miljoenen elementaire contrastveranderingen in plaats en tijd om uit die meetdata door eindeloze combinatie het beeld van een leeuw op te bouwen, maar ‘pikt’ direct de leeuwspecifieke invariantie op. Hoewel dit zo gezegd nogal mystiek klinkt, zullen we zien dat het idee van ‘invarianties’ in datastromen een diep inzicht is, dat mathematisch ingevuld kan worden en dat het dan goed voorstelbaar is dat het zenuwstelsel die invarianten rechtstreeks ‘oppikt’. Dat zou bijvoorbeeld kunnen betekenen dat het zenuwstelsel kant en klare neuronale netwerken heeft (zogenaamde ‘slimme mechanismen’), die op specifieke invarianten reageren (Gibson noemt dit ‘resoneren’).

3.2.2 Enkele Gestalt-ideeën

Het visuele systeem lijkt iedere afbeelding en iedere scène steeds automatisch te verdelen in een figuurdeel en een achtergronddeel. Tegenwoordig noemt men zo’n perceptuele scheiding ‘segregatie’. Er treedt dus een automatische voorgrond-achtergrond segregatie op tijdens de visuele waarneming. Dit kan bijzonder goed worden geïllustreerd met voorbeelden waarbij figuur en achtergrond van rol kunnen verwisselen. Het visuele systeem blijkt dan beide interpretaties af te wisselen zonder ooit definitief te kiezen.

Figuur 6A geeft twee bekende voorbeelden van zulke ambigue (dubbelzinnige) plaatjes, de vazen/gezichten van de Deense psycholoog Edgar Rubin (1921) en een figuur waarbij ook de oriëntatie van de contouren van horizontaal-dominant naar verticaal-dominant verandert bij een interpretatieomslag (Attneave, 1971).

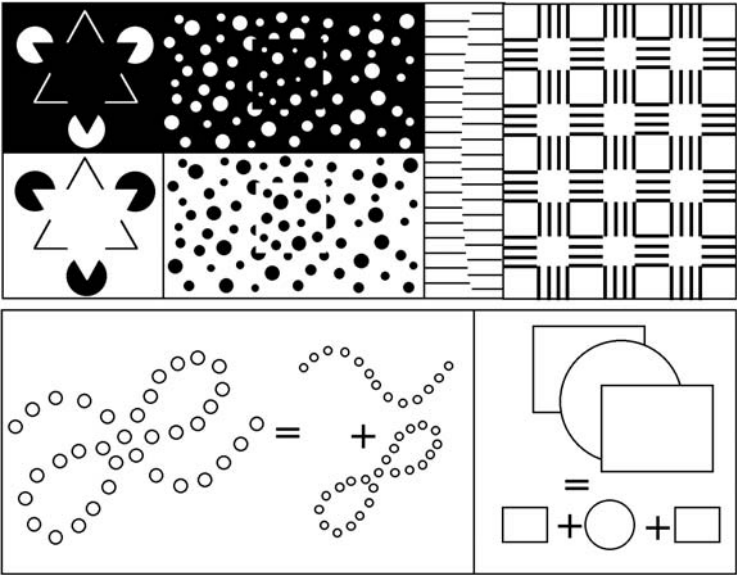


Figuur 6 Verandering van de keuze door ons visuele systeem wat voorgrond en wat achtergrond is, leidt tot 'omslag' van de interpretatie van dit soort bistabiele figuren.

Deze voorbeelden illustreren naast voorgrond-achtergrond segregatie dus ook dat het visuele systeem geen definitieve keuze lijkt te maken als er meerdere interpretaties mogelijk zijn. Dit feit kan men vooral goed illustreren met ambigue platte projecties van eenvoudige ruimtelijke objecten. De Schröder-trap (figuur 6B, links) en de Necker-kubus (figuur 6B, rechts) zijn de geijkte voorbeelden. Bij de eerste ziet men de trap soms van onder, soms van boven. Bij de kubus ziet men het achtervlak zo nu en dan plotseling voorvlak worden en omgekeerd. Wanneer men een groep gelijkvormige driehoeken tekent met gelijke oriëntatie, dan kan men dit zien als een groep vliegende vleugels die in een van de

drie mogelijke richtingen vliegt, afhankelijk van welke van de drie hoekpunten men als de 'neus' beschouwt. Er wordt dan geschakeld tussen de drie mogelijke interpretaties. Op dit thema is eindeloos gevarieerd.

Een heel sterk organisatieprincipe is de automatische ordening in diepte (achter elkaar) van elkaar gedeeltelijk overlappende vlakken. De kracht van overlap, of zoals het tegenwoordig meestal wordt genoemd 'occlusie', is goed te zien in plaatjes die zogenaamde anomale contouren vertonen. Dit zijn contouren, die objectief gezien, dat wil zeggen qua contrast, niet aanwezig zijn maar toch gezien worden. Het bovenste deel van figuur 7 illustreert dit links en midden met voorbeelden bedacht door de Italiaanse per-



Figuur 7 Boven links en midden: Kanizsa-figuren van positief en negatief contrast. De occlusie-aanwijzing die de weggeknipte stukjes van de achtergrond rondjes geven genereert een 'anomale' contour. Daarnaast een anomale contour gedefinieerd door lijneindigingen en rechtsboven een variant van de Ehrenstein-illusie. De heldere vlekjes zijn door occlusie en niet door contrast gedefinieerd. In de onderste rij zien we hoe de ontleding van een figuur door ons visuele systeem niet arbitrair is, maar een voorkeur te zien geeft voor complete en continue deelfiguren (dus net als in de bovenste rijen).

ceptieonderzoeker G. Kanizsa (1979). Men ziet hier driehoeken respectievelijk vierkanten van zowel positief als negatief contrast. De gehele randafscheiding (contour) ten opzichte van de ondergrond is te zien, terwijl die randen er qua contrast niet zijn. De cirkelvormige textuurelementen zijn zodanig weggeknipt dat de eenvoudigste interpretatie afdekking (occlusie) van de achtergrondtextuur door de rand van een driehoek respectievelijk vierkant is. Occlusie wordt dus, als de gegevens het toelaten, automatisch geïnterpreteerd als aanwijzing voor een diepteordering. Daarnaast in de derde kolom van figuur 7 (boven) zien we hoe eindigende lijnen ook opgevat worden als een aanwijzing voor occlusie. In de meest rechtse figuur boven zien we de Ehrenstein-illusie in een door mij bedachte variant. Er lijken heldere vlakjes voor de lijnen te zweven waarachter de lijnen doorlopen. Weer genereren hier lijneindingen anomale contouren.

In het voorbeeld van de Kanizsa-figures spelen behalve de occlusie ook de Gestalt-wetten van de goede voortzetting en van figuurcompletering een rol. Men spreekt voor beide wetten samen ook wel over de 'wetten van de goede figuur' of het pregnantieprincipe van perceptuele organisatie. Het perceptiesysteem heeft als het ware een voorkeur voor vloeiende opeenvolging, coherente ordening en complete figuren. Figuur 7(onder) illustreert dit nog eens op een andere wijze. De organisatie wetten van de perceptie bepalen omgekeerd ook hoe men figuren 'ontleedt'. Meestal ziet men van de vele mogelijke ontleding er slechts één. Intuïtief kan men dat wel samenvatten door te zeggen dat we steeds de eenvoudigste interpretatie zien, maar het is allesbehalve eenvoudig zo'n uitspraak in een preciese, liefst kwantitatieve, theorie om te vormen.

Wanneer we ' n bij n ' cirkeltjes of puntjes in een matrix tekenen, dan zien we dit als n kolommen als de afstand tussen de kolommen kleiner is dan tussen de rijen en als n rijen in het omgekeerde geval. Nabijheid is dus een belangrijke factor voor de ingebouwde groeperingsmechanismen. Kiezen we echter vierkantjes voor de even kolommen (of rijen) en cirkeltjes voor de oneven kolommen (of rijen) dan zien we direct een kolomvormige (of rijvormige) organisatie. Gelijke vorm is dus ook een factor in de ingebouwde perceptuele ordening.

Hetzelfde geldt voor kleur of voor gemeenschappelijke beweging. Voer zelf bijvoorbeeld het volgende experiment uit. Zet op

twee transparanten gelijke textuurelementen, bijvoorbeeld stipjes, min of meer toevallig verdeeld. Leg de transparanten op elkaar en beweeg de ene ten opzichte van de andere. We zien dan tijdens de beweging direct segregatie van de stipjes op de twee (eventueel meer) verschillende transparanten. Coherente beweging van textuurelementen leidt dus ook tot directe ‘parallele’ verwerking en segregatie door te ordenen wat bijeen hoort, een gemeenschappelijk lot heeft (‘common fate’). Dit is onder andere van belang bij camouflagedoorbreking: gecamoufleerde dieren die bewegen worden meteen gezien.

Deze korte inleiding kan geen recht doen aan het vele indrukwekkende werk dat in de Gestalt-traditie is verricht. Goede bronnen voor verdere verdieping zijn Metzger (1975) en Kanizsa (1979). In elk geval heeft dit werk duidelijk gemaakt dat veel ordeningsprincipes van de perceptie universeel zijn voor onze soort en dus aangeboren. Omdat het ecologisch zinvolle ordeningsprincipes zijn is het waarschijnlijk dat ze zelfs grotendeels universeel zijn voor meerdere soorten, maar er is helaas weinig perceptieonderzoek bij andere dieren gedaan in de Gestalt-traditie.

3.2.3 Visuele kunst: van Gestalt tot schemata

Door de eeuwen heen hebben kunstenaars proberenderwijs waarnemingswetten ontdekt. Visuele kunst kan men zien als intuïtieve experimentele studie van de visuele waarneming. Visuele kunst omvat die kunstvormen, die men hoofdzakelijk dankzij het visuele (visuomotor) systeem kan genieten, zoals schilder- en tekenkunst, architectuur, beeldhouwkunst, pantomime, dans, film, enzovoorts. Vele niet primair visuele kunstvormen hebben ook belangrijke visuele aspecten, bijvoorbeeld vertelkunst, muziek, gastronomie en dergelijke. Het bijzondere aan veel vormen van kunst is dat ze niet primair lijken te relateren aan de strijd om het bestaan en de voortplanting. Toch moet ons esthetisch gevoel relateren aan evolutieprocessen. Bij partnerkeuze bijvoorbeeld speelt het bij alle dieren vermoedelijk een regulerende rol. Partners met hoog ingeschatte fitness blijken aantrekkelijk te zijn, wat misschien meer algemeen met de ervaring ‘mooi vinden’ correleert. Veel dieren prefereren een symmetrische boven een minder symmetrische vorm voor hun partner. In de literatuur is wel gesuggereerd dat symmetrie een maat voor de ‘kwaliteit’ van de

partner zou zijn en zodoende als biologische voorkeur is geëvolueerd. Recent hebben neurale-netwerkstudies aangetoond dat voorkeur voor symmetrie ook in lerende systemen automatisch ontstaat, wanneer de eis wordt gesteld dat objecten/patronen in alle oriëntaties ongeacht positie in het gezichtsveld herkend moeten worden (Enquist & Arak (1994); Johnston (1994); Swaddle & Cuthill (1994).

Het lijkt misschien wat minder duidelijk waarom men een door van Gogh geschilderde zonnebloem mooi zou vinden en zelfs bereid is meer energie te investeren in de verwerving van zo'n artefact dan in het verwerven van echte zonnebloemen. Men kan er echter rustig van uitgaan dat economische motieven (ook gerelateerd aan de strijd om te overleven) hier de schoonheidsgevoelens pathologisch versterken. Kunst heeft daarnaast mogelijk een algemene genotscomponent vergelijkbaar met die van spel en sport. Het is bekend dat in elk geval zoogdieren een neuronaal beloningssysteem hebben en bereid zijn alles op te geven voor directe stimulatie van dat systeem. Brengt men stimulatie-electroden aan die verbonden zijn met een schakelaartje voor zelfstimulatie, dan blijken de onderzochte dieren alles op te geven om maar zoveel mogelijk het zelfstimulatiesysteem te kunnen bedienen (zie hoofdstuk 5).

Activiteit van dit neuronale beloningssysteem zou de basis kunnen zijn voor alle genotservaringen (hedonische ervaringen). Genot lijkt in het dagelijks bestaan van dieren behalve met concreet succes in de primaire activiteiten (voedsel zoeken, partner zoeken) vaak ook samen te gaan met spelen en exploratie. Dit zijn activiteiten waarvan de opbrengst in termen van toename van vaardigheden, kennis en inzichten pas later, soms veel later, merkbaar kan worden (als het geleerde al ooit van pas komt). Dieren exploreren spontaan en kunnen daarvan leren. Het is niet onwaarschijnlijk dat dit in elk geval bij alle vertebraten hedonische kantten heeft. Aan leren en ontdekken kan ook de mens duidelijk genoeg beleven. Dieren waarvoor exploreren, spelen, leren, van levensbelang is, omdat ze in een zeer gevarieerde en/of veranderlijke habitat leven, zouden via zo'n neuronale beloningssysteem een beloning kunnen krijgen die vergelijkbaar is met de beloning van concreet succes in primaire activiteiten. Dit zou de handelingen motiveren (aandrijven) die de fitness indirect verhogen, zoals kennis vergaren en vaardigheden oefenen. Zo'n hedonische aandrijving heeft grote voordelen in het richting geven aan het leven,

maar kan een tragische rol gaan vervullen als het direct gestimuleerd kan worden door chemische stoffen of andere directe zelfstimulatie. Het vervult dan niet meer de rol van fitness-verhoging, maar is een bouwsteen van de ondergang geworden, omdat alle genotsbronnen die meer energie vragen dan worden verwaarloosd. In de normale functie kan het hedonisch systeem zorgen voor een positieve ondertoon bij fitness-verhogende activiteiten. Denk aan de endorfineproductie bij training, de lol van spelen, de vreugde van een aha-erlebnis.

De gretigheid en nieuwsgierigheid waarmee sommige dieren, zoals jonge katten en primaten, om zich heen kijken, suggereert een connectie tussen het visuele systeem en een beloningscentrum. Dit hedonische centrum is in de hersenen van vertebraten onderdeel van het zogenaamde limbische systeem en er zijn uitgebreide interconnecties tussen limbisch en visueel systeem gevonden bij onder andere katten en primaten. Er is nog niet veel onderzoek gedaan aan het genoeg van kijken, perceptueel leren, visueel exploreren, en dergelijke. Toch kan dit onderwerp in principe experimenteel worden benaderd. Ten eerste kan men perceptueel leren bij mens en dier onderzoeken en vergelijken. Ten tweede kan men onderzoeken welke stimuli mensen en andere dieren prefereren in situaties die vrij zijn van de directe noodzaak te handelen om te overleven. Ten derde kan men verder onderzoek doen aan de neuronale substraten van 'genieten' en 'geluk' en de invloed hierop van andere neuronale deelsystemen, zoals het visuele systeem. Voorlopig is de waarnemingscomponent van kunst echter beter toegankelijk dan de esthetische aspecten.

Hier zullen we ons verder beperken tot de rol van menselijk perceptueel leren in de kunst. Als jonge kinderen iets tekenen, tekenen ze volgens Gombrich (1988) normaliter geen details en geen levensechte vormen maar schematische voorstellingen. Een tafel zou bijvoorbeeld getekend kunnen worden als een rechthoek waar op de hoekpunten vier even grote poten uitsteken in het tekenvlak. Het lijkt er volgens Gombrich (1988) op dat bij de ontwikkeling van het tekenen grove 'schemata' het eerst tot ontwikkeling komen. Deze grove schemata evolueren daarna door oefening. De schemata zijn als het ware cognitieve proposities, die getoetst en gemodificeerd kunnen worden. Enige hoofdattributen van het object en hun onderlinge relaties zijn het startpunt van de schemata. Voor de tafel bijvoorbeeld het blad, de vier poten en

het feit dat de poten met het blad verbonden zijn. In de schemata komen perceptuele invarianties tot uitdrukking, aspecten van de buitenwereld die in ongeveer dezelfde vorm vaak optreden. Iedere visuele scène is uniek en komt in exact dezelfde vorm nooit meer terug. Toch worden vele verschillende scènes door ons zenuwstelsel als equivalent beschouwd.

Het zenuwstelsel lijkt aspecten van de waargenomen omgeving in aparte categorieën te verdelen, in equivalentieklassen. Iedere equivalentieklasse omvat een groot aantal potentiële stimuli met eindeloze variëteit in de details, die alle als 'hetzelfde' worden beschouwd. Het zenuwstelsel lijkt dus te werken met een categorische representatie van de buitenwereld en we kunnen 'schemata' zien als samenvattingen van de neuronale definities van die categorieën. Naast deze globale schemata kan men door ervaring en oefening gedetailleerdere schemata ontwikkelen, die verder gaan dan algemene categorieën als tafel, stoel, appel, en dergelijke. Het doel van die schemata bepaalt hun detail en aard. Volgens deze visie van Gombrich (1988) kan men verwachten uit studie van de componenten van schemata iets te weten te komen over de elementaire bouwblockjes van onze perceptie.

De eerste vormen van visuele representatie zijn mogelijk ontstaan doordat de waarnemer schemata 'opgelegd' heeft aan ingewikkelde patronen. In behang, wolkenformaties of sterrenbeelden zien we heel gemakkelijk bekende patronen, zoals dieren, gezichten en dergelijke. Scheuren, mos en watersporen op de rotswand kunnen voor de oermens zó op bepaalde dieren hebben geleken, dat hij ze een beetje ging bijwerken om de gelijkenis te vergroten. Dit laatste kan de betekenis van het manipuleerbaar maken van de werkelijkheid hebben gehad. Gombrich benadrukt dat de eerste grottekeningen al dat schematische hebben van de latere Egyptische voorstellingen.

Volgens Gombrich gebruikten de Egyptenaren hun visuele representaties vermoedelijk als mededelingen, boodschappen, van relatief abstracte aard en was er een taboe op natuurgetrouwe voorstellingen. Zo zijn in de hiërogliefen de afbeeldingen van giftige dieren ongevaarlijk gemaakt, bij scorpioenen bijvoorbeeld door weglating van het gifige staartorgaan. Mensen werden in het algemeen 'en profil' getekend, maar dode vijanden en slavinnen tekende men soms 'en face', alsof daarop geen taboe bestond. Mannen werden altijd donkerbruin en vrouwen lichtgeel gekleurd. Kennelijk was de werkelijke huidskleur even onbelangrijk als de echte kleur van een rivier voor een cartograaf.

In Griekenland ontstond in de laatste generaties voorafgaand aan Plato (ca. 428-348 v.C.) een streven naar natuurgetrouwe representatie. Daartoe was het nodig de schemata te detailleren, er bijzonderheden zoals die in de wereld voorkwamen in op te nemen. Gelet moest worden op zaken die men normaal geneigd is niet belangrijk te vinden. Glimlichtjes op een appel bijvoorbeeld, of de kleurschakeringen van een appel zijn niet van belang voor het gebruik van appels, maar wel bij het tekenen of schilderen van appels. Voor Plato, die niets van die nieuwere kunstvormen wilde weten, waren begrippen en ideeën iets absoluuts, iets wat vastligt ongeacht het menselijk denken of waarnemen. De dingen hadden een 'essentie'. Deze essentie kon men door juist denken leren kennen. Plato dacht in termen van 'universalia', de essenties die verborgen liggen achter de toevallige verschijningsvormen, achter een veelheid van 'particularia'. (Het woord universalia, enkelvoud universele, is pas veel later ingevoerd. Het gaf in de Middeleeuwen aanleiding tot strijd tussen nominalisten, die de universalia slechts zagen als denkcategorieën of woorden en filosofen die aan de universalia een echt bestaan buiten het denken toekenden. Voor het gemak doe ik alsof Plato die termen al gebruikte.)

Plato hield niet van de kunstvormen die in zijn tijd in ontwikkeling waren, omdat de kunstenaars zich naar zijn smaak teveel op de particularia richtten. Een kleine koning met scheve neus werd ook zo gerepresenteerd. Plato daarentegen vond dat je het koninklijke moest weergeven, het universele van alle koningen. Hij preef de vroegere Egyptische stijl, waarin de koning groot en met regelmatige ideale gelaatstreken werd afgebeeld, ongeacht zijn werkelijke uiterlijke verschijning. Zo alleen kun je het koninklijke, het majestueuze achter de werkelijkheid van alledag, samenvatten (Gombrich, 1988). Dit is een typisch rationalistisch uitgangspunt. Plato wees er bijvoorbeeld op dat men het concept rond (bol of cirkel) begrijpt, zonder ooit iets gezien te hebben dat precies aan het ideaal voldeed. Alles wijkt er wel iets van af en toch hebben we een concept van het benaderde ideaal, het universele. De feitelijkheden of particularia versluieren de universalia eerder dan dat ze de universalia beter kenbaar maken. Met denken kan men de universalia uit de particularia opvissen, een proces dat 'abstraheren' heet.

Ondanks Plato experimenteerden de Griekse kunstenaars door en ontdekten een aantal waarnemingsregels, die het gemakkelijker maakten natuurgetrouw te representeren. Met natuurgetrouw bedoelt men in dit verband meestal dat de illusie wordt gewekt dat

we het gerepresenteerde zien in plaats van de representatie. De Griekse kunstenaars ontdekten dat dichterbij staande objecten groter moeten worden gerepresenteerd dan verder verwijderde objecten om diepte te suggereren. Ze ontdekten hoe schaduwen de diepte-indruk verbeteren, en dat achter elkaar staande voorwerpen elkaar geheel of gedeeltelijk kunnen overlappen (occlusie).

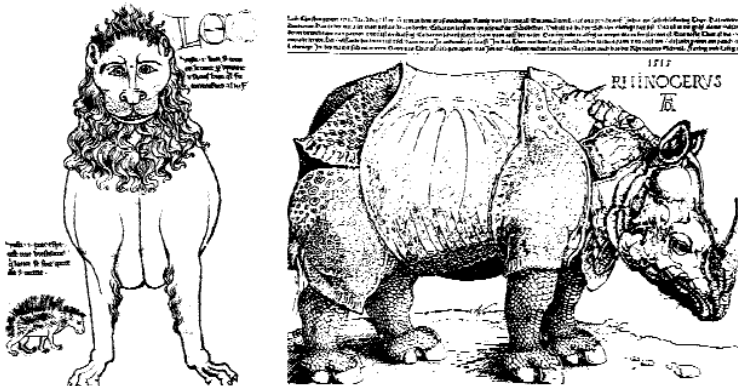
Het is kennelijk moeilijk deze zaken te ontdekken. Verdere perspectiefregels werden bijvoorbeeld pas in de Renaissance ontdekt, respectievelijk herontdekt en expliciet beschreven. De bewustwording van de wetmatigheden van visuele representatie ging langzaam, omdat het zien bedoeld is om informatie over de wereld te vergaren, niet om de dragers van die informatie te zien. De operaties en transformaties in het brein die een rol spelen bij het zien zijn introspectief niet of nauwelijks toegankelijk. Schaduwval, overlap, perspectief en dergelijke dragen weliswaar informatie over de scène waarnaar we kijken, maar ze zijn niet op zich interessant. Ze worden pas opmerkelijk als we visuele representaties willen gaan maken.

Het streven naar natuurgetrouwe representatie in de visuele kunst leidde tot een toename aan visuele schemata, die kunstenaars leerden te hanteren. Ze leerden van elkaars ontdekkingen en er ontstonden vaste tekenschema's, de zogenaamde 'canons'. Deze omvatten de geometrische basisrelaties tussen de delen van het motief. De resulterende formuleachtige benadering leidde toch tot nadruk op de universalia. De kinderkopjes die uit de studies van Dürer (1471-1528) in leerboeken werden overgenomen, zijn zo op vele schilderijen uit de eerste eeuwen na Dürer terug te vinden, vaak met maar weinig variatie in de vorm van toegevoegde details of lichte vervormingen. Zeker tot de late Middeleeuwen stond men wat onverschillig tegenover het weergeven van particularia en volgde men in geval van twijfel liever vaste schemata. Deze vorm van neoplatonisme ging er vaak van uit dat de kunstenaar via goddelijke inspiratie toegang had tot de universalia, de goddelijke waarneming waaraan de wereldse imperfecties ondergeschikt dienden te zijn. Kunstenaars representeerden 'essenties'. Deze gedachte heeft via de academies lang stand gehouden (Gombrich, 1988).

In de Renaissance ontstond een ruimere kijk op de schemata of canons, omdat vele visuele kunstenaars hun activiteit als een soort experimentele wetenschap of als technische vaardigheid gingen

beschouwen. Ze deden experimenteel onderzoek aan een complexe werkelijkheid. De schemata representeerden niet meer de universalia maar werden weer, net als bij de Griekse kunstenaars ten tijde van Plato, praktische hulpmiddelen, gereedschappen die verbeterd konden worden door het bestuderen van de wereld. Oefenen op schemata werd beschouwd als een oefening van zowel de motoriek als de waarneming, en als een voorbereiding op het ontdekken van afwijkingen ten opzichte van de bestudeerde schemata.

De praktijk toont aan dat zulk oefenen van de waarneming inderdaad plaatsvindt en nodig is. Zelfs uitstekende tekenaars met veel ervaring blijken nauwelijks in staat iets goed te tekenen dat ver afstaat van alle geoefende schemata. De leeuw van Villard de Honnecourt, “getekend naar een levend voorbeeld” en de rhinoceros van Dürer (figuur 8) zijn goede illustraties van deze stelling van Gombrich (1988). Villard de Honnecourt en Dürer waren zeer begaafde tekenaars en schilders, die vermoedelijk als eersten probeerden de betreffende dieren visueel te representeren in het platte vlak, in de vorm van lijnen, krabbels en vlekken op een oppervlak.



Figuur 8 Links een leeuw en stekelvarken getekend door Villard de Honnecourt (1235) en rechts een rhinoceros getekend door Albrecht Dürer (1515). Beide zijn volgens de kunstenaars “naar het leven getekend”. Zelfs voor zulke grote meesters is dat zonder ‘schemata’ kennelijk nogal moeilijk.

Wat zou het kunnen betekenen dat we ‘schemata’ ontwikkelen die van universalialia uitgaan en in toenemende mate details kunnen omvatten? Hebben we zenuwnetwerken die op hoofdkenmerken zijn afgestemd en zo van nature ons zien bepalen, de equivalentie-klassen vastleggen van het ongetrainde zien? Zijn er cellen of netwerken, die actief worden wanneer een arm, appel of slang te zien is? Op dit type vragen zullen we een begin van een antwoord formuleren in termen van modern neurowetenschappelijk onderzoek aan het visuele systeem en in termen van ecologische optica, een nieuw type analyse van de visuele informatie die in de wereld beschikbaar is. In deze subparagraaf is het belang gesuggereerd van universalialia, aangeboren kennis in de vorm van zeer globale schemata, en hebben we laten zien dat perceptie een leercomponent heeft, die waarschijnlijk sterk met de motoriek samenhangt (het leren van vaardigheden).

3.2.4 *De directe-perceptietheorie van Gibson (1979): perceptie als activiteit*

We hebben het visuele systeem in het voorafgaande vaak beschouwd alsof het tot taak heeft naar plaatjes te kijken. Dat is biologisch gezien natuurlijk niet de taak van het visuele systeem. Visuele en andere sensorische patroonherkenning dient normaliter de sturing van acties, zoals vluchten, voedsel zoeken en dergelijke. Er is steeds sprake van een *coherent geheel van motorische en sensorische processen*, organismen zijn in feite via *sensorimotor-processen* met de wereld verbonden. Onze ogen staan nooit stil en tijdens natuurlijke visuele waarneming bewegen normaliter hoofd en lichaam ook. Perceptie is een activiteit, niet het passief ontvangen van verzamelingen puntvormige meetwaarden. Perceptie is een aspect van de sensorimotor-programma's van organismen.

Deze sensorimotor-programma's werken bovendien, althans bij het zien, zeer snel door parallelverwerking. Wanneer een voorwerp snel op ons hoofd afkomt, bukken we zonder een analyse van de aard van dat voorwerp te maken. Het visuele systeem heeft het gevaar herkend en de visuomotor-programma's reagerden adequaat zonder eerst na te gaan of het voorwerp een vuist, steen of bal was. Kleur en vorm zijn in zo'n geval niet interessant. De diverse visuomotor-programma's zullen dus zijn afgestemd op hun doel en de daarbij benodigde informatie oppikken.

Het juist beschreven type sensorimotor-programma kan tegenwoordig op vele niveaus precies worden bestudeerd en kan als voorbeeld dienen van de wijze waarop het zenuwstelsel lichamelijke intelligentie verwezenlijkt. Als we de sensorimotor-programma's goed begrijpen hebben we een solide basis voor het bestuderen van de cognitieve functies. Immers, die moeten met dezelfde middelen, dezelfde soort neuronale netwerken, zijn gerealiseerd. Interessant is ook dat de sensorimotor-programma's veel kennis over de wereld bevatten die we, als we niet beter wisten, cognitief zouden noemen. Als voorbeeld noem ik de ijsvogel, die schuin het water induikend zonder zoeken onder water zijn prooi (vis) pakt (Boden, 1986, figuur 4.1). Het lijkt net alsof de ijsvogel de wet van Snellius kent voor brekende lichtstralen! De sensorimotor-programma's van de actieve perceptie zijn dus geenszins triviaal, ze 'belichamen' veel natuurkundige kennis. Ook mensen die de wetten van Newton niet kennen, reageren zodanig dat je moet concluderen dat hun zenuwstelsel die kennis wel heeft. De voetballer bijvoorbeeld die correct voorspelt waar een bal neerkomt, of de biljarter die een meesterstoot maakt.

Deze overwegingen leiden tot de vraag welke visuele informatie over de wereld er beschikbaar is voor een bewegend organisme (of eventueel ooit voor een autonoom bewegende waarnemingsmachine). Men noemt de studie van deze natuurlijke informatie wel 'ecologische fysica', of voor lichtinformatie 'ecologische optica'. Gibson's directe-perceptietheorie is gebaseerd op het idee dat primair vectorvelden beschikbaar zijn waaraan de bewegende waarnemer globale transformaties opdringt door te bewegen, of waarin objecten locale veldtransformaties veroorzaken door relatief ten opzichte van de waarnemer te bewegen. De 'invarianten' in die transformaties zijn nu in Gibson's directe-perceptietheorie de natuurlijke brokken informatie, de hogere-orde variabelen die waarnemers oppikken. In deze visie is het vrij onzinnig te menen dat het waarnemen met detectie van punten, lijnen, randen, en dergelijke begint, en je dan af te vragen hoe die gecombineerd worden in het brein tot, bijvoorbeeld, grootmoeder. Gibson zet zich dan ook heftig af tegen het elementarisme. De directe-perceptietheorie postuleert dat invarianten, zoals grootmoeder, direct gegeven zijn in de optische informatie en als Gestalt (nu invariant genoemd) worden opgepikt door mechanismen die "gewoon op die invarianten zijn afgestemd".

Vanuit die theorie gezien is het nodig de buitenwereld beter te beschrijven en eerst de informatieve invarianten op te zoeken,

voor men over processen in het brein, cognitie, of bewustzijn en dergelijke gaat speculeren. De toon van Gibson is ‘behavioristisch’ in de zin dat hij een terugkeer naar de objectieve beschrijving van gedrag in samenhang met de buitenwereld eist en zich verzet tegen premature speculatie over interne processen in geest of zenuwstelsel. Hij is echter fel tegen het behaviorisme omdat dat empiristisch van opzet is, terwijl Gibson juist meent dat het ‘oppikken’ van informatie gebeurt door grotendeels aangeboren mechanismen. De directe-perceptietheorie is dus in feite een nieuwe vorm van Gestalt-theorie (nativistisch georiënteerd), maar als Gestalt worden vooral de invarianten in de sensorimotor-transformaties van vectorvelden opgevat, die de basis van de waarneming vormen.

De meeste dieren zoeken voortdurend visuele structuur, visuele gebeurtenissen. Ze exploreren. De nulstimulus is een perfect uniforme verdeling van licht, duisternis of ruis (zinloze textuur). Niet lichtflux of grijswaarden maar contrast en herkenbare textuur zijn primair van belang als dragers van informatie over de ruimtelijke structuur om ons heen. Vanuit een kijkpunt, bijvoorbeeld het optisch knooppunt van het oog van een dier, kan men zich lijnen voorstellen die naar alle onderscheidbare textuurelementjes in de omgeving lopen. De textuurelementjes zijn als het ware labels aan deze visuele richtinglijnen. Dit lijkt weer een elementaristisch startpunt, maar Gibson e.a. gaan meteen van deze quasi-elementaristische beschrijving over op het geheel van alle visuele richtinglijnen vanuit een bepaald waarnemingspunt. Dat geheel wordt het ‘optisch raster’ genoemd (‘optic array’). Als het waarnemingspunt zich nu verplaatst, zullen de richtinglijnen zowel als geheel als ook onderling ten opzichte van elkaar bewegen. Men spreekt dan van de ‘optische stroom’ of ‘optic flow’. Door deze met differentiaal-geometrische methoden te analyseren krijgt men componenten die duidelijk niet in de klassieke elementaristische aanpak ontdekt zijn. Het zijn de invarianten van de optische stroom, ook wel hogere-orde variabelen genoemd. Gibson beheerste geen differentiaalgeometrie en heeft dus geen exacte theorie opgesteld. Des te indrukwekkender is het dat hij hierover (grotendeels) de juiste intuïties had. Pioniers van de meer mathematisch georiënteerde ecologische optica, zoals vooral het echtpaar Koenderink en van Doorn, hebben kunnen laten zien dat de meeste intuïties van Gibson (vrijwel) correct waren. Op hun exacte aanpak vanuit de differentiaalgeometrie kom ik nog terug.

Optische-stroominformatie is objectief aanwezig, ongeacht of het bewegend dier er gebruik van kan maken of niet. Zoals in hoofdstuk 2 is toegelicht, betekent 'objectief' dat het in principe voor ieder organisme met de juiste waarnemingsorganen toegankelijk is, dat het publiekelijk beschikbaar is. De ecologische optica houdt zich bezig met de wetenschappelijke beschrijving van dit soort objectieve informatie en is dus zeer relevant voor de biologie. Als men een volledige beschrijving van de informatie in het optische raster en optische-stroomveld kan geven, liefst met weinig parameters (wat inderdaad blijkt te kunnen), rijst de vraag of organismen zijn afgestemd op de componenten die in deze efficiënte beschrijving voorkomen, of ze de beschikbare informatie kunnen opnemen en hoe goed. Dit kan men met psychofysische methoden onderzoeken. Daarna of tegelijkertijd kan men met neurowetenschappelijke methoden zoeken naar de neuronale netwerken die op dit type informatie (Gestalten) 'direct' zijn afgestemd. De kenmerken waarop organismen zijn afgestemd zouden volgens deze visie niet lijnen en randen zijn, die door samenvoeging kunnen leiden tot een soort neuronale karikatuur van bijvoorbeeld grootmoeder, maar de hogere-orde invarianten van de optimale differentiaalgeometrische beschrijving van de wereld. Immers visuele detectoren moeten, willen ze biologisch zinvol zijn, ook raad weten met de plastische bewegingen van spieren en huid van het gezicht en daarin de invariante entiteit detecteren.

In de volgende paragraaf zal eerst worden nagegaan in hoeverre moderne dynamische representaties van ruimtelijke structuur, zoals film of computeranimatie, een betere imitatie van de wereld geven dan plaatjes. Het zal dan duidelijk worden dat een exploratief organisme zo'n informatierijke sensorimotor-koppeling met de wereld heeft, dat het direct kan ontdekken of het naar een echte of gesimuleerde wereld kijkt. Alleen als we de exploratieve acties naar een computer terugvoeren en het beeld hiermee zodanig causaal koppelen dat het lijkt of het organisme een echt object ruimtelijk exploreert (er bijvoorbeeld omheen loopt), kan een bijna perfecte simulatie van de echte wereld ontstaan (van de Grind, 1987, 1988). Dit inzicht begint te leiden naar steeds betere terugkoppeling van lichaamsbewegingen van de gebruiker (waarnemer) naar de computer bij interactieve computergrafica ('virtual reality'). Ook die ontwikkeling illustreert zeer goed wat bedoeld wordt met de stelling dat perceptie een activiteit is. Wat Gibson met de ijver van de zendeling naar voren bracht, enigszins

mystiek geformuleerd en op moeizaam verworven intuïtie gebaseerd, begint steeds meer gemeengoed te worden in de omgeving van robotbouwers en mensen die zich met ‘virtual reality’ bezig houden. Dat is een bijzonder grote verdienste!

Als psycholoog heeft Gibson nooit veel moeite gedaan zijn ideeën te toetsen aan de biologie. Veel van wat hij zegt is biologisch gezien triviale dan gezien vanuit de psychologie van zijn tijd, waarbinnen velen het als revolutionair zagen. In de biologie is allang duidelijk dat men in plaats van alleen het dier, het gehele dier-habitatsysteem als eenheid van onderzoek moet nemen. Ook biologen worstelen dan met de vraag wat in zo’n systeem de interessantste invarianten zijn en delen grotendeels vanzelfsprekend het nativistische standpunt. Immers de evolutietheorie is de ruggegraat van de moderne biologie en die gaat uit van adaptaties, fylogenetisch ontwikkelde ‘aangeboren’ eigenschappen van de soort. Een eendagsvlieg hoeft geen grootmoederdetectoren te hebben en geen langetermijngeheugen, maar voor zo’n vlieg zou een ‘vliegendetector’ nuttig kunnen zijn, net als voor de kikker. Welke aspecten van de omgeving informatief zijn en dus tot de habitat horen, is een natuurlijke vraag in de biologische studie van waarneming bij dieren. Zodra men bovendien de exacte en natuurwetenschappelijke aanpak boven leunstoelspeculaties over verborgen interne processen stelt, legt men ook in de biologie de nadruk bij onderzoek op de ecologische fysica, net als Gibson.

3.3 Visuele (re)presentatie van ruimtelijke structuur

3.3.1 Waarnemen en bewegen zijn wederzijds onmisbaar

Taal is beslist niet het meest geschikt als drager van informatie over complexe ruimtelijke structuren of ruimtelijke processen. Zoiets eenvoudig als een stoel laat zich zonder directe referentie aan visuele, tast- of gebruikservaring niet gemakkelijk in taal beschrijven, maar voor iemand die een aantal stoelen gezien of gebruikt heeft, is het woord of een gebrekkige omschrijving al voldoende om zich alle relevante details ‘voor de geest te halen’. Vooral als men de gebruikswaarde voorop stelt, de stoel als “sit-on-able”, zoals Gibson (1979) dat doet in zijn concept ‘affordance’. Taalgebruik is, net als horen, waarop het oorspronkelijk gebaseerd moet zijn geweest, een serieel proces. Ruimtelijke visuele perceptie is,

tenminste voor een belangrijk deel, een parallel proces. Tracht men bijvoorbeeld een kamer die men bekijkt verbaal te beschrijven, dan is men gedwongen op een bepaald punt te beginnen om dan na elkaar in een min of meer arbitraire volgorde de relatieve positie en bijzonderheden van de voorwerpen op te sommen. Bij het zien van de kamer daarentegen kan men zeer vele ruimtelijke samenhangen in één oogopslag waarnemen (parallelverwerking), al tast ook ons oog grotere gebieden met behulp van oogbewegingen na elkaar af voor de fijnere details. (Dit is een gevolg van de hogere resolutie van de fovea, van de centrale gezichtshoek van twee graden om de kijkas.)

Het vermogen van het visuele systeem om veel ruimtelijke informatie parallel op te nemen en te verwerken komt goed tot uiting als we in een flits iemand of iets herkennen. Ook bij het na elkaar aftasten van visuele gegevens, waarbij het oog afwisselend kort fixeert en een snelle sprongbeweging (saccade) maakt, zal per fixatie de informatie parallel worden opgenomen. Dit verklaart waarom één plaatje vaak meer zegt dan duizend woorden. De waarde van plaatjes (ik gebruik dat als verzamelwoord voor schetsen, tekeningen, schema's, schilderijen en dergelijke) als dragers van informatie over ruimtelijke structuur werd al vroeg ingezien. Vooral technische ontwerpen, anatomische kennis en dergelijke worden al sinds duizenden jaren voor een zeer belangrijk deel in de vorm van plaatjes overgebracht. In schilderijen krijgt de beschouwer vaak tenminste twee boodschappen, namelijk die van de cultuurgebonden symboliek en die van de voorstelling op zich. Ik wil het hier natuurlijk alleen over het laatste aspect van plaatjes hebben, over de vormaspecten die verwijzen naar de geometrie en overige optisch relevante eigenschappen van de voorgestelde objecten en scènes. Hoe goed kan driedimensionale geometrische en optische informatie over objecten en scènes via representatie in een (vrijwel) plat vlak, in een plaatje, worden overgedragen? Ik zal het woord 'beeldsequentie' gebruiken voor alle representaties, die bestaan uit series opeenvolgende, niet geheel identieke plaatjes, dus voor bijvoorbeeld films, tv en computeranimatie. Zoals een plaatje meer zegt dan vele woorden, zegt een beeldsequentie meer dan vele plaatjes. Behalve de vele opeenvolgende plaatjes omvat de sequentie ook een samenhang tussen plaatjes, bijvoorbeeld beweging van een object door een scène, die niet in de afzonderlijke plaatjes te merken is maar wel in hun sequentiële presentatie. In Gestalt-termen kunnen we dus vaststellen dat een sequentie plaatjes meer is dan de som van de plaatjes.

Ook wanneer objecten zo natuurlijk mogelijk in een plaatje zijn vastgelegd (bijvoorbeeld in een foto of dia) kan de waarnemer direct vaststellen dat hij naar een plat plaatje kijkt. Hiertoe is het voldoende het hoofd heen en weer te bewegen om te zien of men om bepaalde obstakels heen kan kijken. Uit dit spel met de occlusie-informatie (een soort kiekeboe) zien we dan direct dat de fysische werkelijkheid bijvoorbeeld een opgespannen stuk linnen of een stuk fotopapier is met daarop een complex arrangement van pigmentvlekken. We kijken dus feitelijk naar markeringen op een oppervlak en interpreteren dat als objecten, die daar gerepresenteerd zijn (Gibson, 1979). Dat we naast het voorgestelde tegelijk de platheid van het dragende oppervlak zien, zijn we ons niet noodzakelijkerwijs voortdurend bewust. Het oppervlak en de markeringen zijn fysisch aanwezig, meetbaar; het gerepresenteerde is symbolisch aanwezig. Een symbool is een entiteit die een andere entiteit representeert, vaak in een ander fysisch medium en/of een ander 'format'. De markeringen die bij elkaar een plaatje vormen, zijn in deze zin symbolen en hebben dus niet alle eigenschappen van datgene wat ze representeren: een geschilderde vaas kun je niet omgooien.

Het lijkt triviaal vast te stellen dat alle plaatjes en beeldsequenties voor de tastzin platte objecten zijn, die geen tastinformatie over de gerepresenteerde objecten leveren. Maar waarom geldt dezelfde vaststelling niet voor het visuele systeem? Hoe komt het dat we de markeringen op plaatjes, films of beeldschermen als representanten van ruimtelijke objecten kunnen zien, terwijl toch ook waarneembaar is dat we naar een plat vlak kijken? Meestal wordt als antwoord gegeven dat de representatie een retinale stimulatie geeft, die vrijwel identiek is aan de stimulatie bij het direct kijken naar de gerepresenteerde entiteiten, en dat gelijke stimuli tot gelijke waarnemingen moeten leiden. Dat antwoord kan echter niet goed zijn. We herkennen tante Bep op een klein fotootje in een album, alhoewel we haar in werkelijkheid nooit zwart-wit zien, nooit zo perfect stil en plat, nooit zo klein tegen een achtergrond van een buitengewoon veel groter fotoalbum. Niet het retinale beeld, maar bepaalde optische kenmerken waarop ons visuele systeem is afgestemd, moeten in het plaatje aanwezig zijn om het object herkenbaar voor te stellen. We zullen ons dus moeten afvragen, welke die optische kenmerken van objecten zijn waarop ons visuele systeem is afgestemd.

De stap van het zien van markeringen op een oppervlak naar het

zien van de gerepresenteerde objecten is niet zo triviaal als we vaak denken. Vele diersoorten lijken niet in staat een tekening, schilderij of foto te interpreteren. Ze zien kennelijk slechts het vlak waarop de markeringen zijn aangebracht en mogelijk de markeringen zelf, maar niet wat door de markeringen wordt voorgesteld. Plaatjes zien is met andere woorden geen basale algemene vorm van zien. De directe- (of 'ecologische') perceptietheorie ziet de waarneming van invarianten in de transformaties van het optische raster als primair, als eenvoudig en natuurlijk, en de perceptie van een plat statisch geheel zoals een plaatje als moeilijker, namelijk als het interpreteren van abstracte symbolen. Inderdaad blijkt het zien van beweging en van deformatie tengevolge van beweging voor alle vertebraten eenvoudig te zijn. Het waarnemen van 'bevroren' actie in statische markeringen op een oppervlak is moeilijker en voor de meeste diersoorten zelfs geheel onmogelijk.

In dit verband moet worden benadrukt dat beeldsequenties, zoals films, eveneens essentiële kenmerken van natuurlijke visuele informatie missen, namelijk alle door exploratieve egobewegingen opgewekte veranderingen. Als een trein snel aan ons voorbijrijdt en we de letters op de zijkant willen lezen, kunnen we de trein met de ogen volgen om de letters te focuseren. Als een voorbijrijdende trein echter eenmaal met een stilstaande camera is gefilmd zal de oogvolgbeweging bij het kijken naar de film niet helpen om de letters scherper te krijgen, omdat ze nu eenmaal al bij het filmen zijn uitgesmeerd. Films zijn alleen interpreteerbaar voor die diersoorten, die kunnen leren af te zien van het feit dat de informatie op het filmdoek niet causaal samenhangt met hun eigen bewegingen. De meest natuurlijke en rijke vorm van visuele informatie is die welke samenhangt met de eigen exploratieve bewegingen. Het visuele systeem moet hierop in de loop van de evolutie zo goed zijn afgestemd dat die informatie het eenvoudigst te interpreteren is.

Plaatjes die driedimensionale (3D-) structuren representeren, zoals foto's of tekeningen, worden in het algemeen gemaakt met behulp van een platte projectie van de te representeren objecten en scènes. Vanaf een vast beschouwingspunt moet de retinale stimulatie door het plaatje zo goed mogelijk de stimulatie door het gerepresenteerde nabootsen. Deze projectiemethode van plaatjesconstructie is vooral door kunstenaars tot ontwikkeling gebracht. In de hedendaagse computerbeeldpresentatie is dit idee weer po-

pulair. Men benadrukt dat de gerepresenteerde structuur zodanig moet zijn afgebeeld, dat het beeldscherm een venster op een echte wereld lijkt. We zullen zien dat dit een onmogelijke opgave is zonder terugkoppeling van de exploratieve activiteit van de waarnemer naar de beeldgenerator. Met die terugkoppeling wordt het in principe mogelijk, maar het is nog niet goed gerealiseerd. Natuurlijke visuele informatie kunnen we nog niet voldoende goed in het laboratorium nabootsen (simuleren), vanwege het feit dat we de rijke natuurlijke visuele exploratie, dat wil zeggen het informatie zoeken door bewegen, nog niet kunnen nabootsen. Het actieve zien van alledag is tijdens kijken naar plaatjessequenties nog niet mogelijk.

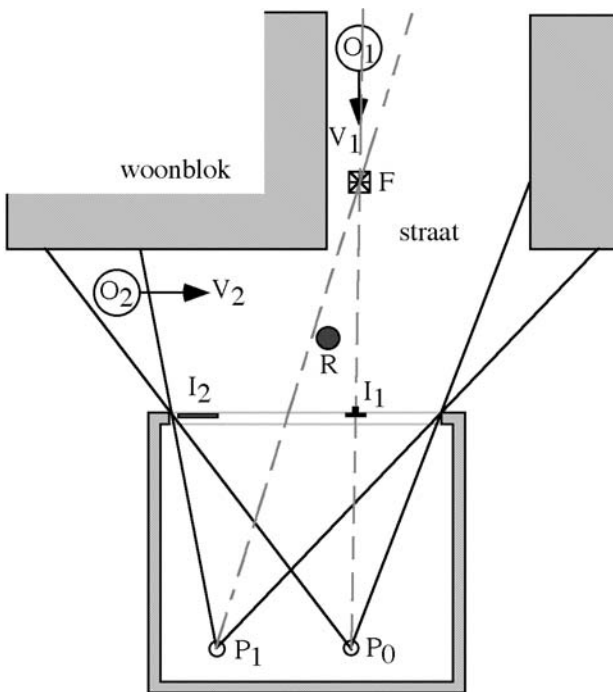
Plaatjes hebben als het ware een duale realiteit (plat plaatje èn voorstelling van een 3D-situatie) en men zal ze bijna nooit voor het afgebeelde object of de afgebeelde situatie aanzien. Immers, hoe je er ook voor heen en weer beweegt, je kunt geen nieuwe – niet door de producent in het plaatje gestopte – informatie vergaren over de afgebeelde objecten, terwijl dat in de echte scène wel zou gebeuren. Daardoor kun je steeds vaststellen dat je naar een plat beeldvlak kijkt. De minste last heeft men hiervan natuurlijk bij een vaste (3D-illusie bevorderende) kijkpositie en monoculair kijken.

Bij films of computeranimatie is er de extra mogelijkheid het object rond te laten draaien, of de kijker als het ware om het object heen te leiden. Zo krijgt de kijker alle informatieve aspecten na elkaar in beeld en kan zich een goede voorstelling maken van het object. Hier zien we hoe belangrijk het is bij computeranimatie de voor de gebruiker informatieve visuele gebeurtenissen vast te leggen, dat wil zeggen in de interne representatie in de machine kennis over het zien van de mens te verwerken, in plaats van alle mogelijke grijswaarden en kleurwaarden te bewaren als in videogeheugens! Ook vormverandering in de tijd, dat wil zeggen 4D-structuurinformatie, kan in beeldsequenties worden vastgelegd. Een film van wuivend graan of van een pompend hart kan bijvoorbeeld een goede indruk geven van de elastische eigenschappen van graan of van het hart. Toch blijven ook beeldsequenties lijden aan de duale realiteit die inherent is aan plaatjes. Immers bij het kijken naar een film tonen anomalieën van de bewegingsparallax en occlusie direct aan dat er sprake is van een platte projectie.

We gaan dit na met een eenvoudig voorbeeld. Stel dat men op

positie P_0 in het kamertje van figuur 9 zit en monoclair naar de geschetste scène (of een film die dat voorstelt) kijkt, zonder te weten of de scène op een scherm wordt geprojecteerd of direct zichtbaar is door een raam. Beweegt de waarnemer nu bij wijze van test (exploratie) het hoofd naar positie P_1 , dan zouden bij het kijken door een raam O_1 en O_2 uit zicht moeten verdwijnen, maar bij het kijken naar een film blijven ze gewoon zichtbaar op hun plaats op het scherm. Dit is een oclusie-anomalie, die direct platheid specificeert.

Wat bewegingsparallax betreft zien we een vergelijkbaar verschil. Als de waarnemer door het raam zou kijken zou F rechts van R te zien zijn vanaf P_0 en links van R vanaf P_1 . Als deze verschuiving tijdens beweging van P_0 naar P_1 niet optreedt, kijkt men niet naar een echte scène. F en R zitten kennelijk op gelijke afstand van de waarnemer, namelijk op het scherm. De positie van die



Figuur 9 De vraag aan de monoclair waarnemer is of hij/zij naar de echte wereld kijkt door een raam of naar een voorgespeelde wereld op een scherm. I_1 en I_2 zijn projecties (Images) van O_1 en O_2 op het scherm/raam.

punten is uitsluitend bepaald door de positie van de camera tijdens het filmen van de scène en wordt niet meer door bewegingen van de waarnemer beïnvloed.

Hetzelfde geldt voor het differentieel opzwellen van objecten tengevolge van naderbijkomen. Tijdens naar voren bewegen van het hoofd van de waarnemer zal de opzwellingsnelheid van objecten op verschillende afstand verschillend zijn. Bij twee even grote objecten zal het beeld van het object dat x keer verder weg is, x keer kleiner zijn gemeten op het scherm/raam, en x^2 keer langzamer opzwellen. Immers, als we met snelheid V bewegen naar een object met diameter d dat zich op afstand L bevindt, is de opzwellingsnelheid evenredig met $V \cdot d/L^2$, de beeldgrootte op het scherm is voor afstand L evenredig met d/L . Als beide objecten echter op het filmdoek geprojecteerd zijn zal het beeld van het verste object slechts x keer langzamer opzwellen, omdat het x keer kleiner is op het scherm, maar nu dezelfde afstand tot de waarnemer heeft.

Kennelijk kan een waarnemer dit vaststellen, want het is vrijwel onmogelijk de illusie dat het om een echt raam gaat op te wekken als de waarnemer mag bewegen. Een nog eenvoudiger en directere test is dat het zichtbare deel van de buitenwereld aan de randen van een raam groeit als men naar het raam toe beweegt, terwijl dat niet gebeurt op een filmdoek wat men nadert. Bewegingen van de waarnemer kunnen de beeldsequentie zodoende direct als platte projectie, als surrogaatwereld, ontmaskeren.

Bij vliegsimulatoren is er een terugkoppeling van de stuuracties van de waarnemer naar de beeldgenerator, dat wil zeggen dat alleen de voertuignavigatiegegevens worden teruggekoppeld, niet de explorerende hoofdbewegingen van de waarnemer. Die exploratiebewegingen kunnen zodoende geen corresponderende beeldbewegingen en beeldvervalsingen veroorzaken. Het is op dit moment vrijwel onmogelijk en in elk geval onbetaalbaar om een opstelling op te bouwen waarin op dusdanig perfecte wijze exploratieve bewegingen worden teruggekoppeld naar interactieve beeldgeneratoren, dat de waarnemer niet zou kunnen zien of hij/zij naar een echte of artificiële wereld kijkt. Een steviger basis voor de uitspraak dat waarnemen een activiteit is, kan men nauwelijks wensen. Deze redenering leidt tot de volgende hoofdstelling van de actieve waarneming:

Er is geen (natuurlijke) waarneming zonder bijbehorende motorische activiteit en er is geen (natuurlijke) motorische activiteit zonder bijbehorende waarneming.

Wat het tweede deel van de stelling betreft, men hoeft slechts aan de proprioceptie, spierspoeltjes, evenwichtsorgaan en dergelijke te denken om in te zien wat bedoeld is. De implicatie is dat zowel zintuigonderzoek als motorisch onderzoek beter beschouwd kunnen worden als sensorimotor-onderzoek. Bij perceptie moet men steeds aan de continue transformaties in de sensorimotor-interacties met de omgeving denken. De lichamelijke intelligentie en de voortdurende causale koppeling met de omgeving zijn centrale aspecten van de waarneming door organismen.

3.3.2 *Het direct zien van vorm en abstracte concepten*

In een foto of ander plat plaatje is in principe onvoldoende metrische informatie beschikbaar. Metrische informatie wil hier zeggen gegevens over maat en getal. Het plaatje kan ongeacht het formaat waarop het is afgedrukt een object van steeds dezelfde grootte weergeven, en omgekeerd weten we niet of een stadsgezicht van 6 cm x 9 cm nu Amsterdam of Madurodam voorstelt. Met andere woorden platte plaatjes zijn qua interpretatie schaalinvariant. Meestal vangt men dit probleem pragmatisch op, door iets bekend in het plaatje op te nemen, bijvoorbeeld een speldekop in een foto van een spinneoog, een mens in een foto van Madurodam. In andere gevallen gebruikt men wel een lineaalte of ruitjespapier in de foto als ijkobject.

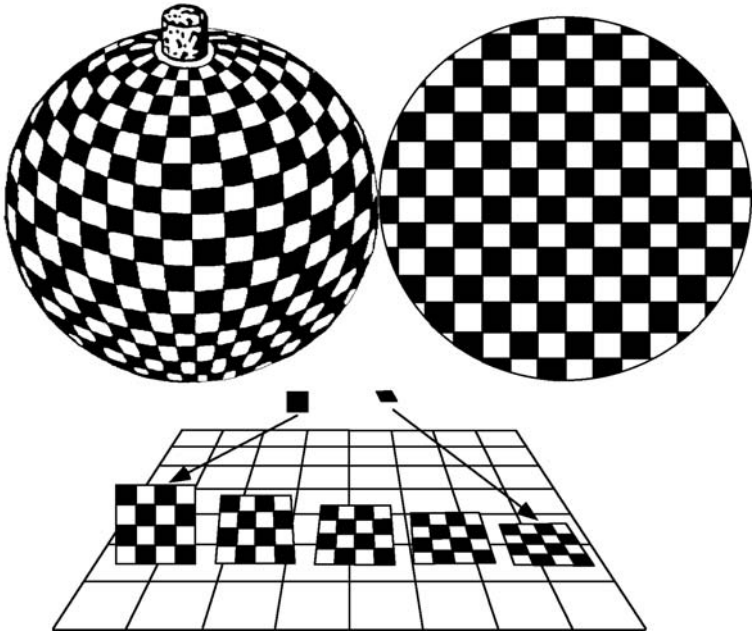
Ijking van alleen de maten in het frontoparallelle vlak (horizontale en verticale richtingen in het beeldvlak) is niet voldoende. Ook aan de diepteordering (afstanden) dient maat en getal toegevoegd te worden om na te kunnen gaan hoe ver A achter B staat. Zelfs als dat probleem is opgelost, blijft de vraag wat de maat is van locale dieptevariëaties zoals die tengevolge van reliëf. De metriek van het reliëf kan niet met een lineaalte in het plaatje worden aangegeven. Stelt een bepaalde cirkel in het plaatje een bal voor of een platte schijf? Is die rechthoek een frontoparallelle rechthoek of een achteroverleunend vierkant? Deze diepteorde van het reliëf kan men onder andere afleiden uit de representatie van de textuur

van de oppervlakken in het plaatje. Dit idee is in figuur 10 aangegeven met behulp van een eenvoudige textuur, namelijk een schaakbordpatroon.

Geometrie levert het gereedschap om ruimtelijke structuren te beschrijven en wat verandert bij verandering van gezichtspunt kan met differentiaalgeometrie worden beschreven. We hadden het optisch raster (de 'optic array') al gedefinieerd als de volledige verzameling van door textuurvlekjes en contrasten gelabelde visuele richtinglijnen in de wereld. Het is een *tweedimensionale* verzameling van richtinglijnen, omdat in onze voorstelling nooit meer richtinglijnen vanuit het kijkpunt naar de omgeving getrokken kunnen worden dan er door een gesloten oppervlak om ons waarnemingspunt prikken (door een bol bijvoorbeeld of door het beeldvlak).

Een groepje richtinglijnen uit een oog naar één en hetzelfde elementaire textuurdeeltje in de buitenwereld vormt een soort gegeneraliseerde kegel. In figuur 10 bijvoorbeeld definiëren elementaire vierkantjes op de objecten het grondvlak van zulke gegeneraliseerde kegeltjes. De doorsneden van die kegeltjes met het beeldvlak zijn vervormde vierkantjes (vierhoekjes). Informatie over reliëf, over de kromming van oppervlakken en dergelijke, kan in het plaatje bevat zijn in het verloop van de doorsneevormen van de richtingkegels in het beeldvlak. Minder abstract gezegd: het verloop van de textuurvervorming met de plaats in het plaatje geeft gedetailleerde reliëfinformatie.

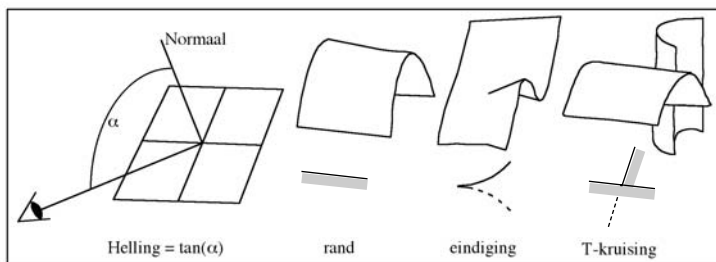
Door het begrip hellingenvectorveld in te voeren (Koenderink en Van Doorn, 1976, 1978, 1982) kunnen we laten zien, hoe objectvormen voor de waarnemer zijn gespecificeerd. Figuur 11 illustreert de definitie van het begrip (locale) helling als de tangens van de hoek (α) tussen de locale normaal op het oppervlak en de daar aankomende kijkrichtinglijn. Deze hellingdefinitie geeft de grootte van de helling, maar een helling heeft ook een richting en is dus een vectorgrootte. Als richting kunnen we de richting van de grootste locale kromming van het oppervlak nemen, dat wil zeggen de richting waarin de helling het sterkst verandert. De helling is daarmee als vectorgrootte gedefinieerd. Uit figuur 10 was al duidelijk dat de deformatie (vervorming) van textuur een maat moet zijn voor de locale helling of kromming. De deformatiecomponenten specificeren het hellingenvectorveld voor de waarnemer. Het hellingenvectorveld representeert de vorm van het object en in het plaatje wordt dat onder andere door de defor-



Figuur 10 De kracht van de deformatie van lokale textuurelementen bij het specificeren van vorm voor de waarnemer. Linksboven een bol met kurk, rechtsboven een plat vlak, wat uit de aan- of afwezigheid van het verloop van de deformatie met de plaats in de figuur te zien is. Onder zien we 3D-helling uit een deformatieverloop dat zowel plathheid als achteroverhellen specificeert.

matiecomponenten gerepresenteerd.

Figuur 11 laat zien dat er nog een bijzonder informatief aspect van de relatie tussen een waarnemer en het object in het hellingsvectorveld is gegeven, namelijk in de singulariteiten van het veld. Daar waar de helling oneindig groot wordt, raakt de kijklijn van de waarnemer aan het object. Men kan aantonen, dat er in essentie slechts drie soorten singulariteiten van oneindige helling mogelijk zijn: de vouw of rand ('fold' of 'edge'), een eindiging ('spine' of 'cusp') tengevolge van een zadelpunt op het oppervlak van het object, en een partiële afdekking van een contour door een andere (occlusie). Er zijn ook singulariteiten van nulhellingen, namelijk in al die punten waar visuele richtinglijnen uit het waarnemingspunt loodrecht op het oppervlak van het object staan.



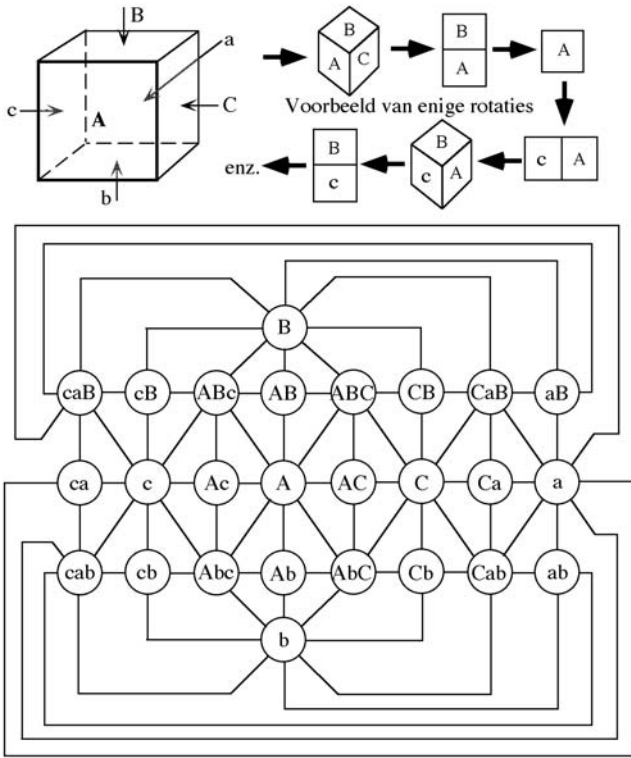
Figuur 11 Definitie van het begrip helling, een vectorgrootheid waarvan de grootte gelijk is aan de tangens van de aangegeven hoek tussen kijklijn en normaal, terwijl de richting bijvoorbeeld die is van de grootste krommingsrichting op het oppervlak. Daarnaast zijn de drie mogelijke singulariteiten van het hellingenvectorveld aangegeven waarbij de helling oneindig wordt. (Vrij naar Koenderink en Van Doorn, 1976, 1978, 1982.)

Als de waarnemer, het object, of beide bewegen, kunnen er singulariteiten verdwijnen en bijkomen en dat is naast de verandering van textuurdeformatie de informatie die we door exploratie kunnen verkrijgen. Het bijkomen of verdwijnen van een singulariteit voor oneindige helling noemen we een 'visuele catastrofe'. We kunnen nu stellen dat de meeste waarnemingsposities stabiel zijn, in de zin dat kleine bewegingen geen visuele catastrofes veroorzaken. Als je om een object heenbeweegt krijg je successievelijk alle catastrofes, die in hun volgorde en samenhang specifiek zijn voor dat object, te zien. *De verzameling van alle stabiele toestanden (aanzichten) tesamen met de catastrofes die overgangen van toestand naar toestand aangeven, specificeren een 3D-object kwalitatief volledig.* Deze specificatie noemden Koenderink en Van Doorn de *visuele potentiaal* van het object.

De aanzichten in de specificatie van het object kan men als knooppunten zien in een graaf en de overgangen als relaties tussen de knooppunten. De genoemde auteurs toonden aan dat de visuele potentiaal van een 3D-object altijd een 2D-netwerk is en dus een zuinige representatie geeft. Ik zal twee concrete voorbeelden bespreken, namelijk de visuele potentiaal van een kubus (figuur 12) en van een tomaat (figuur 13). De aanzichten kunnen beschreven worden als geordende verzamelingen glanspunten, randen, eindigingen en T-kruisingen. In principe zou men zich goed kunnen voorstellen, dat de hersenen op die wijze kennis van objecten en scènes opslaan. Het principe zou in de toekomst wellicht ook een rol kunnen spelen bij objectrepresentaties in computers.

De aard van de neuronale objectsjablonen oftewel de neuronale verwachtingspatronen van sensorimotor-gebeurtenissen die we visuele potentiaal noemen, zal nu eerst worden geïllustreerd met het voorbeeld van een kubus. De zes vlakken van de kubus worden lettergecodeerd zoals in figuur 12 is aangegeven. Tegenover vlak A ligt vlak a , tegenover B ligt b en tegenover C ligt c . Hoe we een kubus die we met één oog bekijken ook draaien, we kunnen nooit vlak X en x tegelijk zien (x en X staan voor één van de eerste drie letters van het alfabet). Plaatsen we de kubus zo, dat een hoekpunt naar ons oog wijst, dan zien we drie vlakken tegelijk, enzovoorts. De mogelijke aanzichten zijn door de cirkeltjes van figuur 12 gerepresenteerd. De verbindingslijntjes in figuur 12 stellen de overgangen voor, dat wil zeggen de visuele catastrofes. De visuele potentiaal van een driedimensionaal voorwerp is, zoals gezegd, altijd een tweedimensionale structuur, een zogenaamde 2D-graaf. Dat wil in concreto zeggen dat men de visuele potentiaal van een 3D-voorwerp altijd zó kan tekenen, dat er geen kruisende lijnen in voorkomen (zie figuur 12 en 13).

We zien dat er nogal wat redundantie in het netwerk in figuur 12 zit. Als we een klein deel gezien hebben kunnen we de rest wel raden. Uit iedere cel met één letter kunnen we acht andere cellen bereiken, namelijk vier met één letter meer (rechtsom, linksom, naar boven of naar onder draaien van de kubus) en vier met twee letters meer (naar linksboven, rechtsboven, linksonder of rechtsonder draaien). Uit iedere cel met twee letters kunnen we vier andere cellen bereiken, namelijk twee met één letter meer en twee met één letter minder. Uit iedere cel met drie letters kunnen we zes andere cellen bereiken, namelijk drie cellen met één letter minder en drie cellen met twee letters minder. Deze regelmaat is zo opvallend, dat uit een enkele waarneming van een kleine draaiing al met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid kan worden vermoed dat we naar een kubus kijken. Zelfs een enkel aanzicht kan al voldoende zijn, bijvoorbeeld als we drie vlakken zien. Tekenaars maken daar dankbaar gebruik van door zulke zogenaamde canonicke aanzichten te tekenen. Denk maar aan tekeningen van kisten, balken en latten, structuren die kwalitatief dezelfde visuele potentiaal hebben als een kubus. Ze verschillen slechts kwantitatief van de kubus in termen van de hoeveelheid draaiing in bepaalde richtingen die nodig is om een vlak te laten verdwijnen of verschijnen.

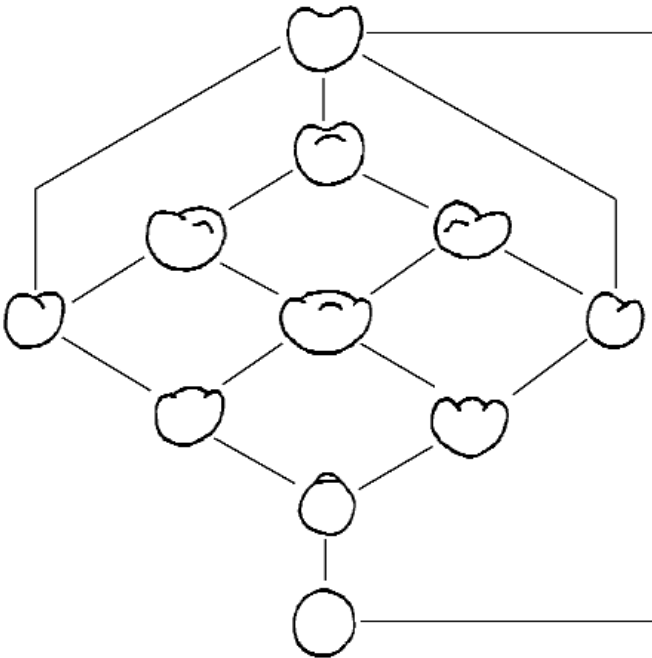


Figuur 12 De visuele potentiaal van een kubus. Vrij naar Koenderink en Van Doorn (1978.) Linksboven de letterconventie voor de vlakken (een alternatief zou de dobbelsteen kunnen zijn). Rechtsboven is een voorbeeld gegeven van de opeenvolgende aanzichten die enkele van de vele mogelijke draaiingen op zouden kunnen leveren. Bij iedere draaiing waarbij een catastrofe optreedt, gaan we in de onderste graf uit een cirkeltje naar een buurcirkeltje.

We zouden ons nu kunnen voorstellen dat een visuele potentiaal als neuronaal netwerk is gerealiseerd. De ‘cellen’ van de visuele potentiaal uit figuur 12 zouden dan kleine clusters neuronen kunnen zijn die de bijbehorende aanzichten herkennen. De lijnen tussen de cellen van de visuele potentiaal kunnen ook groepjes neuronen zijn, die kwantitatieve parameters coderen.

De gevolgde procedure kan worden toegepast op elk willekeurig object, door te kijken naar de verzameling singulariteiten van het hellingenvectorveld, zoals die in figuur 11 zijn aangegeven: de

rand, eindiging en T-kruising. Als voorbeeld geef ik in figuur 13 de visuele potentiaal van een tomaat volgens Koenderink en Van Doorn. Voor bijzonder complexe objecten, zoals een gedetailleerd uitgewerkt beeldhouwwerk, kan de visuele potentiaal zo ingewikkeld zijn, dat het onwaarschijnlijk is dat ons zenuwstelsel die volledig kan opbouwen. Zelfs de maker van het object zal er dan waarschijnlijk slechts fragmentarische herinneringen aan hebben. We kunnen het langste pad dat in de visuele potentiaal gevolgd kan worden zonder twee keer hetzelfde knooppunt te passeren, als maat nemen voor de complexiteit van een object. Voor de kubus is die 4, maar voor een ingewikkeld beeldhouwwerk kan die oplopen tot bijvoorbeeld 10^4 (Koenderink en Van Doorn, 1978). Men zou vervolgens empirisch kunnen nagaan welke complexiteit bepaalde organismen aankunnen. Hieraan is nog niet veel onderzoek gedaan.



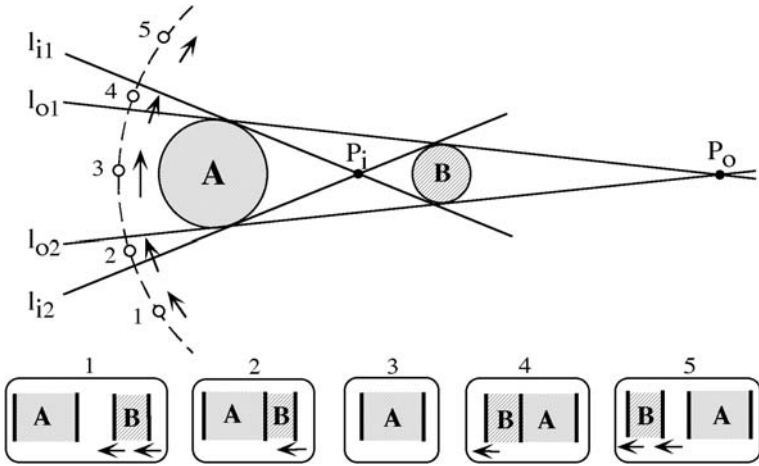
Figuur 13 De visuele potentiaal van een tomaat volgens Koenderink en Van Doorn. Voor een preciesere bespreking van dit type visuele potentialen, zie Koenderink en Van Doorn (1979) en hun in de tekst gerefereerde publicaties.

Tot dusverre hebben we ons in deze subparagraaf beziggehouden met de visuele waarneming van concrete vorm. De titel belooft echter dat ook de waarneming van abstracte concepten aan bod zal komen. Daarvoor staan we eerst nog even stil bij de verhouding tussen waarnemer en de waargenomen realiteit. Het realisme (zie hoofdstuk 4) gaat ervan uit dat er een werkelijkheid bestaat die onafhankelijk is van de menselijke geest, maar waarover de mens wel kennis kan vergaren. De aard van die werkelijkheid is hierbij nog onduidelijk, dat wil zeggen voorwerp van onderzoek, maar in elk geval maken waarnemers deel uit van de werkelijkheid waarover ze kennis verkrijgen via de zintuigen. Studie van de waarneming is dan studie van de mogelijke relaties tussen waarnemers en de werkelijkheid, inclusief henzelf. Zelfwaarneming is dus volgens het realisme mogelijk.

Direct realisme (de directe-perceptietheorie van Gibson e.a.) gaat ervan uit dat invarianten in de mogelijke relaties tussen waarnemer en omgeving direct kunnen worden waargenomen, omdat de waarnemer erop is afgestemd, er 'detectie-en-gebruiksmechanismen' voor heeft. Een invariant is een entiteit die onder bepaalde operaties, gebeurtenissen of handelingen onveranderd blijft. In de wiskunde zijn invarianten grootheden die bij bepaalde operaties, zoals spiegeling, draaiing en dergelijke onveranderd blijven. De natuurkundige wetten van de algemene relativiteitstheorie zijn invariant voor elke willekeurige (zinvolle) coördinatentransformatie. Wat met het begrip invariant in de directe-perceptietheorie bedoeld wordt, is niet altijd even duidelijk, maar we kunnen wellicht ervan uitgaan dat de door Koenderink en Van Doorn voorgestelde componenten van het hellingenvectorveld of van de geometrische 'optic flow' veldcomponenten hiervoor model kunnen staan. In feite neemt de waarnemer dus altijd abstracties waar, maar we neigen ertoe de oorzaak van de op deze abstracties gebaseerde waarneming 'concreet' te noemen (grootmoeder, huis, enzovoorts). We kennen ook 'abstracte' concepten, zoals getallen of operaties op symbolen. Kunnen we ons voorstellen dat die uit directe koppeling met de omgeving en invariantiedetectie ontstaan?

Beschouw als voorbeeld het direct waarnemen van zoiets abstracts als het begrip 'twee'. Wat hebben scènes met twee kopjes, twee broden of twee personen gemeen? Stel dat een waarnemer in een tuin staat met twee bomen en laten we voor het gemak aannemen dat de waarnemer maar met één oog kijkt en vrij kan bewegen.

De directe-perceptietheorie gaat altijd uit van actieve waarnemers, dat wil zeggen van waarnemers die exploreren. Als de waarnemer in de tuin gaat exploreren door om de bomen heen te lopen, zoals aangegeven in figuur 14, dan kunnen we globaal aangeven wat hij zal zien.



Figuur 14 (Gemodificeerd naar Van de Grind, 1990; gebaseerd op werk van Koenderink en Van Doorn.) Een abstracte waarnemer, dat wil zeggen een waarnemingspunt, beweegt door de ruimte en pikt informatie op over tweeheid. Beschouw als voorbeeld pad 1-2-3-4-5 van het waarnemingspunt (boven) en de consequenties voor de relatieve posities van de objecten A en B in het visuele veld (onder). De binnenste en buitenste raaklijnen aan A en B definiëren een ruimteverdeling. Wanneer het waarnemingspunt zo'n raaklijn passeert, treedt er een visuele catastrofe op. De volgorde en aard van de catastrofes definieert tweeheid. Vergelijkbare beschouwingen gelden voor andere paden door de ruimte. Tweeheid is een waarneembare entiteit (een 'perceptible'), een hogere-orde variabele, dat wil zeggen een invariant in de interactie tussen mobiele waarnemer en omgeving.

Bekijk de visuele gebeurtenissen tijdens het passeren van een paar punten van de paden 1 t/m 5:

1. A en B worden gescheiden gezien, er zijn twee paar contouren en ieder paar is door boomtextuur verbonden. De twee paren bewegen naar elkaar toe terwijl de waarnemer zijn pad vervolgt.

2. Bij het passeren van lijn l_{i_2} treedt fusie op van twee van de vier contouren en t.g.v. toenemende occlusie (afdekking) zal textuurdeel B krimpen.
3. Na het passeren van lijn l_{o_2} (in werkelijkheid is dit een 'vlak', maar in het bovenaanzicht zien we het als een 'lijn') is er perfecte occlusie, overlap, van B door A . Er zijn slechts twee contouren over en die blijven aanwezig zolang de waarnemer zich in het gebied rondom 3 en binnen de grenzen van l_{o_1} en l_{o_2} bevindt. In zo'n waarnemingscompartiment begrensd door de aangegeven vlakken (hier lijnen), is de perceptie stabiel, dat wil zeggen kwalitatief onveranderd. Alleen grootteverhoudingen veranderen, dat wil zeggen er treedt bij beweging binnen die grenzen slechts een kwantitatieve verandering op. Bij het passeren van lijn l_{o_1} treedt er een kwalitatieve verandering van het percept op, een zogenaamde visuele catastrofe.
4. Na deze visuele catastrofe van het opduiken (de disocclusie) van een contour van B bij het passeren van lijn l_{o_1} zijn er weer drie contouren en groeit B gestaag (kwantitatieve verandering, geen kwalitatieve).
5. Na het passeren van l_{i_1} , waarbij weer een catastrofe optrad, namelijk het opduiken van de vierde contour, wordt de tussenruimte tussen de twee door textuur bijeengehouden paren contouren groter. De objecten zijn perfect gesegregeerd (gescheiden).

Er is dus sprake van een zeer specifieke sequentie van visuele gebeurtenissen, catastrofes, die door occlusie en disocclusie worden veroorzaakt. Eenzelfde sequentie gebeurtenissen treedt op voor een baan tussen B en P_o door. Voor banen buiten P_o om treedt nooit perfecte occlusie van één van de bomen op, maar overigens verloopt de reeks gebeurtenissen op dezelfde wijze.

De twee binnenraakoppervlakken, hier gesymboliseerd door de raaklijnen l_{i_1} en l_{i_2} en de buitenraakoppervlakken, hier aangegeven door l_{o_1} en l_{o_2} geven een verdeling van de ruimte, een 'ruimtepartitie', waarbij overgang van compartiment naar compartiment gepaard gaat met een catastrofe. De ruimtepartitie is specifiek voor twee objecten en de mogelijke sequenties catastrofes zijn specifiek voor de waarneming van tweeheid. Informatie in de wereld, bij-

voorbeeld betreffende tweeheid, is dus in principe waarneembaar voor iedere mobiele waarnemer die erop is afgestemd en die alle mogelijke occlusie–disocclusie sequenties voor twee objecten als equivalentieklasse ‘twee’ opvat. Tweeheid is in die zin een invariantie in de verzameling waarnemer–omgeving interacties. We hebben die invariantie gevonden door van een abstracte puntvormige waarnemer uit te gaan. Er is dus een objectieve a priori decompositie van het waarneembare gegeven.

De waarnemer kan dit proces van perceptuele transformaties naar believen omkeren en herhalen, ermee experimenteren. Het proces van visueel afdekken en opduiken, van occlusie en disocclusie, is reversibel (omkeerbaar). Het geheel van verschijnselen is bovendien kwalitatief universeel voor alle gevallen van twee entiteiten en het is onafhankelijk van de aard van de bewegende waarnemer (mens, vlieg, konijn, robot). Met ander woorden, iedere waarnemer die de geschetste volgorde van occlusie en disocclusie kan interpreteren, die er detectie–en–gebruiksmechanismen voor heeft, kan ‘direct’ tweeheid zien.

Jonge kinderen spelen graag kiekeboe en we zouden ons kunnen voorstellen dat ze daarmee de perceptuele equivalentieklasse ‘twee’ opbouwen, leren ‘zien’. Ook de meeste dieren blijken direct verschillen in kleine aantallen objecten te zien en kiezen liever twee dan één, of liever drie dan twee beloningen. Het lijkt erop dat de grens voor het direct zien van aantallen rond de vijf à zeven ligt. Als we op dezelfde wijze als in figuur 14 proberen de mogelijke visuele gebeurtenissen in kaart te brengen voor bijvoorbeeld tien objecten dan ontardt het idee in onwerkbare complexiteit. Voor drie objecten gaat het in elk geval nog goed en je kunt je voorstellen hoe men de visuele waarneming kan helpen door voorsorteren in groepjes van twee of van drie objecten. Negen kan men dan direct zien als drie groepjes van drie objecten ieder. We zijn overgegaan van (grotendeels) directe perceptie naar algoritmische (grotendeels seriële) waarneming via een vorm van ‘tellen’.

Dit proces kan worden vereenvoudigd door coderen, door het invoeren van speciale symbolen voor groepen van twee (2) of drie (3) objecten, door het invoeren van symbolen voor het ‘bijeenvoegen’ (plusteken) en voor de mogelijke combinatiegroepen. Zo kunnen ‘cultuursymbolen’ en de daarmee opgebouwde rekenkunde zijn ontstaan uit perceptie. Cultuursymbolen zijn symbolen die relatief arbitrair gekozen kunnen worden en hun betekenis

ontlenen aan afspraken tussen mensen. Ze ontlene hun vorm en fysische aard niet aan de directe koppeling van een organisme met de wereld. Ze kunnen op een grote veelheid van manieren buiten het lichaam worden onthouden (op papier, in boombast, op magneetband of grammofoonplaat, enzovoorts). Het zijn in die zin vrij belichaambare symbolen.

Ook het zenuwstelsel onthoudt invarianten in symbolische vorm, immers een tafel die we gezien hebben is niet daarna als tafel in ons hoofd aanwezig, zelfs niet als tafelvormig activiteitspatroon in de neuronenvorm. Hij is opgeslagen in een neuronale code die verwijst naar betekenis voor gedrag, dus 'symbolisch'. Deze symbolische voorstelling is echter niet vrij te kiezen per afspraak tussen organismen. Er is sprake van een in het organisme dwingend verankerde code met een inherente betekenis voor het gedrag. We zouden kunnen spreken van 'organische' of neuronale symbolen. Een neuronaal symbool is dan een patroon van neuronale activiteit of van neuronale koppelingen dat door het zenuwstelsel direct of later gebruikt kan worden om organismale acties te initiëren, regelen of sturen.

3.3.3 *Direct waarnemen van aantallen en plaatjeswaarneming bij dieren*

Het interessante van de ecologische fysica is dat zij tracht de informatie die de wereld aan autonome bewegende systemen kan bieden diersoortonafhankelijk in kaart te brengen. Voor alle onderzoek met de diersoort als variabele (vergelijkende fysiologie) is dit een eerste vereiste. De suggestie uit §3.3.2 en figuur 14 dat lage aantallen direct gezien kunnen worden kan algemener gemaakt worden door de hypothese te formuleren dat dieren kleine aantallen kunnen waarnemen zonder te 'tellen', zonder algoritmische activiteit. Hoe goed zijn dieren daarin?

In de dierpsychologische literatuur wordt een nauwkeurig onderscheid gemaakt tussen 'tellen', waarbij sorteren in groepjes en markeren of nummeren een rol speelt, en een proces dat men in de Engelstalige literatuur 'subitizing' noemt. Hier zal ik 'subitizing' vertalen als 'direct waarnemen'. Dit ligt in principe zeker binnen het bereik van de mogelijkheden van vogels en de meeste landvertebraten. Mandler en Shebo (1981) en von Glasersfeld (1982) hebben dit proces van aantalwaarneming in detail bestu-

deerd en beschreven, Davis en Pérusse (1988) hebben een belangrijke review en theoretische analyse geschreven. Hier ga ik alleen kort in op werk samengevat door Davis (1996).

In zijn laboratorium heeft men aantalbegrip aangetoond voor een breed scala van vogels en zoogdieren, maar ze hebben zich vooral uitvoerig met de rat bezig gehouden. Davis heeft in dit verband overtuigend betoogd dat ratten aanzienlijk worden onderschat, wat vermoedelijk met de lage knuffelfactor van het dier te maken heeft. Ze konden aantonen dat ratten onderscheid kunnen maken tussen twee, drie of vier sequentieel aangeboden toontjes of aaitjes over de snorharen. De proefjes waren niet uitsluitend van het binaire soort, waarbij de vraag gesteld wordt of het dier kan vaststellen wat een kleiner of groter aantal is dan iets anders. Ze gebruikten ook opdrachten zoals: loop naar rechts bij een T-kruising en druk een hendel in als het aantal prikkels drie is, maar ga naar links zonder een hendel te drukken als het aantal twee of vier is. Ratten kunnen dat soort taken met bijvoorbeeld auditieve prikkels vrijwel perfect leren uitvoeren. Ook volume-invariantie bij visuele of geur/smaak aantalperceptie werd bestudeerd. De ratten werden daarbij getraind slechts een zeer bepaald vast aantal brokken voedsel te eten en dan de testruimte te verlaten. Die vaardigheid werd niet beïnvloed door de grootte, het volume, van de brokken.

Weer een andere proef bestond uit het trainen van de ratten om gang nummer x (x van 1 t/m 6, bijvoorbeeld voor een bepaalde rat 3) te kiezen van zes gangen in de testruimte. De gangen werden willekeurig verwisseld van dag tot dag (wat geurinformatie elimineert), ze werden veranderd qua kleur of geometrie en het geheel werd op steeds andere plaatsen in de testruimte gezet. De dieren moesten dus wel de enige invariantie leren die de situatie had, namelijk het volgnummer van de gang, en bleken dat prima te kunnen. Bovendien hadden de onderzoekers het nog extra moeilijk gemaakt door de dieren te trainen slechts een vast aantal proeven achter elkaar mee te doen, bijvoorbeeld twee of drie, en dan uit zichzelf terug te keren naar hun woonverblijf. De dieren kunnen dat zonder veel moeite. De tunnelnummerproef bleken ze bovendien heel lang te onthouden, want als de dieren twaalf tot achttien maanden later (een groot deel van hun levensduur) nog eens werden getest, bleken ze de proef nog steeds goed te doen.

Een ander interessant aspect van de suggestie uit figuur 14 op basis van werk van Koenderink en Van Doorn over het direct zien van tweehed is het volgende. De beroemde Nederlandse wiskundige L.E.J. Brouwer heeft in het begin van deze eeuw al aangegeven hoe volgens hem de reeks van natuurlijke getallen opgebouwd is vanuit het intuïtieve concept tweehed. Hij zag de oorsprong van het concept tweehed weliswaar nogal anders dan de ‘kiekeboe’-suggestie uit figuur 14, maar dat doet aan de kennelijke kracht van dat concept natuurlijk niets af. In de huidige context ondersteunt het in elk geval de gesuggereerde mogelijkheid dat uit de directe perceptie van een abstract concept als ‘tweehed’ de gehele wiskunde ontstaan kan zijn. De wiskunde zou daarmee een empiristische (op de ervaring gebaseerde) basis krijgen als tweehed een geleerd concept zou zijn en een nativistische basis als tweehed een door de evolutie in veel dieren voorgegeven ordeningsconcept zou blijken te zijn. Het idee van de opbouw van de wiskunde met behulp van sorteerhandelingen en bijbehorende symbolsystemen is natuurlijk alleen bij de mens ontstaan, maar de rudimenten van de wiskunde zijn kennelijk op grotere schaal aanwezig in het dierenrijk. Het lijkt er dus op dat de meeste dieren alleen via directe waarneming (subitizing) in staat zijn het aantalbegrip te hanteren. Hieruit zien we eens te meer hoe antropomorf de gedachte was dieren te leren rekenen als een mens, zoals we dat voor slimme Hans en slimme Lumpi zagen in hoofdstuk 1. Niet alleen rekenen gaat te ver, ook tellen is meestal te hoog gegrepen. Er is alleen enige suggestieve evidentie voor bij chimpansees (Boysen e.a., 1995).

Ten slotte iets over plaatjes zien bij dieren in aansluiting op de vorige secties betreffende actieve waarneming. Pogingen om dieren te leren de informatie van plaatjes of films te gebruiken voor het sturen van handelingen, zoals het verdienen van een beloning, zijn vrijwel allemaal op niets uitgelopen. De meeste dieren kunnen niet met platte plaatjes, films en dergelijke omgaan. Ze kunnen kennelijk niet afzien van het feit dat de inhoud van de plaatjes en films niet causaal samenhangt met hun eigen exploratieve bewegingen. Dat hadden we uit Gibson’s theorie ook precies verwacht, omdat visuele systemen in de eerste plaats geëvolueerd zijn in de context van driedimensionaal zien in de echte wereld, waarbij de eigen beweging steeds de visuele informatie beïnvloedt. Onze huiskatten en -honden vormen, ondanks de gelegenheid tot gewenning, geen uitzondering op de regel. De kat wil nog wel

eens een beweging op het scherm zien en ernaar slaan (ook als het een jumbojet is). Zowel de kat als de hond lijken wel sommige geluiden van film en televisie correct te interpreteren. Echter veel verder rijkt hun televisiegenieten niet. Ze kunnen geen handelingen volgen en interpreteren, ook niet de meest vertrouwde zoals de baas die op de televisie zijn jas aantrekt en de hondentriem pakt (zonder geluid). Mogelijk moeten we het nog eens proberen als de 'virtual reality'-technologie verder gevorderd is en kunnen we daarmee beeldinformatie overbrengen naar het interpreterend brein van onze geliefde huisdieren.

Na deze teleurstellingen over het plaatjes en film zien van dieren was het des te verrassender toen gevonden werd dat veel vogelsoorten, maar in elk geval duiven, zeer goed zijn in plaatjes zien. Richard Herrnstein was in de zestiger jaren de eerste die duiven naar plaatjes (dia's) liet kijken, en hen in staat stelde zelf te leren categoriseren wat tot een beloning leidde en wat niet. (Voor een overzicht zie: Herrnstein, 1984.)

Bij een van de proeven werd gewerkt met afbeeldingen van bomen. Als ze bijvoorbeeld uit een paar plaatjes het plaatje kozen waarop een boom te zien was, werden ze beloond en voor de keuze van een plaatje zonder boom niet. De duiven bleken dat goed te kunnen leren, wat suggereert dat ze het abstracte concept boom kunnen hanteren in zulke taken. De negatieve plaatjes bevatten vaak sterk op bomen lijkende foto's van bijvoorbeeld groente, telefoonpalen, staande schemerlampen, televisieantennes en dergelijke, terwijl de positieve plaatjes allerlei soorten bomen of delen van bomen konden bevatten. De duiven hadden weliswaar een relatief lange training nodig met honderden plaatjes, maar werden er dan ook zo goed in dat de fouten vaak bestonden uit categorisatiefouten van de onderzoekers. Als de duif aangaf dat er een boom op de dia te zien was, terwijl de onderzoeker meende dat dit niet het geval was dan bleek in een aantal gevallen bij nader inzien dat er nog ergens een boomtak door het beeld liep of er een bijna geheel verborgen boom in een onopvallend deel van de foto stond. Bij de echte vergissingen betrof het dan vooral televisieantennes of andere op bomen lijkende palen.

De kritiek op dit werk luidde dat bomen wel een erg gemakkelijke, mogelijk zelfs aangeboren, categorie was voor duiven. Hoewel dit mijn verbazing niet minder maakt, duidt het natuurlijk op

het verschil tussen aangeboren en geleerde categorisatie. Vervolgens deden Herrnstein en medewerkers daarom een experiment waarbij de duif moest aangeven of hij een dia al eerder had gezien of niet.

Grote aantallen foto's werden eerst getoond en daarna werden foto's uit deze serie steeds gepaard met een nieuwe foto. De foto's waren zo gevarieerd mogelijk, van vakantie- en portretfoto's tot stillevens. Een duif werd dan hetzij consequent beloond voor het kiezen van de nieuwe of van een al eerder getoonde foto. Vervolgens bleken de dieren als ze dit spelletje door hadden in staat van honderden foto's te onthouden dat ze die al gezien hadden, zelfs over relatief lange perioden. Natuurlijk leerden ze dit wat moeizamer en was hun foutenpercentage wat groter dan bij het bomenonderzoek, maar toch.

Inmiddels zijn er experimenten gedaan met de vreemdste categorisaties. De duiven kunnen leren plaatjes met iets roods te verkiezen boven andere, of plaatjes met planten boven plaatjes zonder planten, plaatjes van een bepaalde persoon met zeer bepaalde kleding boven plaatjes van andere personen met dezelfde kleding of dezelfde persoon met andere kleding, en ga zo maar door. Het blijkt moeilijker voor duiven om tekeningen te hanteren dan foto's.

Hoe passen zulke bevindingen nu bij het idee dat platte plaatjes zoveel moeilijker voor dieren zouden zijn dan echte driedimensionale scènes? Vermoedelijk ligt het antwoord in de normale dier-habitat interactie. Vogels, zoals duiven, vliegen hoog genoeg om het landschap als vrijwel plat te zien en ze moeten zulke reliëf-arme bovenaanzichten kunnen onthouden om hun hok terug te vinden. Duiven cirkelen boven hun hok voor ze wegvliegen, vermoedelijk om zich de omgeving van het hok in te prenten. Werk in ons laboratorium door Dr. J.F.W. Nuboer en medewerkers toonde aan dat zelfs relatief kleine verplaatsingen van het hok, bijvoorbeeld over enkele tientallen meters, vrij catastrofaal zijn voor duiven die op dit soort verplaatsingen niet uitgebreid getraind zijn. De dieren vliegen langs relatief duidelijke en vaste landschapskenmerken op hun hok aan. Ze strijken op de plaats neer waar het hok stond toen ze uitvlogen, en blijven daar desnoods dagen rondscharrelen zonder naar de nieuwe plaats te gaan, zelfs al is die direct te zien. Voor het onthouden van hun woonplek lijken ze een soort luchtfoto te gebruiken. Zo zouden foto's voor duiven

en andere navigerende vogels wellicht veel gemakkelijker leer materiaal kunnen zijn dan voor niet-vliegende dieren zoals katten en honden, varkens en paarden. Wat ook de waarde van deze specifieke redenatie is, het is vanuit biologisch oogpunt zeker dat dieren in het algemeen waarnemingsvermogens en denkvermogens hebben die afgestemd zijn op hun eigen wijze van leven in hun eigen habitat. Daarin moet de verklaring liggen voor aan- of afwezigheid van het vermogen plaatjes te zien, vermogen tot schatting van aantallen of zelfs tellen, geluidscommunicatie of symboolgebruik.

3.3.4 *Is de perceptuele ruimte Euclidisch?*

Grotere vertebraten leven langer en kunnen sneller bewegen dan kleinere vertebraten, dus zullen ze een grotere ruimte doorkruisen tijdens hun leven. De ruimtebeleving zou dus wel eens schaalafhankelijk kunnen zijn, verschillend voor grote en voor kleine dieren. De massaverhouding tussen het lichtste autonoom levende organisme, het mycoplasma, en het zwaarste, de sequoiaboom, is tien tot de eenentwintigste! De mens en de meeste andere zoogdieren zitten verhoudingsgewijs vrij dicht bij de bovengrens. In de evolutie is een zeer sterke tendens naar groter worden met de tijd. Latere soorten zijn meestal groter dan eerder ontstane soorten. Bovendien neemt met toenemend gewicht het aantal cellen toe en ook het aantal verschillende soorten cellen. De systemen worden ingewikkelder. Allerlei interne regelsystemen houden de organismen in stabiel evenwicht ondanks fluctuaties in de omgeving. Voor dieren noemen we het geheel van deze interne regelingen homeostase.

De universele wetmatigheden van de natuurkunde werken op die verschillende schalen geheel anders uit. Wat geldt voor het zwemmen van paramecium geldt niet voor het zwemmen van de walvis en omgekeerd. Wat geldt voor denken en doen van de mens kan niet gelden voor de mier, zoals Frits Went (1968) overtuigend betoogde (zie §5.1.2). Schaal is kritisch. Niet iedere fysische wetmatigheid is op iedere schaal van leven even relevant! Hoewel de relativiteitstheorie bijvoorbeeld net zo goed geldt voor paramecium als voor de mens is de kromming van de ruimte voor beide soorten even irrelevant in hun normale dagelijks bestaan ver van zwarte gaten of pulsars. Dat betekent dat voor de zenuwstelsels van

aardse dieren de klassieke natuurkunde en de Euclidische meetkunde *voldoende* kennispakketten zouden kunnen zijn om met hun wereld om te gaan. Zijn die gereedschappen echter wel volledig *noodzakelijk*? Welke ruimte- en tijds kennis worden door het zenuwstelsel van allerlei dieren precies gebruikt en is die kennis aangeboren of aangeleerd of van allebei een beetje? Uiteraard verwachten we hier weer een soort gradatie naar complexiteit van de soort. Hoe complexer een levend systeem is, hoe meer mogelijkheden er zijn om slimme mechanismen te hebben voor omgang met de wereld. Enigzins simplificerend kan men de evolutie van dieren zien als een strijd voor toenemende autonomie, toenemende onafhankelijkheid van de omgeving met al zijn onverwachte en veelal onaangename verrassingen (§1.4.3). De leefwereld oftewel habitat van vrijwel alle dieren heeft een mozaïekstructuur (Waterman, 1989). Immers, de beste plekken om voedsel, drinken of bescherming te zoeken, of om te slapen, om voort te planten of te spelen, zijn in het algemeen verschillend. Dat maakt navigeren tot vitaal belangrijk gedrag. Navigeren vereist ruimtekennis en goede ruimtelijke waarneming. Er zijn nogal wat dieren die daarin bijzonder bedreven zijn en prestaties leveren die de mens zonder navigatiegereedschappen niet gemakkelijk na zou kunnen doen. Vaak zijn dat dieren die regelmatig migreren.

Een migratiekampioen is ongetwijfeld de Noordse stern. Deze vogel broedt in Groenland tijdens onze zomer en overwintert in Antarctica. Het dier legt alleen al voor deze migratie zo'n 30.000 tot 40.000 km per jaar af! De afstand is afhankelijk van de gevolgde corridor. Geringde dieren keren steeds met grote precisie naar hun woonplaats van het vorig seizoen terug. Als we ons voorstellen dat wij dat zouden moeten doen zonder hulpmiddelen zoals kaarten, vervoersmiddelen, sextanten, kompas, klok, radiobakens, electronica of taal, dan zien we hoe groot die prestatie is. Allerelei dieren kunnen *kompasnavigeren*, *navigeren met geïst bestek* of *loodsen*.

Bij *kompasnavigatie* wordt de hoek tussen de locomotierichting en een referentierichting oftewel kompasrichting konstant gehouden. Het vereist dus het vermogen een vaste lichaamsoriëntatie aan te houden ten opzichte van de referentie en een kompasrichting te meten. Als kompas kan elke relatief grootschalige meetbare (waarneembare) gerichte grootheid dienen. Het aardmagneetveld lijkt voor de hand te liggen omdat zeevaarders en padvindende dieren het gebruiken, maar in de rest van het dierenrijk wordt het relatief zelden gebruikt. Hemellichamen als de zon of andere sterren kun-

nen goed dienst doen als kompas en worden vaak gebruikt voor navigatie. Hiertoe moet het organisme kunnen tijdcompenseren voor de schijnbare beweging van de referentierichting (zon of sterrenbeeld) ten opzichte van het reisdoel.

Gegist bestek ('dead reckoning') houdt in dat afgelegde trajecten vanaf één of ander beginpunt worden geschat qua richting en lengte en dat de vectorsom van die trajectvectoren wordt vergeleken met de vector die het beginpunt met het gewenste doel verbindt. Uit die vergelijking wordt – soms rekening houdend met obstakels of gevaarlijke gebieden – de richting en eventueel lengte van het eerstvolgende traject bepaald. Onze zeevarende voorouders gingen ongeveer zo te werk, maar ze gebruikten kaarten en meetinstrumenten als hulpmiddel. Ze pasten bijvoorbeeld de trajectvectoren op een kaart af, probeerden afgelegde afstanden met behulp van meetinstrumenten te schatten, bepaalden de positie met sextant en kennis van de sterrenhemel. Ze gebruikten dus methoden die we bij dieren niet zonder meer mogen aannemen. Hoe stellen we ons gegist bestek zonder instrumenten voor? Als we een stad in een bepaalde richting willen doorkruisen en tengevolge van de bebouwing allerlei omwegen moeten volgen houden we ruwweg de afgelegde trajectvectorsom in het hoofd bij om onze volgende richtingkeuzes te vergemakkelijken. Veel dieren kunnen dit even goed of beter dan wij. Men noemt dat meestal 'padintegratie' of 'trajectintegratie'.

De woestijnmier *Cataglyphis* bijvoorbeeld kan op ingewikkelde wijze over het woestijnzand van z'n holletje weglopen op zoek naar voedsel en vervolgens de kortste weg naar de uitgangspositie terugnemen. Dat dit niet aan de hand van bakens gebeurt kan men vaststellen door het dier, zodra het voedsel gevonden heeft, met dit voedsel en al te verplaatsen. De mier compenseert daar niet voor en rent in de vectorrichting die door de hypothese van trajectintegratie wordt voorspeld tot het de vectorlengte heeft afgelegd en het nest niet vindt. Het dier schakelt dan op een systematische zoekstrategie over, waarbij het in steeds groter wordende cirkels om de vectorpuntpositie gaat rondrennen. De lengte van de trajecten worden uit de loopbewegingen geschat en de geschatte richting en afstand naar het holletje lijken voortdurend beschikbaar, zodat het dier snel terug kan als het te heet wordt of als het voedsel gevonden heeft. De woestijnomgeving is arm aan bakens en erg veranderlijk, zodat de woestijnmier sterk van trajectintegratie afhankelijk is.

Loodsen is navigeren door bekend gebied, waarbij het organisme moet weten hoe het via bepaalde routes van A naar B komt. Het moet opeenvolgende positieaanwijzingen (bakens) gebruiken (dus kennen) om te bepalen in welke richting en over welke afstand het bij de opeenvolgende bakens verder gaat. Om te kunnen loodszen moet een dier dus een soort routebeschrijving in het zenuwstelsel hebben. Het dier moet dus (1) bakens herkennen (hetgeen vormherkenning en geheugen vereist); (2) het eigen lichaam ten opzichte van die bakens een bepaalde stand geven (hetgeen ego-oriëntatie vereist); (3) met behoud van die oriëntatie een volgend deel van het traject afleggen (hetgeen koershouden en een soort meting van afgelegde afstand vereist).

Loodszen vereist natuurlijk voortdurend leren, anders zou een dier bij kleine wijzigingen van de leefomgeving de weg kwijt raken. Bovendien is een puur sequentiële routebeschrijving waardeloos zodra je van de route raakt, wat in de natuur gemakkelijk kan tengevolge van wind of stroom, gevaar of andere afleiding. Vele dieren hebben dus vermoedelijk steeds meer dan één routebeschrijving beschikbaar of zelfs een cognitieve kaart. Dit laatste is een zodanig ruimtelijk inzicht in de bakens, routes, en hun spatiële relaties, dat het mogelijk wordt zonder zoekgedrag correcties te bepalen, die het verdwaalde organisme weer op een bekende route brengen. Loodszen vereist dus al direct een vrij complex zenuwstelsel, dat routes kan onthouden of cognitieve kaarten kan opstellen en modifieren. Er is voldoende evidentie voor cognitieve kaarten bij hogere vertebraten. Arthropoda zoals onze woestijnmier kunnen vermoedelijk met padintegratie volstaan.

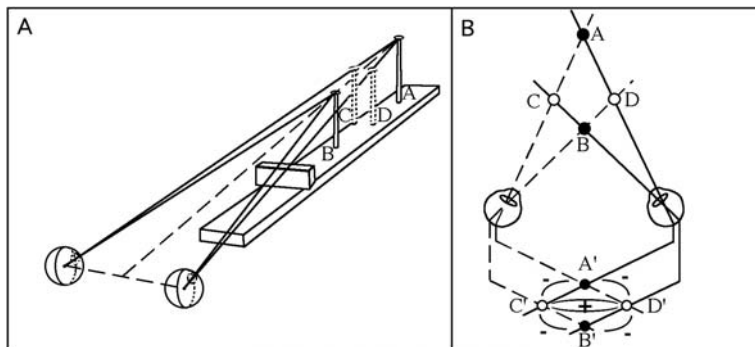
Zowel eekhoortjes als vele soorten vogels kunnen voedsel verstoppen en het later feilloos terugvinden, soms op honderden plaatsen in een vrij groot gebied. Vele diersoorten verstoppen hulpeloze jongen in geval van nood en vluchten weg. Als ze later terugkomen, gebeurt dat vaak via geheel andere routes dan de vluchtroute en gaan ze recht op de verstopplaats af, zelfs in onbekend terrein. Men neemt daarom aan dat deze diersoorten geografische kennis kunnen hanteren op een flexibeler manier dan met behulp van geleerde routebeschrijvingen alleen mogelijk zou zijn, dat wil zeggen dat ze cognitieve kaarten hebben. Omdat dieren die voedsel verstoppen zelden teruggaan naar plaatsen waar ze het voedsel al eerder hebben opgehaald, moeten ze hun kaart kunnen aanpassen, kunnen onthouden waar ze al geweest zijn. Exploratie van nieuwe gebieden vereist dat zulke kaartkennis op-

nieuw opgebouwd kan worden. Dieren zijn goed in het hanteren van geografische informatie. Ze kunnen zelfs actief bakens uitzetten, zoals bij ons de ANWB de bekende paddestoeltjes, maar dan veelal in de vorm van bijvoorbeeld chemische merktekens, die regelmatig ververst moeten worden, zoals de geurvlaggen van de hond.

Uit dit soort overwegingen volgt dat ruimtekennis van een hoger abstractieniveau vooral te verwachten is bij dieren van voldoende afmetingen en autonomie. Alle vertebraten kunnen goed navigeren en ze oriënteren zich actief met behulp van grootschalige fysieke velden, zoals lichtgradiënten, de sterrenhemel, magneetveld of zwaartekrachtsveld. In §3.1.3 hebben we al gezien dat vrij veel ruimtekennis aangeboren is (Kant's a priori kennis). Deze aangeboren kennis kan nog niet metrisch correct zijn. Immers bij binoculair of binauraal richting- en afstandschatten moet de oogafstand of de oorafstand bekend zijn en die is afhankelijk van allerlei toevallige groeiprocessen. Er zal dus postnataal voortdurend gekalibreerd moeten worden tijdens de groei van het hoofd. Daarbij kunnen er tijdelijk ook verschillen optreden tussen de metriek van het visuele, het auditieve, het haptische en andere sensorische systemen. Aangeboren ruimtekennis zal dus eerder van topologische dan van meetkundige aard zijn. Het zenuwstelsel kan objecten in de wereld ordenen volgens positiebepalingen als meer naar links of naar rechts, meer naar boven of beneden, verderweg of dichterbij. Hoeveel meer naar links enzovoorts, de metriek, zal dan tijdens spelend oefenen worden geleerd en voortdurend worden aangepast aan de groei van het organisme. Tijdens de ontogenese zou zodoende een soort metriek kunnen ontstaan en kan men spreken van meetkundige kennis in het zenuwstelsel.

Voldoen de waarnemingen met de diverse sensorische systemen dan aan de wetmatigheden van de klassieke Euclidische meetkunde? Een eenvoudig proefje bij de mens maakt dit in algemene zin onwaarschijnlijk. Het proefje toont dat de waargenomen positie van een object in de ruimte afhankelijk kan zijn van de aan- of afwezigheid en de positie van een ander object. Dit betekent dat de perceptuele ruimte geen onveranderlijke Euclidische ruimte kan zijn. Het proefje heeft betrekking op het menselijk binoculair zien. Als twee spijkers achter elkaar in een latje worden geslagen zoals in figuur 15 is gesymboliseerd en men houdt het latje zo voor de ogen dat de spijkers in het zogenaamde midsaggitale vlak liggen (het links-rechts symmetrievlak van het

hoofd), dan ziet men de spijkers naast elkaar in plaats van achter elkaar. Dit is de tweespijkerillusie van Krol en Van de Grind (1980).



Figuur 15 De tweespijkerillusie van Krol en Van de Grind (1980) toont aan dat de perceptuele ruimte van het menselijk binoculair zien niet, of in ieder geval niet steeds Euclidisch is.

Haalt men één spijker weg dan ziet men de andere op de juiste plaats in de ruimte, die men feilloos kan aanwijzen. Bij de twee spijkers wijst men echter midden tussen de spijkers, als gevraagd wordt aan te wijzen waar ze staan. De verklaring die Jodi Krol en ik hiervoor gaven in termen van de coöperatie tussen binoculaire neuronen is symbolisch aangegeven in de figuur. Als cellen die naar gelijke afstand kijken elkaar helpen (faciliteren) en cellen die naar verschillende afstanden kijken elkaar remmen, zullen die cellen 'winnen' die specifiek zijn voor de situatie 'naast elkaar' (zie figuur). Zonder op dit soort zaken verder diep in te willen gaan, maak ik met dit voorbeeld hopelijk voldoende duidelijk dat er in het algemeen geen sprake is van een nette Euclidische ruimte in de binoculaire perceptie. In welke zin waarnemingen Euclidisch zijn of niet is een empirische vraag. Het is in elk geval overduidelijk dat dieren complexe ruimtekennis en ruimtewaarneming kunnen vertonen, en dat de aard van die kennis onderwerp van natuurwetenschappelijk onderzoek is. Het stadium van vrije speculaties is voorbij.

3.4 Mogelijkheden tot neuroreductie in het kader van diverse perceptietheorieën

3.4.1 Elementarisme en neuroreductie

Zoals eerder al is toegelicht, ging het elementarisme uit van het idee dat perceptie begint met elementaire energiestootjes, die vervolgens worden geassocieerd tot patronen, waarvan de complexiteit in de opeenvolgende verwerkingsstappen steeds toeneemt. Zo meende men dat stereozien begint met de signalering van vele retinale lichtpuntjes van verschillende intensiteit (zo ongeveer als in een camera), die in volgende verwerkingsstappen tot een patroon voor linker- en rechteroog werden verwerkt. Daarna zouden de patronen links en rechts worden herkend en gecombineerd tot een stereopercept door te letten op bepaalde verschillen tussen de twee beelden, de dwarsdispariteit. Gebleken is echter, dat dwarsdispariteit direct wordt bepaald op het eerste station (de visuele cortex) waar neuronen een receptief veld in ieder oog hebben, ver voor en onafhankelijk van enige vorm van patroonherkenning. Dit is dus nogal verschillend van het beeld dat Berkeley over het tweezigig ruimtezien had (zie §3.1.3). Als men zich een stap voor stap verder gaande verwerking in opeenvolgende visuele stations voorstelt, zoals in het elementarisme, stuit men uiteindelijk op het eindstation dat percipieert, de homunculus. Tot daar is er nog geen perceptie, maar voorbereiding. Dit is een vervelende bijkomstigheid van het ‘bottom-up’ model. Men kan hier tegen argumenteren dat al de eerste vertaling van lichtenergie in een neuronaal signaal in de retinale receptoren uitgaat van contrast en niet van lichtenergie. Gesignaleerd wordt hoeveel meer of minder licht er is ten opzichte van even eerder of ten opzichte van buurgebieden. Direct aan het begin al gaat het dus om patronen in plaats van energie. Misschien is de homunculus dus wel verdeeld over alle stations? We gaan hier in hoofdstuk 4 nader op in.

Het is niet principieel strijdig met het elementarisme dat de visuele informatieverwerking begint met contrastinformatie in plaats van lichtenergetische aspecten of dat dispariteitsverwerking vooraf gaat aan patroonherkenning en niet omgekeerd, het was alleen niet de ‘eerste gok’ van elementaristen. Toen ontdekt was dat retinale receptieve velden een centrum-omgeving antagonistische vertonen, werd vanuit de elementaristische traditie gevraagd welke contrastvormen ‘elementair’ zijn, wat de ‘tekens’ van de

contrasttaal zijn. Een neuronale weegfunctie (zoals een ‘difference-of-Gaussians’ of DOG-functie, die er in 2D-doorsnede als een Mexicaanse hoed uit ziet), waarmee de binnenkomende beelden worden geconvolveerd (zie §4.1), leek voor de hand te liggen. Maar, hoe bouw je daaruit het beeld van tante Bep op? Omdat men de DOG-functie als kenmerk (pulsresponsie) van lineaire filters kan opvatten, bestudeerde men de spatiële en temporele filterkarakteristieken zowel psychofysisch, voornamelijk bij mens, kat en aap, als neurobiologisch bij een groot aantal andere diersoorten. Dit heeft veel inzicht opgeleverd, zoals diverse modellen voor aspecten van het contrastzien of van contrastillusies. Het probleem bleef echter hoe uit deze elementen ooit een driedimensionaal beeld van de werkelijkheid kan ontstaan.

Ondanks alle nadelen vanuit filosofisch oogpunt (homunculus-probleem) is in de traditie van het elementarisme met grote voortvarendheid ‘bottom-up’ verder gewerkt en zijn alle nieuwe bevindingen van de neurowetenschappen er stap voor stap in verwerkt. De verschillen tussen deze en de andere twee besproken perceptietheorieën zijn dan ook duidelijk kleiner geworden door de toenemende hoeveelheid kennis over de neuronale verwerkingsmechanismen van het visuele systeem en de behoefte tot neuroreductie. Het stijlverschil blijft, dat wil zeggen elementarisme blijft ‘bottom-up’ en richt zich dus steeds weer op de vraag wat zijn de elementaire bouwblockjes (perceptieatomen) en hoe worden die samengevoegd (tot perceptiemoleculen) om de puzzel op te lossen en het patroon te zien.

3.4.2 Gestalt-theorie en neuroreductie

In een klassiek geworden artikel werd door Lettvin, Maturana, McCulloch en Pitts (1959) bericht over hun studie met microëlectroden aan individuele cellen in het tectum opticum van kikkers. Ze vonden daar neuronen die vooral gevoelig waren voor vliegachtige objecten die door het receptieve veld werden bewogen en ze noemden deze neuronen ‘bug’-detectoren. Het idee dat ecologisch zinvolle brokjes informatie als geheel zouden worden opgepikt door individuele neuronen, sloeg aan en men noemt dit type cellen wel ‘gnostische’ (kennende, wetende) neuronen. Dit sloot goed aan bij de Gestalt-traditie, het primaat van samengestelde brokjes informatie. Hubel en Wiesel ontdekten korte tijd later

(voor een overzicht: zie Hubel, 1988) lijn- en randdetectoren in de visuele cortex van katten en apen, en dat maakte het als het ware mogelijk een relatie te leggen tussen Gestalt en elementen. Men zag een lijndetector als een cel die signalen sommeert uit een klein groepje op een lijn liggende retinale neuronen die ieder op zich cirkelvormige kleine receptieve velden (DOG-profiel) hebben. Een lijn bestond dus als het ware ook neuronaal uit een verzameling punten, al waren punten en lijnen dan in het brein wat grover dan hun oneindig kleine respectievelijk dunne partners in de wis-kunde.

Later beargumenteerden andere elementaristische onderzoekers dat niet lijnen maar Fouriercomponenten de basiselementen waren waarmee een soort corticale 'schets' werd opgebouwd. Corticale cellen reageren inderdaad goed op sinusrasters, zoals voor deze theorie vereist is (DeValois & DeValois, 1988). Zowel uit sinussen als uit lijnstukjes kun je complexe patronen opbouwen, zoals een schets van het gezicht van grootmoeder. Het elementarisme was dus ook compatibel met gnostische neuronen als grootmoederdetector of vliegdetector in 'hogere' visuele centra. De gnostische-neuronentheorie leek dus een interessante mogelijkheid om zowel Gestalt-aanhangers als elementaristen tevreden te stellen. Toch was er vanaf het begin vrij veel tegenstand, uit elementaristische hoek bijvoorbeeld omdat men het a priori waarschijnlijker achtte dat het visuele systeem een soort Fourier-spectrum van patronen berekent en die spectra vergelijkt met 'template-spectra' ter herkenning en classificatie. Ook Gestalt-onderzoekers waren sceptisch, omdat de gevonden 'gnostische' neuronen niet geweldig goed aansloten bij de Gestalt-wetmatigheden en de 'bottom-up' verklaring in termen van punt- en lijndetectoren of sinusrastergevoelige cellen niet goed aansloot bij hun ideeën.

Tot verbazing en ontsteltenis van de tegenstanders van de gnostische neuronentheorie werden er in de loop der jaren steeds meer complexe visuele patroonherkenningsdetectoren gevonden en een toenemend aantal commandoneuronen in het motorische systeem van verschillende diersoorten (hoofdstuk 4). In de cortex van primaten vindt men gebieden met cellen die vrijwel uitsluitend reageren op gezichten, en dit klopt aardig met bevindingen van neurologen dat lesies in corresponderende gebieden van de menselijke cortex tot gezichtsblindheid (prosopagnosie) leidt. De gnostische neuronentheorie maakt ook begrijpelijk waarom we zo gemakkelijk gezichten of andere zinvolle patronen menen te zien in bijvoorbeeld behang of wolkenformaties (§3.2.3). De ho-

munculus is ook mooi versplinterd in deze theorie en verspreid over het gehele sensorium in de vorm van allerlei gespecialiseerde detectoren (subhomunculi).

De Gestalt-theorie heeft vooral veel aandacht besteed aan het zien van beweging. Men kon al vroeg aantonen dat beweging een primair percept, een Gestalt, is en niet het gevolg van een neuronale berekening 'afstand gedeeld door tijd' of 'afgeleide van afgelegde weg als functie van de tijd'. De elementaristische intuïtie was hier anders, volgde de fysische definitie van beweging. Gestalt-psychologen hebben dan ook zeer veel werk gedaan aan schijnbare beweging ('apparent movement'), waarbij een flits op positie A ten tijde t_1 gevolgd door een flits op positie B ten tijde t_2 leidt tot het zien van vloeiende beweging, wanneer afstand en tijdsinterval aan bepaalde voorwaarden voldoen. Dit soort onderzoek bleek en passant nuttig voor de ontwikkeling van technologische systemen als film, lichtreclames en televisie.

Dat men twee in plaats en tijd gescheiden flitsen als beweging ervaart, pleit volgens Gestalt-aanhangers voor heat bestaan van een aparte module die deze Gestalt (beweging) oppikt, en met name van belang is voor detectie van gemeenschappelijke (coherente) beweging ('common fate'). Een belangrijk argument vormden ook de naeffecten die beweging suggereren nadat men enige tijd onafgebroken naar een waterval of optocht gekeken heeft, of vanuit de trein naar een voorbijtrekkend landschap (Verstraten e.a., 1995). Dit duidde op een apart verwerkingssysteem voor bewegingsinformatie, vergelijkbaar met aparte kanalen voor kleur (kleurennabeelden). Het was dan ook zeker een triomf voor de Gestalt-visie, toen bleek dat in het visuele systeem van insecten neuronen bestaan die op dezelfde wijze op schijnbare beweging en op vloeiende beweging reageren, als de hypothetische bewegings-Gestalt-detectoren. Die bewegingsdetectoren zijn later ook in allerlei vertebraten gevonden. Ze zijn neurobiologisch het meest uitgebreid bestudeerd bij katten en apen enerzijds, en bij vliegen anderzijds. Zo'n bewegingsdetector kan men opvatten als een schakeling om te bepalen welke afstand in welke tijd wordt afgelegd. Met andere woorden achteraf beschouwd zijn deze bewegingsdetectoren ook verenigbaar met het elementaristische gedachtegoed. Wat dat betreft is de neurobiologie redelijk theorie-neutraal gebleken.

3.4.3 *Directe-perceptietheorie (direct realisme) en neuroreductie*

Van oorsprong zijn aanhangers van de directe-perceptietheorie niet in neuroreductie geïnteresseerd. Immers hun belangrijkste credo was: terug naar een analyse van de informatie die de leefomgeving biedt. Men ging er weliswaar impliciet van uit dat als een bepaalde vorm van nuttige informatie beschikbaar was, er ook wel mechanismen geëvolueerd zouden zijn om die informatie op te pikken, maar het programma van studie van de buitenwereld was de kern van het werk en het meest urgent. We hebben in §3.2.4 al kennis gemaakt met de concepten optisch raster ('optic array') en optische stroom ('optic flow'), die door Gibson werden ingevoerd en met het inzicht dat perceptie een activiteit is. Het visuele systeem is niet ontwikkeld om een serie platte plaatjes te zien en die 'cognitief' aaneen te schakelen tot een driedimensionaal percept, maar pikt direct driedimensionale informatie op uit het optische-stroomveld, het hellingenvectorveld en dergelijke, het is afgestemd op de invarianties in die velden. De vraag is dus steeds: welke informatie is beschikbaar voor een actieve waarnemer. We hebben gezien dat het hellingenvectorveld vorminformatie kan specificeren. Neuronale mechanismen die de invarianten van dit veld oppikken (Koenderink, 1993) zouden dus passen bij de directe-perceptietheorie van Gibson. Voor ruimtelijke navigatie zou het optische-stroomveld geanalyseerd kunnen worden in locale veldcomponenten als rotatie of expansie.

Lee (1974) toonde aan dat de expansiesnelheid van het retinale beeld de tijd-tot-contact van een naderend voorwerp specificceert. Retinale expansiesnelheid zou met andere woorden rechtstreeks kunnen worden gebruikt om te remmen, vangen, bukken, springen en dergelijke. Hiertoe heeft men 'looming'-detectoren (expansiedetectoren) nodig en men zou dat als een soort Gestalt-detectoren kunnen zien. Runeson (1977; zie ook Van de Grind, 1990) noemde dit "slimme mechanismen". Een slim mechanisme is als het ware een systeem waarvan men zou denken dat het cognitieve taken vervult, als men niet weet hoe het werkt. Voor optische stroom toont de mathematische analyse door Koenderink en Van Doorn (zie de review van Koenderink, 1986) aan dat men de eigenschappen van het stroomveld lokaal volledig (in termen van eerste-orde invarianten) kan beschrijven met vier veldcomponenten, rotatie, expansie en twee deformatiecomponenten (ook wel 'shear' dat wil zeggen 'afschuiving' genoemd). Men kan neurona-

le netwerkjes ontwikkelen die deze componenten oppikken, en deze zien als de 'slimme mechanismen' in de zin van Runeson, omdat ze een optimale analyse van optische-stroomvelden mogelijk maken.

Ook de directe-perceptietheorie staat dus de mogelijkheid van neuroreductie toe en suggereert zelfs preciese taken voor de neuronale netwerkjes. Overigens moet ik hieraan toevoegen dat Koenderink en Van Doorn hun werk zien als ecologische fysica, zonder verplichtingen aan Gibson's directe-perceptietheorie of andere filosofische opvattingen. Ik heb hun werk vooral in verband met de directe-perceptietheorie besproken, omdat Gibson's onderzoek aan de menselijke visuele waarneming de springplank vormde voor hun werk. Dit betekent niet dat ze het met zijn filosofische uitgangspunten, zoals de directe-perceptietheorie, eens zijn.

4 Het zenuwstelsel tussen waarneming en actie

4.1 Homunculus en lichaam-geest probleem in neurowetenschappelijk perspectief

4.1.1 *Het homunculusprobleem*

Stel, je wilt het menselijke zien fysiologisch begrijpen en begint daartoe bij het begin van het visuele systeem. De buitenwereld wordt via de optiek van het oog afgebeeld op het netvlies (de retina). De netvliesafbeelding is geïnverteerd, dat wil zeggen links en rechts, en boven en onder zijn verwisseld ten opzichte van de buitenwereld. Johannes Kepler (1571-1630) ontdekte deze beeldinversie rond 1604 uit geometrisch-optische overwegingen, en de aanname dat niet het lenskapsel van het oog – zoals men tot dan toe dacht – maar het netvlies verantwoordelijk is voor de primaire lichtomzetting (Degenaar, 1992, p.14/15). Kepler baseerde zich hierbij op werk van de Bazelse anatoom en arts Felix Platter (1536-1614), die als eerste vaststelde dat de lichtgevoelige laag in het oog het netvlies moest zijn (Grüsser en Landis, 1991, p.36).

Zeventiende eeuwse denkers zagen in die beeldinversie al direct een groot probleem: hoe komt het dat we de wereld niet gespiegeld en op zijn kop zien, zoals die er op het netvlies uitziet? De onuitgesproken aanname was dus kennelijk dat we naar het netvliesbeeld ‘kijken’ in plaats van naar de buitenwereld. Men postuleerde allerlei correctiemechanismen die het beeld binnen in de hersenen weer overeind zouden kunnen zetten. In dat geval moest er in het brein een volwaardige waarnemer, een homunculus, naar die beelden kijken. Maar hoe zat die homunculus dan in elkaar? Had die ook een intern projectiescherm, zodat er een homunculus in de homunculus moest zitten en er een oneindige regressie ontstond? Het homunculusprobleem was geboren.

Tegenwoordig weten we dat elektronische systemen in principe op dezelfde manier blijven werken als je allerlei interne schakelingen op hun kop legt of alle onderdelen ergens anders monteert.

(‘In principe’ omdat we hier gemakshalve afzien van problemen als parasitaire effecten, warmteontwikkeling en dergelijke.) De werking wordt bepaald door de vaste functionele betekenis van de componenten, waar ze ook zitten. Dus schudden we meewarig het hoofd over die arme vroegere denkers met hun beeldinversieprobleem. Het is nergens voor nodig het retinabeeld in het brein weer rechtop te zetten. Toch is die hooghartigheid misplaatst, want bijna allemaal maken we dezelfde fout nog steeds, maar dan op volgende niveaus in het systeem en soms meer verkapt, zoals we dadelijk zullen zien.

Als we ons over het beeldinversieprobleem hebben heengezet, kijken we naar de retinale fotoreceptoren die van een lichtsignaal een elektrisch signaal maken. Het uitgangssignaal van de fotoreceptoren representeert onder andere de locale lichthoeveelheid. Bovendien wordt dat signaal nog beïnvloed door de belichting van buurgebieden. Deze zijwaartse invloed loopt via horizontale cellen die achter de receptoren zitten. Ze vergelijken activaties van naburige receptoren en voeren die vergelijkingsinformatie terug naar de fotoreceptoren. De receptorsignalen zijn zodoende al contrastsignalen en geen lichtsignalen! De receptorsignalen gaan naar bipolaire cellen en die sturen de ganglioncellen aan, de uitgangscellen van het netvlies. Tussen de bipolaire en ganglioncellen bevinden zich nog amacriene cellen die weer, net als horizontale cellen een laag eerder, laterale (zijwaartse) invloeden uitwisselen.

De ganglioncellen blijken een soort centrum-omgeving antagonisme te vertonen tussen een ongeveer cirkelvormig centrumgebied en een ringvormig omgevingsgebied daaromheen van hun zogenaamde ‘receptieve veld’. Het receptieve veld van een cel is dat deel van de receptorlaag of de buitenwereld van waaruit de activiteit van de betreffende cel beïnvloed kan worden. Retinale ganglioncellen hebben dus een ongeveer cirkelvormig receptief veld met een centrumgebied en een ringvormig omgevingsgebied. Licht in het centrum van hun receptieve veld activeert extra bij zogenaamde Aan-centrum cellen of remt extra bij zogenaamde Uit-centrum cellen, terwijl licht in het ringvormige omgevingsgebied van het receptieve veld de omgekeerde invloed heeft.

Ganglioncellen zijn een soort verschilversterkers die optimaal actief zijn bij licht in een donkere omgeving (Aan-centrum cellen) of donkerte in een heldere omgeving (Uit-centrum cellen).

Hoe groter het contrast, hoe actiever ze zijn (contrastversterking). Op egale verlichting of egale duisternis reageren deze Aan-, respectievelijk Uit-cellen nauwelijks merkbaar. Omdat hun centrumgebied iets domineert over de omgeving, zal er ten opzichte van hun spontane activiteit bij Aan-cellen tijdens egale verlichting een zeer lichte verhoging van de vuurfrequentie zijn en bij Uit-cellen tijdens egale verduistering. Ganglioncellen zenden hun uitlopers (axonen) naar cellen in het corpus geniculatum laterale (CGL; dit betekent ongeveer 'aan de zijkant liggend geknikt lichaam').

Het CGL is een onderdeel van de thalamus. De thalamus noemt men wel de poort naar het bewustzijn, omdat vrijwel alle sensorische informatie waarvan we ons bewust kunnen worden via de thalamus loopt. Ook bijvoorbeeld het auditieve systeem en de huidzintuigen projecteren via (een ander deel van) de thalamus naar de cortex (hersenschors). In het CGL wordt de balans tussen de invloed van het centrum en de omgeving van het receptieve veld nog verbeterd, zodat deze cellen nog minder dan ganglioncellen of zelfs helemaal niet reageren op egale verlichting over het hele receptieve veld. Receptieve velden in de fovea (waarmee we fixeren) zijn bij primaten van de orde van grootte van enkele boogminuten in diameter (hoge resolutie), en meer eccentric in het gezichtsveld kunnen ze tot enkele graden doorsnede bereiken (lage resolutie).

Laten we nu in verband met het homunculusprobleem eens nagaan hoe men op basis van deze eigenschappen een bekende contrastillusie verklaart, de zogenaamde Mach-banden. Als we naar een graduele lichtovergang tussen een donker halfveld en een helder halfveld kijken dan zien we bij nauwkeurige beschouwing een soort dunne extra heldere lijn aan de heldere kant en een dunne extra donkere lijn aan de donkere kant van de overgang. Dit noemt men Mach-banden, naar Ernst Mach (1838-1916), die als eerste een preciese verklaring voor deze illusie gaf (zie Ratliff, 1965).

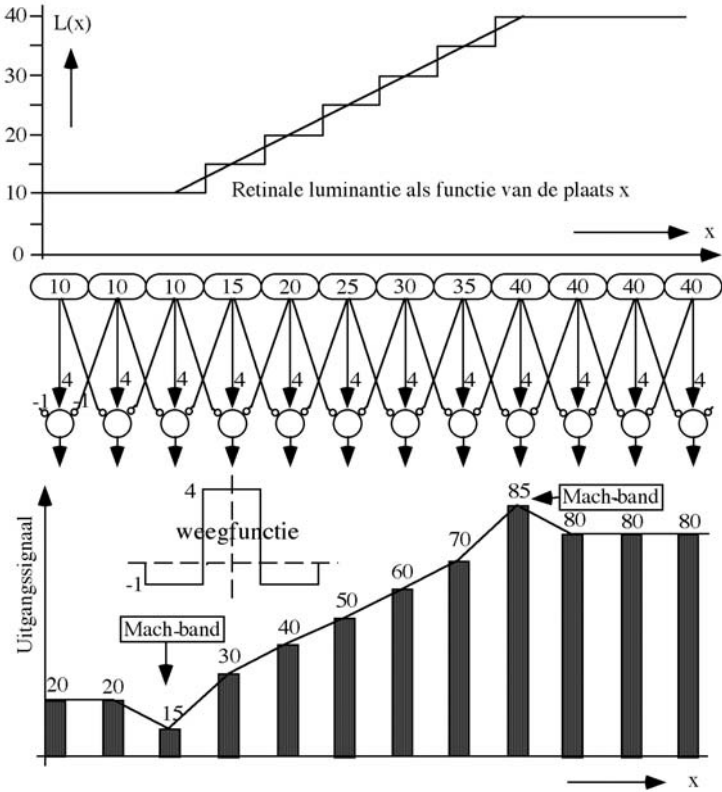
Vereenvoudigen we in het model de bedrading in het netvlies tot een prikkelende (excitatieve) invloed van een centrumgebied en een remmende (inhibitieve) invloed van een even groot omgevingsgebied op iedere ganglioncel, dan krijgen we de voorstelling uit figuur 16, waarin we alleen Aan-cellen beschouwen. Bovenin de figuur zien we de lichtverdeling, eenvoudigheidshalve als

trapjesfiguur weergegeven met treden op eenvoudige lichtwaarden. Daaronder zien we groepjes receptoren (liggende ovaaltjes), waarvan een centraal groepje de bijbehorende ganglioncel met gewicht 4 exciteert en een omgevingsgroepje ter weerszijden met gewicht 1 inhibeert. Nemen we de receptorreactie gemakshalve getalsmatig gelijk aan de lokale verlichtingssterkte, dan kunnen we het signaal dat uit iedere ganglioncel komt direct uit het hoofd uitrekenen. In het onderste deel van de figuur staat het resultaat als staafdiagram weergegeven en we zien inderdaad een verloop dat het modelequivalent van de Mach-banden vertoont.

Men kan de bewerking wat deftiger een convolutie van de stimulus met een weegfunctie noemen, waarbij de weegfunctie in de figuur is aangegeven als een soort hoge hoed. In een realistischer, maar complexer model zou men deze 'hoge hoed'-functie door een 'Mexicaanse hoed'-functie moeten vervangen. (Zo'n 'sombbrero'-functie krijgt men door het verschil van twee Gaussfuncties te nemen, wat wel een DOG-functie wordt genoemd, "difference of Gaussians".) Ook zouden we het inhibitieve gebied wat breder moeten kiezen dan het excitatieve, maar dit soort verfijningen is voor ons doel niet zo belangrijk.

Kenmerkend voor dit type verklaringen is de veronderstelling dat een lichtpatroon door een tweelagennetwerk wordt omgezet in een activiteitspatroon wat lijkt op de beschrijving van de illusie. De impliciete aanname is dat als dit activiteitspatroon in onze visuele cortex aanwezig zou zijn, we de Mach-illusie zouden zien. Daarmee postuleert men echter na de cortex iets (een homunculus) dat naar het corticale activiteitspatroon kijkt en het Mach-bandpercept opwekt. De visuele cortex fungeert daarmee als een soort scherm waarop activiteitspatronen worden afgespeeld, die nog in een waarneming omgezet moeten worden door een homunculussysteem.

Steeds als we van een activiteitspatroon over willen stappen op een percept hebben we een koppelhypothese nodig (§2.2.3), en die lijkt in dit geval wel erg op een volledige waarnemer. We hebben in dit model niet veel meer gedaan dan een filterlaag in het voorkantsysteem van de cortex ('front-end') construeren. De te verklaren stap, de overgang van neuronale activiteitspatronen naar percepten, hebben we weggelaten. In feite is dit een methode die bij bijna alle fysiologische modellen van de eerste verwerkingsstappen wordt toegepast. Postuleer bij wijze van koppelhypothese

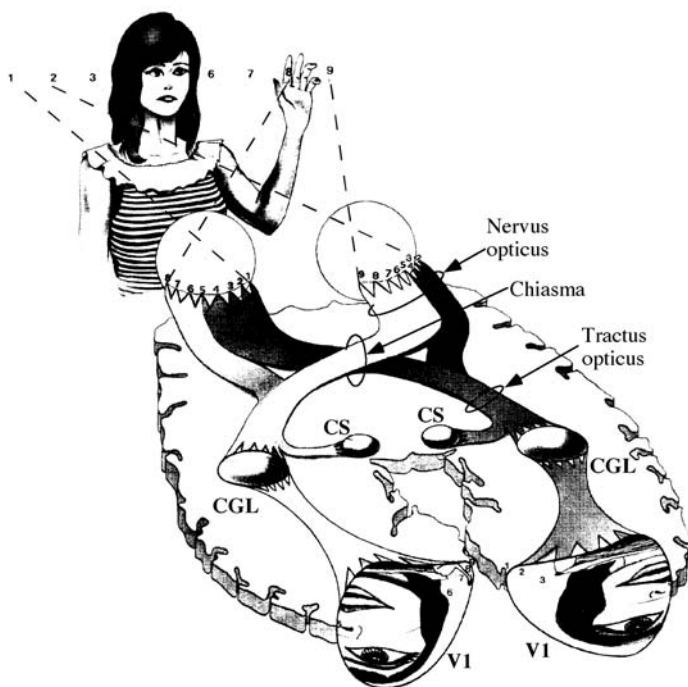


Figuur 16 Het ontstaan van een activiteitspatroon dat de Mach-banden weerspiegelt tengevolge van laterale inhibitie in de retina.

een perfecte waarnemer van neuronale activiteitspatronen (een homunculus) en laat die kijken naar de uitgangssignalen van het neuronale netwerk. Het ontmoedigende van deze 'bottom-up' methode van modelleren is dat je de waarneming steeds buiten het model houdt, hoe gedetailleerd je verder ook te werk gaat. Zelfs als je het netvlies met al zijn complicaties, verbindingen en celtypen in het model opneemt en het hele CGL modelleert en erachter schakelt, krijg je nog slechts een uitgangssignaal uit het model dat een corticaal activiteitspatroon voorstelt en geen percept. De homunculus blijft nodig.

Ga je nu verder met het modelleren van de eigenschappen van cellen in de primaire visuele cortex, dan verschuif je het probleem weer een stap verder het zenuwstelsel in zonder het wezenlijk op

te lossen. Het blijkt dan moeilijker in plaats van makkelijker te worden, want na $V1$ gaan de signalen naar een groot aantal, bijvoorbeeld veertig, andere cortexgebiedjes, die ieder een ander aspect van de visuele informatie lijken te analyseren (zie §4.4). Hebben we nu veertig homunculi nodig die moeten confereren om tot een eenduidig percept te komen, of onder leiding staan van een hoofdhomunculus die over de percepten beslist? Hier stuiten we op een moderne variant van het homunculusprobleem, die wel het bindingsprobleem of bundelingsprobleem wordt genoemd (zie §4.4.5).



Figuur 17 (Vrij naar Frisby, 1979) Afbeelding van de buitenwereld op de retina wordt gevolgd door transport van de informatie via de optische zenuw en het corpus geniculatum laterale (CGL) naar de primaire visuele cortex $V1$, waarbij de nasale netvlieshelften naar contralateraal (andere zijde) en de temporale netvlieshelften naar ipsilateraal (zelfde zijde) 'projecteren'. Waarom zou je al die moeite doen om een redelijk beeld naar de cortex te brengen via vele tussenlagen in plaats van de cortex direct op de receptoren aan te sluiten? Als de cortex een soort plaatje ontvangt, wie kijkt dan naar die corticale afbeelding en maakt er een waarneming van? (Het homunculusprobleem.)

Bijna iedere tekst over het zien legt verder uit dat in het oog een centraal gebiedje met een gezichtshoek van enkele graden doorsnede ligt, de fovea, waarmee we fixeren. Dit gebiedje heeft een hoge gezichtsscherpte, meer naar buiten in het gezichtsveld wordt de resolutie snel lager. Verticaal door de fovea loopt een oogmeridiaan, die het netvlies als het ware in twee helften verdeelt, het nasale (neuskant) deel en het temporale (slaapzijde) deel. Nu projecteren de nasale netvlieshelften naar de visuele cortex aan de andere zijde van de hersenen (linkeroog naar rechtsachter, rechteroog naar linksachter). De temporale netvlieshelften projecteren naar hun eigen zijde van de hersenen. Het gevolg is dat de linkerhelft van de wereld op de rechterhelften van de netvliesen projecteert, die op hun beurt hun axonen naar de rechter visuele cortex sturen. De rechterhelft van de wereld wordt zo op de linker visuele cortex afgebeeld.

Figuur 17 toont suggestief hoe op iedere hersenhelft een verknipt plaatje belandt. Hoe kan zoiets nu ooit tot één enkel percept leiden? Deze vraag is weer een moderne vormomming van het bovengenoemde beeldinversieprobleem. Moet ergens in het zenuwstelsel een goed gelijkend plaatje of film van de buitenwereld worden gereconstrueerd? Als dat zo zou zijn, zou het zien vanaf daar weer geheel opnieuw verklaard moeten worden en zou je ten opzichte van het netvliesbeeld niets opgeschoten zijn. Er moet een volledige waarnemer, een homunculus, in ons zitten om naar dat interne plaatje te kijken dat op het interne scherm, in dit geval de primaire visuele cortex, wordt geprojecteerd. Alvorens aan te geven hoe we van de homunculus af zouden kunnen komen bespreek ik het verwante hersen-geest probleem, zodat we daarna de homunculus met de geest tesamen kunnen proberen uit te drijven.

4.1.2 Het lichaam-geest probleem

De vraag of de entiteiten 'lichaam' en 'geest' bij de mens van verschillende aard zijn en zo ja, hoe dan hun relatie is, wordt het lichaam-geest probleem genoemd. Het woord 'geest' slaat daarbij op een nog nader te bepalen geheel van mentale processen en toestanden. Wanneer men ervan uitgaat dat 'geest' van een totaal andere aard (substantie) is dan materiële processen (het uitgangspunt van substantiedualisme), dan rijst onder andere de vraag of dat ook

voor dieren geldt of alleen voor mensen. Wanneer men ervan uitgaat, dat het enige – in relatie tot de ‘geest’ – interessante deel van het lichaam het brein is, kan men het lichaam-geest probleem vernauwen tot het hersen-geest probleem. Dat is langzamerhand een ingeslepen gewoonte geworden en we lezen bijna nooit meer over het lichaam-geest probleem of het materie-geest probleem. Vrijwel alle moderne literatuur op dit gebied gaat over het hersen-geest probleem (zie §4.1.3). Ik vind dat echter geen vanzelfsprekendheid. De hersenen zijn zonder lichaam geen zinvol geheel. We staan juist lichamelijk voortdurend in interactie met de leefomgeving en wat we lichamelijk doen en laten beïnvloedt continu alle processen in de twee-eenheid hersenen-lichaam. De neuro-endocriene processen in de hersenen hebben geen rol meer zonder lichaam en eenzelfde rolverlies geldt voor de hersendelen die zich met spiersturing, waarneming, planning van handelingen en dergelijke bezighouden.

Ik heb al betoogd dat intelligentie zeer sterk met lichamelijke processen samenhangt en dat die onlosmakelijkheid nu juist een belangrijk verschil is tussen ons en machines zoals de computer (§1.4.3 en §1.4.4). Het hersen-geest probleem zou dus eigenlijk ‘het lichaam-geest probleem in de context van de organisme-habitat samenhang’ moeten zijn. De volgende vragen zouden dan zijn (1) hoe men hierin tot zinvol geïsoleerd te bemeten relaties kan komen (methodologisch reductionisme); en (2) of de theorieën gebaseerd op bevindingen van deze reductionistische meetmethoden het postuleren van een ‘geest’ nodig maken; en (3) wat de rol van die ‘geest’ dan zou zijn met betrekking tot de overlevingswaarde van het bestudeerde organisme. Die natuurwetenschappelijke aanpak staat echter nog in de kinderschoenen en we moeten dus eigenlijk een afwachtend nieuwsgierige houding aannemen met betrekking tot de vraag of een term als ‘geest’ nodig is, zinvol is, biologische betekenis kan krijgen. Zo’n houding is prettig, omdat die ons toestaat kritisch maar onbevooroordeeld naar de argumenten te kijken die voor en tegen de aanname spreken dat ‘geest’ een zinvol concept is, en het hersen-geest probleem een zinvol probleem.

We hebben al gezien hoe reductionisten ervan uitgaan dat de gehele werkelijkheid, inclusief levende systemen met hun mentale processen, begrepen kan worden (althans te zijner tijd) uit de eigenschappen van niet-levende systemen (§2.2.1). Hierop is het *materialisme* gebaseerd. Het klassieke materialisme ging uit van een

soort naïef realisme betreffende de natuurkundige verschijnselen. Tegenwoordig heeft het begrip materie aan concreetheid ingeboet en denkt men eerder aan materie-energie of -velden en houdt daarbij rekening met het abstracte karakter van moderne natuurkundige theorieën. Men spreekt dan wel van 'fysicalisme' in plaats van materialisme. Dit is dus de verwachting dat levensverschijnselen, inclusief mentale processen, geheel van dezelfde aard zijn als processen in de niet-levende natuur zoals de fysica die bestudeert, en dat theorieën over deze levensverschijnselen volledig vertaald kunnen worden in theorieën waarin alleen fysische concepten en wetmatigheden voorkomen (zie §2.2). Fysicalisme toegepast op het hersen-geest probleem kan op verschillende manieren uitgewerkt worden, zoals we in §4.1.3 zullen zien.

Tegenover het fysicalisme kan men dualistische uitgangspunten stellen. Zoals al besproken ging Descartes er voor de mens van uit dat het begrip geest slaat op een niet-fysisch, een niet-direct, maar alleen in zijn fysische consequenties, meetbaar proces. Men noemt deze aanname van twee verschillende substanties, materie en geest, substantiedualisme. Descartes maakte een onderscheid tussen 'res extensa', de uitgebreidheid bezittende (materiële, tegenwoordig 'fysische') entiteiten en 'res cogitans', de wetende, waarnemende, doelbewuste entiteiten, oftewel mentale processen. Descartes vond het vanzelfsprekend dat moest worden nagedacht over de interactie tussen de twee entiteiten materie en geest. Hij zag de geest als een soort niet-fysische piloot van het lichaam, die via de pijnappelklier in contact staat met de hersenen en het lichaam. Hoewel de pijnappelklier in dit verband van het toneel is verdwenen, is dit model toch typerend voor een uitwerking van substantiedualisme die men 'interactionistisch dualisme' noemt. Popper en Eccles (1977) hebben getracht deze theorie in een modernere vorm te gieten, waarbij 'open modules' in de 'liaison brain' de rol van de pijnappelklier hebben overgenomen.

Vanaf het begin is het een probleem geweest in termen van het interactionistisch dualisme te verklaren hoe kleine chemische verstoringen in de hersenen zo'n invloed kunnen hebben op de geest als het geval is bij opium, alcohol, LSD en dergelijke. Een ander onaantrekkelijk aspect van dit type dualisme is dat men ervan uitgaat, dat een niet-fysische entiteit, dat wil zeggen iets niet-meetbaars, een merkbaar (meetbaar) effect heeft op de materie. Dit betekent dat er iets uit niets kan ontstaan, wat tegen alle ervaring en wetmatigheden in de fysica indruist. Het lijkt nauwelijks mogelijk

de hypothese op empirische wijze te weerleggen, wat ook al geen sterk aspect van dit dualisme is. Men kan zich dan nog afvragen of het een vruchtbare hypothese is in de zin van concrete voorspellingen doen. Omdat dat evenmin het geval lijkt is het interactionistisch dualisme van Descartes, Popper en Eccles niet geweldig populair in het wetenschappelijk onderzoek op dit terrein. Velen zien het als een 'metatheorie' die veelal in persoonlijke behoeften voorziet, maar overigens buiten de wetenschap valt. Het fysicalisme domineert in het wetenschappelijk onderzoek naar mentale verschijnselen, terwijl buiten de wetenschap het dualisme waarschijnlijk favoriet is (psychosomatische ziekten, geestelijke nood en dergelijke).

Een kernpunt in de discussie tussen fysicalisten en interactionistische dualisten is de vraag of we ons een neuronaal substraat kunnen voorstellen van denken en voelen, bewustzijn of zelfbewustzijn. Armstrong (1968) wordt door Popper en Eccles aangevallen op zijn fysicalistische theorie, die ervan uitgaat dat een deel van de hersenen een soort aftastapparaat ('scanning device') is wat de rest van de hersenen in de gaten houdt, op dezelfde wijze als Eccles' zelfbewuste geest dat met de hersenen doet. Na een samenvatting van Eccles' alternatief stelt Armstrong (1978) dan ook dat dit gewoon zijn 'self-scanning' idee is maar dan met een niet-materiële scanner. Eccles voegt met andere woorden geen verklarende kracht toe door aan te nemen dat de scanner niet verder analyseerbaar, want niet-fysisch, is.

Toch blijft ook bij de scanner-hypothese het intuïtieve probleem hoe het komt dat neuronale activiteit in deze scanner tot kwalitatief andere (introspectieve) ervaringen leidt dan activiteit in andere hersenstructuren. Dit is niet het enige of ernstigste probleem voor het fysicalisme zoals we dat hier leerden kennen. Ernstiger problemen komen uit de ontwikkeling van de fysica zelf voort. Sinds de opkomst van de kwantumtheorie is het steeds duidelijker geworden, dat er een probleem is wat betreft de interpretatie van fysische wetmatigheden. In sommige gevallen verandert het observeren van een proces de toestand, waardoor de toestand die zou hebben geheerst als er niet gemeten zou zijn (als zoiets bestaat), principieel niet kenbaar is. De kwantumtheorie voorspelt de uitkomst van bepaalde experimenten correct waar voorspellingen gebaseerd op fysisch realisme falen.

De beste fysische theorie is niet mechanistisch van aard maar beschrijvend en in de beschrijving speelt de waarneming, een ca-

tegorie die subjectief lijkt, een rol. De fysische wetmatigheden lijken de complexiteit van de mentale processen te benaderen of op dezelfde barrière te stuiten. Daarmee is een deel van de motivatie verdwenen om de complexe mentale processen te herleiden tot – zoals men vroeger dacht – ‘eenvoudige’, fysische processen. Bovendien kan nu zelfs een fysicist uitgaan van het idee ‘alles is niet-materieel’, een niet-materialistisch monisme (zie §4.2). Zelfs is een vorm van dualisme mogelijk, waarbij men niet gelooft in verschillende substanties, zoals de substantiedualist, maar wel in principieel verschillende uitingsvormen van dezelfde substantie. Dit noemt men wel eigenschapsdualisme en ik zie het als een dualisme (of pluralisme!) dat compatibel is met fysicalisme, maar strijdig met de opvattingen van een groot deel van de hedendaagse fysicisten. Het is mijn favoriete optie (zie hoofdstuk 5). Ik zal het principe van eigenschapsdualisme illustreren aan de hand van een variant die door Donald MacKay tot ontwikkeling is gebracht.

Het uitgangspunt van veel tegenstanders van het reductionisme is steeds de eigen ervaring geweest en het fysicalisme heeft deze categorie niet bevredigend (mechanistisch) kunnen verklaren. Om dit probleem inzichtelijk te maken volgen we de redenatie van MacKay (1978). Hij stelt eerst vast, dat we met betrekking tot onszelf van twee soorten gegevens kunnen spreken, die we in een lange tabel met twee kolommen zouden kunnen opschrijven. In de ene kolom schrijven we alle gegevens die ‘ik’ als onderwerp hebben (ik heb kiespijn, ik denk, ik spring, enzovoorts) en in de andere kolom alle lichamelijke processen die daarbij horen, bijvoorbeeld de hersen-, spier- en metabolische processen. Is het dan intuïtief aanvaardbaar te stellen dat de linkerkolomregels ‘identiek zijn aan’ (identiteitstheorie) of ‘reducerbaar zijn tot’ (reductionisme) de ermee corresponderende rechterkolomregels? MacKay vindt van niet en licht dit toe met een analogie (niets meer dan dat!) uit de informatica.

Als een computer met behulp van een programma een taak uitvoert met bijvoorbeeld het doel een bepaalde formule op te lossen, is alles wat er gebeurt mechanistisch verklaarbaar. Toch is het absurd de betreffende formule en het doel *identiek* te noemen met de toestanden of eigenschappen van de machine, of *reducerbaar tot* die toestanden of eigenschappen. Er zijn verschillende soorten beïnvloeding. Enerzijds de fysische processen waarbij energetische interacties van belang zijn, anderzijds de interacties tussen

vorm en vorm, symbool en symbool, waarbij de informatieaspecten van belang zijn. Hoewel informatie altijd door fysische processen gedragen wordt, is het een andere categorie. We stuiten hier op een fundamenteel dualisme in de kennis van de wereld, in onze denkcategorieën, vindt MacKay. Hij stelt dat de categorieën van de natuurkunde onvoldoende zijn om intentioneel gedrag te verklaren juist omdat intentie nu eenmaal geen fysisch begrip is, evenmin als 'doel'. De natuurkunde is in deze zin even ongeschikt om de keuze van zetten in een schaakpartij te verklaren. De vraag of het schaakspel fysisch te verklaren is door of te reduceren tot de wetten van de natuurkunde, is in deze visie een categorieënverwarrende vraag, evenals de vraag naar de fysische verklaring van mentale processen.

Dit dualisme van informatie versus materie-energie kan anders worden geformuleerd, maar lijkt in aanzet verdedigbaar. Een radicaal physicalist kan de categorie 'informatie' (of varianten als 'organisatie') altijd nog trachten te reduceren tot fysische processen. Om pragmatische redenen kan het dan zelfs voor physicalisten nuttig zijn dit type dualisme aan te houden, zolang het niet eenvoudiger is direct in de corresponderende fysische terminologie te formuleren. Ook chemische processen beschrijft men in een chemische terminologie al zou deze misschien in principe(!) vertaalbaar zijn in onderliggende fysische wetmatigheden en randvoorwaarden. Zo'n vertaling zou meestal praktisch onhanteerbaar zijn. Mogelijk is het door MacKay voorgestelde dualisme informatie versus fysische processen van vergelijkbare aard. In elk geval is het informatie-materie dualisme een voorbeeld van een niet-mystiek dualisme, dat geen onmeetbare entiteiten zoals 'geest' of 'ziel' postuleert.

Men moet in het voorbeeld van MacKay's eigenschapsdualisme weer waken voor de fout de 'informatieprocessen' te zien als software (zie ook §2.1.6), want dan impliceert men vrije verplaatsbaarheid en een externe programmeur, die geen van beide voor levende systemen gelden. Er is trouwens, zoals ik al eerder opmerkte, een algemener probleem met het zo vaak gebruikte begrip informatie. Dat probleem wordt echt urgent als men 'informatie versus fysisch proces' als basis van een bruikbaar eigenschapsdualisme wil nemen. In de informatietheorie is het begrip informatie gedefinieerd als statistische verrassingswaarde, ongeacht de betekenis voor organismen (Shannon & Weaver, 1963). In biologische zin is het nodig bij het concept informatie de ge-

bruikswaarde te betrekken en daarmee de levende ontvanger. De biologische ontvanger is niet net als in de techniek een apparaat dat reeksen tekens uitprint zonder ze te kunnen interpreteren. De interpretatie hoort er voor biologische informatie (bio-informatie) onverbreekelijk bij. Een goede uitwerking van het begrip bio-informatie zou daarom wel eens vruchtbaar kunnen blijken te zijn.

Een interessante aanzet is besproken door Emmeche (1991), die zich beroept op Charles Sanders Peirce (1839-1914). Peirce, grondlegger van het pragmatisme, ontwikkelde een tekenleer (semiotiek) gebaseerd op driewaardige relaties tussen het teken (1), dat wat het voorstelt (2) en de interpretator (3). Toen ik in 1967 een maandje logeerde bij Warren S. McCulloch, de 'vader' van de wetenschap van neurale netwerken (zie bijvoorbeeld McCulloch, 1965), vertelde hij me avond aan avond (bij de cream sherry) enthousiast over zijn ideeën over een driewaardige logica gebaseerd op dezelfde ideeën van Peirce. Het is er niet meer van gekomen, want hij overleed ongeveer een jaar later. Mij is geen werk bekend dat dit programma op biologisch relevante wijze heeft opgevat en uitgewerkt.

4.1.3 Evaluatie van een aantal opvattingen over het hersen-geest probleem

Paul Churchland (1992) heeft een aantal vormen van dualisme en monisme op een rij gezet en bij ieder de voordelen en nadelen besproken. Ik zou het bij een verwijzing naar zijn tekst kunnen laten als ik het met zijn bespreking meestal of vaak eens zou zijn geweest. Dat is echter niet zo. Churchland is een eliminatiefysicist, die meent dat alle huidige psychologische termen, concepten en theorieën (de zogenaamde 'volkpsychologie') uiteindelijk vervangen zullen worden door fysische. Dit dogmatisch reductionisme straalt door bij alle besprekingen, ook al doet hij waarschijnlijk zijn best de diverse theorieën eerlijk en afstandelijk te bespreken. Ik geloof niet in de vruchtbaarheid van zijn standpunt, zie er te veel redeneringskortsluitingen in en kijk zodoende met andere ogen naar de diverse opties. In het volgende probeer ik de balans recht te trekken, maar evenmin als Churchland maak ik aanspraak op volledigheid.

Dualisme is het uitgangspunt dat het al dan niet bewuste denken

van een zodanig andere aard is dan de processen die de fysica bestudeert, dat er andere – mogelijk niet-fysische – begrippen nodig zijn om het te begrijpen. Nu voegt Churchland aan de term niet-fysisch al direct toe “something forever beyond the scope of sciences like physics, neurophysiology, and computer science”. Dat komt me onredelijk voor. Het klopt bijvoorbeeld niet voor het al beschreven informatie-materie dualisme van MacKay, of voor een vorm van pragmatisch dualisme die ervan uitgaat dat men zeker voorlopig het beste twee (of meer) soorten entiteiten aan kan nemen, ongeacht of die te zijner tijd tot een enkel soort substanties zijn terug te voeren of niet. In feite gaat Churchland hier dus al uit van het idee dat *alle* dualisten mystici zijn die in onanalyseerbare krachten geloven, alleen omdat dat voor *sommige* dualisten, namelijk de substantiedualisten, geldt. Alle dualisten worden over één kam geschoren met Cartesiaanse dualisten, die inderdaad van zo’n aanname uitgaan. Het is echter zeker niet juist dat een dwingende keuze moet worden gemaakt tussen reductie òf onanalyseerbaarheid.

Neem een simpel voorbeeld uit de natuurkunde. Honderden jaren heeft men erover gediscussieerd of licht nu een trillingsverschijnsel is (de theorie van Huygens) of een deeltjesverschijnsel (de theorie van Newton). Bohr stelde echter een theorie op, die nu algemeen geaccepteerd is en die zegt dat licht een complementair karakter heeft. Soms doet licht zich als deeltjestrroom voor, soms als trillingsverschijnsel, maar nooit tegelijkertijd. Het ene aspect kan men niet tot het andere reduceren, integendeel ze sluiten elkaar uit. Er is één theorie, die beide verschijningsvormen perfect beschrijft en voorspelt, maar de verschijningsvormen zijn toch niet tot elkaar te reduceren. Waarom zou zoiets niet ook voor mentale verschijnselen kunnen gelden? Dan zouden we ons één theorie kunnen voorstellen, die mentale èn neurofysiologische verschijnselen perfect beschrijft, zonder dat ze tot elkaar te reduceren zijn. Zo’n complementariteitstheorie van het al dan niet bewuste denken zou noch door fysici noch door psychologen geclaimd kunnen worden als uniek tot hun vakgebied behorend. Waarom ook? Waarom moet alles tot (bijvoorbeeld) de fysica behoren? Er zijn, zoals ik al in §2.2.1 betoogde, legitieme andere vakgebieden met legitieme andere wetmatigheden, die compatibel zijn met, maar niet gelijk aan of reduceerbaar tot, de fysische wetmatigheden.

Mijn diagnose is dat velen van de (vaak Amerikaanse) dogmatische reductionisten zich met veel moeite aan religieuze (substan-

tiedualistische) uitgangspunten hebben ontworsteld, maar ongemerkt eraan overgehouden hebben dat alles uit één uniforme waarheid of oerkracht afgeleid moet worden. De fysica neemt dan de rol van God over als alles verklarend uitgangspunt en men loopt zeer warm voor een 'theorie van alles'. Voor een geboren en getogen onreligieuze persoon als 'schrijver dezes' is dit geen punt van groot gewicht. Of er één verklarend principe is of twintig kan me in principe niet veel schelen, want ik vind twintig ook een mooi getal. Alleen de economie telt in dit verband. Voor ons beperkte geheugen is het fijn als er een minimum aan wetmatigheden is met een maximum aan zeggingskracht, maar een grote emotionele lading hoeft dat niet te hebben.

Of alles uiteindelijk volledig vanuit de fysica verklaard kan worden of niet, treft me niet als een probleem van gigantisch belang. Zelfs in de chemie heeft men het streven en de hoop opgegeven het vak te vertalen in puur fysische termen en wetmatigheden. Ook al zou dat kunnen dan is er nog geen voordeel mee te behalen. Integendeel, zelfs de meest eenvoudige reacties zouden dan vermoedelijk zeer complexe beschrijvingen vereisen. Gezien mijn ervaring met zowel de fysica als de biologie en psychologie lijkt het me zeer onwaarschijnlijk dat de fysica ooit veel zinnigs zal inbrengen om biologen of psychologen te 'verlossen' van hun vakproblemen. De natuur is zo complex en divers, dat we gewoon niet met één enkele natuurwetenschap toe kunnen. De wens daartoe bij holisten zowel als fysicalisten doet religieus aan. Als drijfveer voor onderzoek lijkt reductionisme me in orde en het streven zoveel mogelijk met zo weinig mogelijk wetmatigheden te verklaren ook (scalpel van Occam). Te veel zendingsdrang lijkt me daarentegen contraproductief.

Ik geef in het onderstaande een korte opsomming van een aantal voor de hand liggende 'oplossingen' van het hersen-geest probleem binnen de drie hoofdstromen substantiedualisme (A), eigenschapsdualisme (B) en psychofysisch monisme (C). Deze opsomming is verre van compleet, omdat ik niet de vele subtiliteiten en combinaties wil bespreken die inventieve filosofen in de loop der jaren hebben bedacht. Neurowetenschappers springen met die subtiliteiten toch maar ruw om (Lokhorst, 1986), filosofen kennen ze al, en voor de algemene lezer lijkt me alleen de grote lijn boeiend.

A. Substantiedualisme

Geest bestaat uit een andere 'substantie' dan de rest van de natuur

en onze bewuste mentale processen zijn hiervan de uitingen. Geest heeft dus niet de kenmerkende eigenschappen van fysische processen en omgekeerd. Meestal wordt door moderne substantiedualisten er niet meer precies bijgezegd welke eigenschappen geestelijke processen wel of niet hebben in vergelijking met fysische processen. Descartes deed dat wel, maar destijds was de natuurkundige kennis veel primitiever. We kunnen onder andere de volgende drie uitwerkingen onderscheiden:

1. *Cartesiaans (interactionistisch) dualisme* is substantiedualisme waarbij geldt dat de geest materiële processen kan beïnvloeden, en andersom materiële processen van een bijzondere aard, die in bepaalde delen van ons zenuwstelsel plaatsvinden (zoals de pijnappelklier of de liaison brain) ook de geest kunnen beïnvloeden. Vandaar dat het ‘interactionistisch’ dualisme heet (zie voor een schema figuur 18, die later in ander verband zal worden besproken). Descartes ontzegde geestesprocessen (de denksubstantie) spatiële uitgebreidheid, spatiële positie en massa (bijna zoals sommige moderne fysische deeltjes of krachten!), maar dus niet causale effectiviteit. Toch was de rigoureuze scheiding van de twee domeinen door Descartes mede een inspiratiebron voor de onder genoemde occasionalisten.
2. In het *parallèllisme* gaat men ervan uit dat de twee substanties geest en materie volledig onafhankelijk van elkaar zijn, maar parallel verlopen. Bij iedere materiële gebeurtenis treedt een corresponderende psychische gebeurtenis op, die noch veroorzaakt wordt door, noch de oorzaak is van de materiële gebeurtenis. Leibniz meende dat deze twee domeinen van te voren door God voor eeuwig in harmonie met elkaar waren gebracht. Behalve Leibniz heeft onder andere een bekend psychofysicus uit de vorige eeuw, G.T. Fechner het parallèllisme aangehangen en in deze eeuw sommige Gestalt-theoretici, maar een wetenschappelijk bruikbare uitwerking is nooit gegeven. Sterk verwant met het parallèllisme is het *occasionalisme*, maar vanuit niet-religieus standpunt is het nog vreemder. Het gaat ervan uit dat het begrip causaliteit voor onze wereld op zich ongeldig is en dat iedere gebeurtenis zonder aardse oorzaak op een andere volgt om Gods wil. Die buitenaardse wil is dus de aanleiding (*occasio*) van de gebeurtenis, en een oorzaak in vorige gebeurtenissen in onze wereld (causale samenhang) bestaat niet. Geulincx en Malebranche hebben deze theorie

uitgewerkt en gebruikten het beeld van twee klokken die eens en voor al door God gelijk waren gezet. Hierin zien we meteen hoe verwant dit occasionalisme is met het idee van het parallellisme.

We laten dit soort ideeën verder buiten beschouwing in de overtuiging dat ze eerder in de theologie dan in de natuurwetenschap thuishoren, en ons zeker niet zullen helpen aan voorstellingen op hersen-geest gebied (die immers de aanname van causale verbanden vereisen). In dit verband en met dezelfde conclusie noem ik ook kort Spinoza, die door mij als parallelist wordt gezien, door anderen soms als monist, soms als eigenschapspluralist (soms als monotheïst en soms als pantheïst, enzovoorts). Hij ging weliswaar uit van één enkele allesomvattende substantie, die hij identiek zag aan God, maar daarmee was volgens hem het Cartesiaans dualisme van materie versus geest in de mens niet volledig opgeheven. De geestelijke en lichamelijke processen zouden parallel lopen, omdat ze als aparte eigenschappen van God elkaar niet kunnen beïnvloeden en toch in harmonie zijn (Grote Winkler Prins Encyclopedie, deel 17, 1973, Spinoza).

3. De meeste mensen lijken net als Descartes substantiedualisme te accepteren en in een onstoffelijke geest te geloven. We noemen dit *volksdualisme*. Ze gaan er echter meestal van uit dat die geest wèl ergens zit (spatiële positie heeft), namelijk in ons hoofd en/of lichaam, waar alles ermee 'doordrenkt' is. Meestal gaat men er ook van uit dat de geest ons kan verlaten, bijvoorbeeld na de dood, en dat onze hele persoonlijkheid erin zit. Er is geen enkele wetenschappelijke evidentie voor en het speelt geen rol als serieuze theorie. We laten het daarom verder buiten beschouwing.

Ik heb dus geen goed woord over voor de diverse soorten substantiedualisme en zal er alleen nog op terugkomen als het nodig is te laten zien welke verwarringen er nog in omloop zijn als restanten van deze dwalingen. Daarbij zal de meest invloedrijke variant, namelijk die van Descartes, als kop van jut fungeren.

B. Eigenschapsdualisme (eventueel -pluralisme)

Er is in feite maar één soort substantie, namelijk die welke ook de fysica bestudeert, maar hersenen hebben eigenschappen die men in geen enkel ander fysisch systeem kan vinden en die zich uiten

als mentale processen, zoals pijn lijden en genieten. Deze complexe fysische processen hebben (emergente) eigenschappen die andere fysische systemen niet vertonen, zodat er een dualisme (of pluralisme) qua soorten eigenschappen bestaat, niet wat betreft soorten substantie. Emergente eigenschappen zijn eigenschappen van een geheel die niet te vinden zijn in de delen of de organisatie van de delen. Zie voor een mogelijke verdere uitwerking van emergentisme Bunge (1980).

1. Volgens het *epifenomenalisme* is alles wat men doet geheel fysisch bepaald, wat men erbij ervaart is een (emergent) epifenomeen dat geen invloed kan uitoefenen op de verdere hersenprocessen, maar wel diagnostisch ervoor kan zijn. T.H. Huxley ('Darwins bulldog') was er een aanhanger van, zoals we in hoofdstuk 5 nog zullen bespreken. De James-Lange theorie van emoties gaat ervan uit dat we vrolijk zijn omdat we lachen, verdrietig omdat we huilen, maar nooit omgekeerd. Deze emotietheorie is dus in overeenstemming met epifenomenalisme. Toch critiseerde William James (één van de opstellers van de James-Lange theorie) het epifenomenalisme van Huxley (hoofdstuk 5) en voelde zich meer aangetrokken tot het zogenaamde neutrale monisme (zie onder C).

Er is ook een omgekeerd epifenomenalisme denkbaar, waarbij men de fysische processen ziet als epifenomenen van de psychische processen. Dat leidt echter al gauw tot een soort pansychisme (alle materie wordt door psychische processen in beweging gehouden) en we hoeven zo'n idee dus niet echt serieus te nemen in een natuurwetenschappelijke context. In dit verband zijn ook allerlei andere vrije speculaties te berde gebracht, bijvoorbeeld dat alle fysische processen beschrijfbaar zijn als mentale processen terwijl ze toch andere eigenschappen hebben, omdat voor fysische processen wetten gelden en voor mentale processen niet. Je kunt het zo gek niet bedenken of iemand heeft het al naar voren gebracht!

2. Het *interactionistisch eigenschapsdualisme* gaat ervan uit dat mentale processen een causale rol in het gedrag kunnen spelen, gedrag kunnen veroorzaken, ondanks het feit dat ze andere eigenschappen hebben dan de overige fysische processen.

Churchland (1992) bespreekt de voor- en nadelen van dualisme ongenueanceerd, dat wil zeggen hij maakt geen onderscheid tussen

eigenschapdualisme en substantiedualisme in zijn evaluatie. Bij de 'voordelen' noemt hij bijvoorbeeld dat dualisme compatibel is met de meeste religies! Hoewel dat voor substantiedualisme zeker geldt, is er geen enkele reden dat ook voor eigenschapsdualisme te stellen. Eigenschapdualisme conflicteert met de religieuze opvattingen die substantiedualisme vereisen. Als tweede voordeel noemt Churchland het introspectieargument: bewuste mentale processen zijn introspectief, anders dan fysische processen. Ik denk dat dit een belangrijk punt is, misschien zelfs het enige punt. Het geeft een bepaald gevoel om een bepaalde persoon te zijn, om verliefd te zijn of pijn te lijden, en die ervaring lijkt specifiek voor levende systemen. Qualia (subjectieve ervaringen, bijvoorbeeld de 'roodheid' van iets) kan men als antidualist, zoals Churchland, alleen wegwuiven, omdat ze niet fysisch te verklaren zijn. Het derde argument dat Churchland noemt, de irreducibiliteit van vele mentale verschijnselen, is in feite hetzelfde idee. Om alle (in plaats van sommige) dualisten verder wetenschappelijk verdacht te maken, noemt hij bij de irreducibel lijkende verschijnselen ook parapsychologische fenomenen, om dan uit de doeken te kunnen doen waarom parapsychologie onzin en bijgeloof is. Dit laatste ben ik met hem eens, maar dat het iets met eigenschapdualisme te maken zou hebben kan ik niet inzien. Parapsychologie vereist, voor zover het niet als verzameling leuke goocheltrucs bedoeld is, dat er gevolgen zonder meetbare oorzaken kunnen zijn en daaraan gelooft de eigenschapsdualist per definitie niet, de interactionistische substantiedualist in principe wel.

Vervolgens ontzenuwt Churchland het voordeel van dualisme dat het aansluit bij de eigen ervaring (qualia) en introspectie door erop te wijzen dat introspectie, waarneming en intuïtie niet te vertrouwen zijn. We zien een appel als rood, maar de fysica toont aan dat het een matrix van moleculen is die fotonen reflecteert. Hoewel introspectie en dergelijke zeker onbetrouwbaar zijn, baseert Churchland zijn mening op een verkeerde redenatie. We kunnen een appel als object wel natuurkundig beschrijven zoals Churchland voorstelt, maar daarmee hebben we de *perceptie* van de appel niet beschreven! De perceptie berust op een relatie tussen de appel, licht en een waarnemer, bestaat niet los van de waarnemer, dus bestaat niet in de appel als object. Zoals potentiële energie niet in een object te vinden is, maar als relatie tussen een object en zijn omgeving gedefinieerd is, zo is ook de kleur van een appel niet in of op de appel te vinden maar in de relatie tussen licht, appel en waarnemer.

Laat ik Churchlands tweede voorbeeld in dit verband letterlijk citeren: “*The sound of a flute does not sound like a sinusoidal compression wave train in the atmosphere, but that is what it is.*” Grote non-sens natuurlijk. We kunnen een verplaatsende compressiegolf in de atmosfeer natuurlijk beschrijven met periodieke functies al hoeven dat zeker niet per se sinussen te zijn. Maar de compressiegolf is nog geen geluid. Het is en blijft een compressiegolf, zolang er geen waarnemer is om hem te interpreteren als geluid. Als de golf door een weekdier wordt opgevangen, wordt het geen geluid omdat mollusken geen gehoorsysteem hebben. Als het gehoorsysteem van een vleermuis of kat door de bedoelde compressiegolf wordt gestimuleerd, wordt het een heel andere ervaring dan wanneer de golf ons gehoorsysteem treft, en bij een musicus kan het heel andere ervaringen opwekken dan bij een onmuzikaal mens. Geluid is geen compressiegolf, maar een relatie tussen de compressiegolf en een waarnemer met qualia en dergelijke.

Door consequent de waarnemer weg te laten is het net of geluiden alleen luchttrillingen zijn, de appel alleen een bundel moleculen, maar de waarnemer is nu juist het probleem waar het over gaat! Die heeft ervaringen die intuïtief afwijken van de bundel moleculen en de luchtbewegingen – en terecht. De intuïtie is in dit geval in principe fysisch correct en Churchland vergist zich. De waarneming met zijn qualia en introspectieve aspecten is een te verklaren verschijnsel, niet iets waarvan je met een beroep op een fysische beschrijving van de *omstandigheden waaronder het optreedt* kunt zeggen dat het niet bestaat omdat het *niets anders is* dan die fysische omstandigheden. In een fysica-leerboek hoeft men natuurlijk niet steeds het filosofische mes op tafel te hebben en kan men rustig beweren dat een geluid een luchttrilling is van die en die frequentie, dat hogere frequenties ultrageluid zijn, hoorbaar voor vleermuizen en niet voor mensen. We zijn aan dit soort spraakgebruik gewend. Het is kort en effectief. Een compressiegolf consequent “potentieel geluid” noemen zou de natuurkundestudie alleen maar onnodig sofistich maken. Van een filosoof die over qualia en perceptie nadenkt, mag men echter grotere omzichtigheid verwachten.

Na de voordelen van dualisme aldus opgesomd en ‘ontzenuwd’ te hebben, gaat Churchland over op de nadelen, weer voor alle vormen van dualisme tegelijk. Als eerste brengt hij Occams scalpel in stelling. Waarom meer postuleren dan fysische processen als men

het daarmee afkan? Het probleem is natuurlijk dat dualisten vinden dat men het daarmee *niet* afkan, en dat geen fysicist een bevredigende verklaring van onze ervaringen heeft gegeven. Men zou de stelling van Occam bovendien ook kunnen omdraaien: “Houdt niet aan een monocausale verklaring vast als er meerdere oorzaken in het spel zijn.” Kortom zo komen we niet veel verder. Als tweede algemeen nadeel noemt hij verklarende impotentie, maar dat is evenzeer een tweesnijdend zwaard. Mij helpt dit alles niet veel.

Het Cartesiaanse dualisme lijkt me eenvoudig incompatibel met de evolutietheorie (Edelman, 1993). Het heeft overigens ook nooit toetsbare voorspellingen opgeleverd, die niet even goed zouden volgen uit een theorie die geen speciale status toekent aan de geest. Meer in het algemeen gesproken vallen de theorieën die onmeetbare processen postuleren buiten de natuurwetenschap, omdat deze per definitie geen onderzoek kan doen naar de gepostuleerde ‘tweede’ substantie, welke dat ook is: ziel, geest, God of meerdere goden. De eigenschapsdualismen zijn echter van andere aard en zeker het interactionistisch eigenschapsdualisme, waaronder ook bijvoorbeeld MacKays informatie-materie dualisme (§4.1.2) valt, lijkt me vele verdedigbare uitwerkingen te kunnen krijgen.

C. *Psychofysisch monisme*

De aanname dat er maar één substantie en één soort eigenschappen zijn, noemen we psychofisch monisme. Monisme kan uitsluitend psychische substantie en eigenschappen betreffen, zoals in het filosofisch idealisme wordt aangenomen (‘alles is geest’, zie §4.2). Het kan ook uitsluitend fysische substantie en/of eigenschappen betreffen, zoals fysicisten van allerlei pluimage aannemen. Er is nog een derde mogelijkheid, het zogenaamde neutraal monisme, dat noch de gebruikelijke fysische, noch de psychische verschijnselen als eigenstandige substantie ziet, maar een derde ‘neutrale’ substantie postuleert, die zowel fysische als psychische verschijningsvormen heeft (daarom heet dit ook wel de ‘dubbele aspecten’-theorie). Aanhangers waren onder andere William James en Bertrand Russell (en natuurlijk wordt ook hier soms Spinoza weer genoemd). De theorie van neutraal monisme heeft geen behoorlijke uitwerking gekregen en wordt nauwelijks ooit serieus genomen. Hoewel dat niets bewijst is het voor mij voldoende reden er niets meer over te zeggen. Ook psychisch monis-

me, zoals onder andere voorgesteld door de Nederlandse psycholoog G. Heymans (1857-1930), bespreek ik niet in detail. Deze op Fechners werk geïnspireerde hypothese stelt dat alle werkelijke processen van psychische aard zijn, maar dat een deel daarvan zich tengevolge van de werking van onze zintuigen als fysische processen aan ons voordoen. Omdat ik in §4.2 nader op het algemene idee inga dat alles psychisch is, bespreek ik hier alleen in kort bestek enige bekende fysisch-monistische theorieën, weer zonder aanspraak op volledigheid.

1. Volgens de *identiteitstheorie* zijn mentale processen gewoon fysische processen van de hersenen. De neurowetenschappen kunnen bij ieder mentaal proces het hersenproces ontdekken dat ermee in een één-op-één relatie staat. Er is geen hersengeest probleem, alles is hersenproces. De identiteitstheorie bestaat in een sterke vorm, de type-type identiteitstheorie, en in een zwakkere vorm, de teken-teken identiteitstheorie. De sterke vorm zegt dat voor ieder type mentale toestand of mentaal proces een type fysische toestand of fysisch proces bestaat waarmee het identiek is. Er is dus een (intertheoretische) reductie mogelijk van het mentale tot het fysische, waarbij er een éénduidige relatie is tussen typen mentale en typen fysische (neuronale) processen/toestanden. Functionalisten (zie onder 3.) protesteerden hiertegen, omdat zij vinden dat mentale processen in feite functies zijn en dus op allerlei wijzen in allerlei media gerealiseerd kunnen worden. Dit leidde tot de ontwikkeling van de zwakke vorm, de teken-teken identiteitstheorie, die zegt dat bij ieder mentaal proces allerlei fysische realisaties kunnen horen, waarmee het dan identiek is.
2. De eerste poging *eliminatiefysicalisme* in de praktijk te brengen was het behaviorisme (§1.3), dat gewoon het gebruik van mentalistische termen verbood omdat ze overbodig zouden zijn. We hebben al gezien dat het met dit programma slecht is afgelopen. Een nieuwere vorm is op de volgende redenatie gebaseerd. Mentale processen zijn gewoon fysische processen van de hersenen maar een één-op-één relatie kan niet gevonden worden, omdat de huidige psychologie ('volkpsychologie') met al zijn mentale concepten radicaal misleidende theorieën over de oorzaken van menselijk gedrag en cognitieve activiteit verschaft. Deze volkpsychologie zal gewoon op den duur verdwijnen en vervangen worden door adequate neuro-

wetenschappelijke (fysische) theorieën, zoals in de fysica de vloeistoftheorie van warmte en de ethertheorie gewoon verdrongen zijn door nieuwere adequate theorieën.

3. Zoals de fysicist meent dat alle mentale processen tot de fysica zijn terug te voeren, zo meent de *functionalist* dat alles wat over levende systemen te weten valt in termen van functies beschreven kan worden, zelfs onafhankelijk van de ‘belichaming’ van die functies. De functionalist ziet een mentale toestand dus als iets wat een functie vervult bij het tot stand brengen van gedrag in het kader van de toestanden van de omgeving en van het organisme. Het functionalisme concludeert dat de psychologie een autonome wetenschap is die de mentale functies bestudeert, onafhankelijk van fysica, biologie en dergelijke. De mentale aspecten van hersenprocessen zijn de functies van die processen. Als je de functie nabootst, heb je het mentale proces nagebootst.

We kunnen deze drie theorieën opvatten als militante formuleringen van de autonomie en ontologische compleetheid van respectievelijk de fysica (C1 en C2) en de psychologie (C3), inclusief AI (artificial intelligence). Ze zijn nogal overdreven precies in hun toekomstvoorspelling betreffende de ontwikkeling van de neurowetenschap en psychologie. Ik heb bij mijn kritiek op Churchland eigenlijk al aangegeven waarom de identiteitstheorie en het eliminatiefysicalisme me te simplistisch lijken. Ze ontkennen gewoon dat er waarnemers met ervaringen bestaan en concentreren zich op fysische aspecten van levende systemen. Als methodologie is dat – net als behaviorisme – zeker nuttig voor het vergaren van wetenschappelijke kennis, maar als serieuze theorie schiet het op dezelfde manier als het behaviorisme tekort door te ontkennen dat ‘ervaringen’ onderzocht moeten worden. Welke evidentie is er dat concepten als pijn en vreugde zinloos zijn, bedacht door een voorhistorische volkpsychologie, die gewoon zal verdwijnen onder de schroeiende zon van de neurowetenschap (zoals Churchlands eliminatiefysicalisme aanneemt)? Is pijn echt *identiek aan* de activiteit van C-vezels (zoals type-type identiteitstheoretici aannemen), of nog erger zijn er ook allerlei machines die overeenkomstige functies kunnen hebben en die dus ook pijn kunnen hebben (teken-teken identiteitstheorie)? Het lijken me vreemde uitgangspunten.

Omdat functies niets zeggen over de ruimte-tijd voorwaarden

van implementatie, leidt functionalisme tot veel lichtzinnige speculaties. Een functie is ruimte- en tijdloos, onfysisch, als je hem onbelichaamd beschouwt. Levende systemen, organismen, hebben echter bepaalde afmetingen, bepaalde structuren en ze leven op een bepaalde tijdschaal. Die fysische aspecten en randvoorwaarden zijn juist specifiek voor organismen, niet irrelevant, zoals het functionalisme meent (zie hoofdstuk 5). Het functionalisme heeft al vele onzinnige gedachtenexperimenten voortgebracht, zoals de chipmens. Vervang alle biologische structuren stap voor stap door chips die dezelfde functies vervullen, en je krijgt een chipmens die qua gedrag niet van de echte te onderscheiden is.

Gedachtenexperimenten zijn niet aan fysische randvoorwaarden gebonden en men kan er dus alles mee bewijzen. Als je van de fiets alle functies vervangt door chips die dezelfde functie vervullen, krijg je een chipfiets die vermoedelijk in de handpalm past. Reis eens in gedachten met twee keer de lichtsnelheid of wandel op de zon. Tover met een kus een kikker om tot prins(es), of loop zonder hulpmiddelen over het (onbevroren) water. Als gedachtenexperiment kan alles, in de fysische wereld echter niet. Zo zie ik ook de chipmens en het hele programma van het functionalisme. Het is geen toeval dat er zo'n sterke band is tussen AI (artificial intelligence) en functionalisme. Beide concentreren zich op vrij belichaambare symbolsystemen, zonder zich te bekommeren om fysische en evolutionaire randvoorwaarden. Logica, taal en wiskunde zijn hun domeinen, niet de noodzaak van een spijsvertering, voortplanting, ruimtelijke oriëntatie, integriteitsbescherming, kortom niet het leven met een echt lichaam in een echte wereld.

4.2 Filosofisch idealisme versus realisme

4.2.1 De uitgangspunten

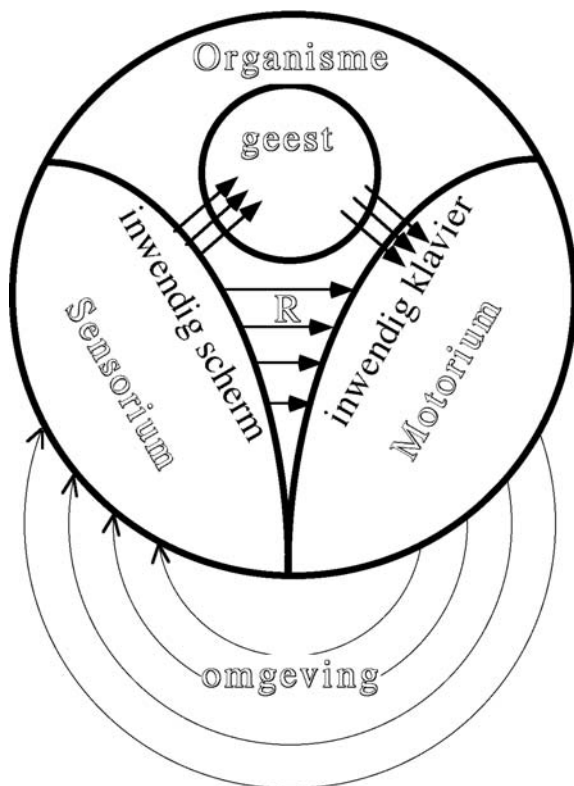
Locke ging ervan uit dat er een werkelijkheid bestaat, die (1) onafhankelijk is van onze waarneming, maar waarover (2) alleen de waarneming ons kennis verschaft. Uitgangspunt (1) noemt men in de filosofie realisme en uitgangspunt (2) empirisme. Rationalisten namen meestal ook aan dat de door denken en redeneren verkregen kennis betrekking had op een onafhankelijk van de waarnemer/denker bestaande 'werkelijkheid' en waren dus meestal realisten, maar natuurlijk geen empiristen. George Berkeley (1684-

1753) volgde Locke in zijn empirisme. Echter hij had problemen met Locke's onderscheid tussen primaire en secundaire waarnemingskwaliteiten. Onder de primaire waarnemingskwaliteiten die volgens Locke in de 'echte wereld' en buiten de waarnemer bestonden, vielen onder meer uitgebreidheid, vastheid, beweging. De secundaire waren louter het gevolg van de structuur van onze waarnemingssystemen en dus geheel subjectief, niet corresponderend met iets wat buiten de waarneming bestaat. Een voorbeeld is kleur. Een voorwerp heeft geen kleur, dat geven onze zintuigen eraan. Het heeft wel een bepaalde uitgebreidheid, ongeacht of we kijken. Berkely vond dat inconsequent gedacht en stelde dat alle waarnemingen van secundaire aard zijn. Hij noemde objecten 'ideeën' (immers het zijn brokjes kennis oftewel ideeën en alle kennis komt volgens empiristen uit de zintuigen) en stelde dat een idee (object) alleen bestaat als het waargenomen wordt. Men noemt deze stroming in de filosofie idealisme. Dit is een verwarrend woord, omdat het ook in een heel andere, namelijk politieke, betekenis wordt gebruikt. Dan komt het van 'ideaal-isme', terwijl het woord in de filosofie van 'idee-isme' stamt.

Blackmore (1979) bespreekt de diverse mogelijkheden tot verwarring en de verandering in de betekenis van de termen idealisme versus realisme in de periode tussen de Middeleeuwen en Berkeley's tijd. Wij volgen Berkeley, die stelde dat 'bestaan' vereist waargenomen te worden: *esse est percipi*. Dat is idealisme. Blackmore (1979) zegt het zo: "*Berkeleyan idealism in the sense of 'to be is to be perceived' is also called phenomenalism, neutral monism, subjective idealism, and among philosophical amateurs 'empiricism'.*" Daarmee kennen we onze plaats weer en weten wat er met idealisme wordt bedoeld.

Berkeley liet zich bij het opstellen van zijn idealisme mogelijk mede inspireren door het toen zeer gevierde model van Descartes, dat in figuur 18 is geschetst. Descartes zag de mens als een systeem bestaande uit materiële processen in een sensorium en een motorium, beide extern gekoppeld aan de omgeving en intern onder andere verbonden door reflexbanen. Dit deel hadden dieren ook, maar de mens had daarnaast volgens Descartes nog een niet-materiële geest, die als een soort supervisor het sensorium in de gaten hield en het motorium bespeelde (zie figuur 18).

De consequenties van het model van Descartes voor de vraag wat met 'werkelijkheid' bedoeld kan worden, zijn in Berkeley-aanse termen schokkend. Immers, hoe kan de geest nu weten dat



Figuur 18 Schema van het interactionistisch dualisme volgens Descartes. De geest wordt volgens hem alleen bij de mens gevonden en is niet materieel, maar staat via een speciaal hersendeel in contact met de rest van de hersenen.

er een buitenwereld bestaat? De geest ontvangt alleen gegevens uit het sensorium, dat wil zeggen het geheel der zintuigen, en speelt alleen een ander intern systeem, het motorium. Alles wat we aan zintuigelijke inhouden hebben (voor Berkeley als empirist was dat de enige basis van onze kennis) is in feite slechts sensori-umactiviteit. De geest kan niet weten hoe die ontstaan is. De geest kent alleen de neuronale signalen uit het sensorium en zijn eigen commando's aan het motorium, maar niet de wereld zelf, niet een 'werkelijkheid' buiten het sensorium of motorium. Het is denkbaar dat het sensorium spontaan actief is, dat het motorium direct aan het sensorium gekoppeld is in plaats van er via de buitenwereld op in te werken, zodat de illusie ontstaat dat er een buitenwereld is. Niets geeft aan dat het nodig is in een onafhankelijke bui-

tenwereld te geloven. Dit onderbouwt Berkeley's stelling dat de werkelijkheid uitsluitend in de waarneming bestaat en niet onafhankelijk is van een waarnemer. Bertrand Russell (1946) zegt het als volgt: "*He maintained that material objects only exist through being perceived. To the objection that, in that case, a tree, for instance, would cease to exist when no one was looking at it, he replied that God always perceives everything.*" In moderne 'virtual reality'-simulaties hebben we een beetje een Berkeleyyaanse situatie van een 'niet-bestaande' buitenwereld, die door motorium en sensorium samen met een computer tevoorschijn wordt getoverd. Overigens mag in de lus motorium-sensorium best een stuk van wat wij de buitenwereld noemen meegenomen worden, want die kun je net zo goed (vergeleken met alternatieve analyses met fysische meetinstrumenten) als 'virtual reality', als illusie van de geest zien (zie hiervoor §4.2.2).

Sommige denkers gingen een stap verder dan Berkeley door op te merken dat als men geen reden heeft om in een onafhankelijk van de waarneming bestaande buitenwereld te geloven, er ook geen reden is om in het bestaan of bewustzijn van andere organismen te geloven. Alleen van het bestaan van mezelf ben ik me bewust, alleen mezelf neem ik waar, en zelfs als dat een illusie van mijn zintuigen is, bestaan toch mijn zintuigen. Descartes' zei "ik denk dus ik ben", en dat wordt nu zoiets als "ik neem waar dus ik ben". Niets anders is zeker, dus we kunnen niet voetstoots aannemen dat er een buitenwereld en andere denkende en voelende mensen/dieren zijn. Dit standpunt noemt men solipsisme en hoewel het vergezocht klinkt, vinden velen het logisch goed verdedigbaar en onfalsificeerbaar.

Als we ons pragmatische criterium van wetenschappelijkheid uit hoofdstuk 2 gebruiken, moeten we ons afvragen of het solipsisme of, minder extreem, het idealisme van Berkeley, voorspellende of verklarende kracht heeft. Helpt het ons verder met het wetenschappelijk onderzoek, is het een goed denkgereedschap? Als dat niet zo is, kunnen we het alternatief op bruikbaarheid onderzoeken. Merkwaardigerwijze heeft het voor de hand liggende alternatief, het realisme, in de moderne natuurkunde minder succes met het verklaren van gedrag op het niveau van elementaire deeltjes dan een vorm van idealisme. Beginnend met de ideeën van N. Bohr is men in toenemende mate gaan beklemtonen dat het gedrag van de natuur niet onafhankelijk is van de wijze van observatie/meting. Misschien wordt de natuur dus wel door de

meting gecreëerd. Realisme is uit de mode in de natuurkunde. Moeten hersenonderzoekers eigenwijs zijn en het realisme aan blijven hangen? Of geldt wellicht het idealisme op het niveau van de kwantummechanica (microkosmos), en het realisme op het niveau van de fenomenologische natuurkunde en de supramoleculaire biologie?

De basis van het solipsisme vervalt en ook het idealisme zoals Berkeley dat formuleerde wordt minder aantrekkelijk, als we de 'geest' in figuur 18 onttronen en verdelen over sensorium en motorium. We kunnen dan stellen dat de geest direct naar de buitenwereld kijkt en er direct op inwerkt ('direct realisme' volgens Gibson), met andere woorden dat 'geest' een ander woord is voor de gehele verzameling sensorimotor-processen van het organisme en wellicht zelfs nog heel wat interactie met de omgeving mede omvat (lussen door de buitenwereld). Dit lijkt me aantrekkelijk, ook omdat we met zo'n aanpak tevens het homunculusprobleem elimineren. Immers, zoals figuur 18 ook aangeeft, de 'geest' kijkt naar een intern scherm, de basis van ons homunculusprobleem. Als we de homunculus H laten samenvloeien met het organisme waar hij/zij in zit, zijn we van de regressie van H in H in H etcetera, af. Het interne scherm is dan weg en we verwachten een graduele vervlochten overgang van sensorium naar motorium en via de buitenwereld weer terug. De homunculus zit in dit model al in het netvlies, reukepitheel en dergelijke en loopt door tot de spieren en klieren, of zelfs vandaar via de buitenwereld weer terug naar het sensorium, als een slang die in zijn eigen staart bijt. Waarschijnlijk vereist de eliminatie van de homunculus dat we de actie-perceptie lus op deze wijze gesloten houden in plaats van hem open te knippen, om de perceptiemechanismen geïsoleerd te kunnen bestuderen (figuur 24 in hoofdstuk 5; zie ook Van de Grind, 1984).

Nochthans blijft het probleem bestaan van de introspectief zekere 'zelfbewuste geest', die bepaalde informatie uit het zenuwstelsel op lijkt te kunnen pikken (al is het meeste introspectief ontoegankelijk). Zelfs als we die zelfbewuste geest zien als neuronale 'scanner', zoals Armstrong doet, blijft het probleem, dat de scanner niet kan weten of hij bedrogen wordt en lijken we weer met een vorm van solipsisme te zitten. Echter nu kunnen we het realisme te hulp roepen en stellen dat de scanner een redelijk betrouwbaar mechanisme is, dat de wereld bestaat, het lichaam en zenuwstelsel ook en

dat de scanner dus meestal correct over de bestaande wereld inclusief ons eigen lichaam rapporteert. Maar aan wie? Mogelijk vinden we het antwoord in hoofdstuk 5.

4.2.2 *Realisme versus idealisme in de wetenschapstheorie*

In het bovenstaande hebben we de tegenstelling realisme-idealisme naar voren gebracht in het kader van individuele cognitieve processen. Vergaren we als individu kennis over een autonoom bestaande wereld (realisme) of is dat een illusie van de geest (idealisme). We kunnen het idealisme van Berkeley best huiselijker formuleren dan tot nu toe. Laten we daartoe terugkeren tot het voorbeeld van het horen van een geluid, de kritiek die ik in §4.1.3 leverde op de uitspraak van Churchland dat geluid een compressiegolf is. Berkeley vroeg zich af of het geluid van de vallende boom in het bos wel bestond, als er niemand was om het te horen. We zouden zonder moeite met zijn ontkenning kunnen instemmen door te stellen dat er een waarnemer moet zijn alvorens een luchttrilling inderdaad geluid wordt (zie §4.1.3). De eigenschappen die wij als waarnemers van objecten oppikken, zijn niet dezelfde als die welke de fysica in een diepgravende analyse met meetinstrumenten en theorieën te berde brengt. De eigenschappen die wij waarnemen zijn in die zin neuronaal gefabriceerde ‘illusies’, zoals eetbaarheid, vriendelijkheid, roodheid, enzovoorts. Ze ontstaan door onze waarneming, door overlevingsgerichte ‘meting’ aan de omgeving.

Het fysische meetprobleem is echter analoog. Door theoriegedreven te meten aan de natuur krijgt men meetgegevens die dankzij de theorie ingebed worden in specifieke concepten (bijvoorbeeld de spin van deeltje X). Bij een andere theorie zou men mogelijk andere metingen doen die bij andere concepten passen. Heeft men de specifieke concepten van een bepaalde theorie (foton, electron, gluon, enzovoorts) nu niet gewoon geschapen en leidt de meting van hun eigenschappen door interactie met de wereld dan niet ook tot een ‘illusie’ in vergelijking met andere theorieën en meetprocedures? Iedere wijze van waarnemen zou best zijn eigen wereld kunnen scheppen, die ten opzichte van een ander waarnemingssysteem een ‘illusie’ oplevert. Zo gezien is het idealisme niet zo absurd als het op het eerste gezicht lijkt. Het ‘realisme versus idealisme’-probleem van de menselijke waarneming geldt net zo goed voor fysische meting. In die context vinden we

de discussie over realisme versus idealisme dan ook terug. Van Fraassen heeft een moderne vorm van Berkeley's idealisme geformuleerd die hij constructief empirisme noemt (ook Berkeley was empirist) en in Churchland & Hooker (1985) gaat hij de discussie hierover aan met een groep aanhangers van het realisme, waaronder P.M. Churchland voornoemd.

Realisten zien de wetenschap als een poging via meting en theorie een letterlijk juiste beschrijving te geven van de wereld zoals die feitelijk is. De wereld is een absoluut gegeven, iets wat echt bestaat en niet afhankelijk is van hoe we eraan meten en wat onze theorieën erover zeggen. Alleen als een theorie en de bijbehorende voorspellingen de 'echte' wereld goed vatten, zullen ze empirisch bevestigd worden. Zodoende benaderen we in onze theorieën steeds beter de perfecte beschrijving van hoe de wereld echt in elkaar zit. Theoretische concepten in de uiteindelijk juiste theorieën zullen dan automatisch corresponderen met niet of nog niet waarneembare grootheden in de echte wereld. Acceptatie van een theorie betekent in het realisme: aannemen dat die 'waar' of bij goede benadering 'waar' is, dat wil zeggen dat alle voorspellingen die eruit volgen redelijk zullen kloppen, en dat alle theoretische concepten erin zinvol zijn, dat wil zeggen slaan op corresponderende entiteiten in de echte wereld. Vele realisten voegen daar nog stellingen aan toe over hoe de wereld er vermoedelijk uitziet. Zo zei Einstein dat God niet dobbelde, waarmee hij bedoelde dat de wereld deterministisch is, dat er geen inherente onvoorspelbaarheden overblijven als we de goede theorie te pakken hebben. Ook zegt men in dit verband wel dat God een wiskundige is, zodat de wereld automatisch moet passen bij de mooiste wiskundige beschrijving. Elegantie en eenvoud moeten wel de kenmerken zijn van juiste theorieën. Realisten zien de oppervlakkige kenmerken van de wereld die bij nadere analyse bedriegelijk lijken, als een soort sluiers die weggetrokken moeten worden om de echte wereld te leren kennen. Het doel van de wetenschap is de 'waarheid' over de wereld te achterhalen. In de visie van het realisme benadert de wetenschap deze ultieme waarheid steeds dichter, is wetenschappelijke kennis cumulatief en kan een bepaalde wetenschap – bijvoorbeeld de natuurkunde – op een bepaald moment 'af', 'volledig', zijn. Zoals in hoofdstuk 2 al werd opgemerkt, is dit ook het beeld van de populaire pers over de wetenschap, en een algemeen volksgeloof. Er zijn nog wat problemen, wat hobbels te nemen, en dan zullen we de volle waarheid

over X kennen, waarbij X uw favoriete onderwerp is (kanker, aids, ontstaan van het heelal, oorsprong van het leven, werking van de hersenen, enzovoorts). Niets is principieel onkenbaar.

Hoewel natuurlijk niet alle moderne realisten alle van de hier samengevatte ideeën omarmen, geeft deze korte beschrijving een beeld van een vorm van het realisme, zoals die door sommigen onverkort en door anderen met modificaties op onderdelen, wordt aangehangen. Een aantal van de oorspronkelijke empiristen was tegelijkertijd realist, maar Berkeley ontwikkelde vanuit het empirisme juist de anti-realisme gedachten, die we al kort schetsen. Daarom noemen sommigen die niet in het realisme geloven zich 'empirist', zo ook Van Fraassen. Hij formuleert als doel van de wetenschap: theorieën opstellen die empirisch adequaat zijn. Met empirisch adequaat bedoelt hij gewoon dat de theorieën juiste voorspellingen doen, voorspellingen dus die blijken te kloppen als je op de juiste (in de theorie aangenomen) wijze meet. Het accepteren van een theorie is in zijn ogen dan ook niet meer dan erkennen dat de theorie empirisch adequaat is. Werkelijkheid is een constructie uit ervaring (meting), niet iets wat onafhankelijk bestaat, vandaar de naam 'constructivistisch empirisme'. Deze en vele vergelijkbare idealistische theorieën volgen min of meer natuurlijk uit de moderne fysica. De kwantummechanica is een formele discipline die prima voorspellingen oplevert, maar waarvan niet goed valt te zeggen of er theoretische termen, concepten, in voorkomen die één-op-één corresponderen met een aspect van een 'echte' wereld. Waarom zou je die echte wereld dan aannemen? Als de voorspellingen maar bevredigend vertellen wat je vindt als je een meting doet, heb je immers een adequaat denkge-reedschap, een geconstrueerde 'wereld' (een model) die (dat) empirisch adequaat is. De nadruk ligt op het precies specificeren van meetprocedures. Als je zo en zo te werk gaat, vindt je dat en dat.

Ik heb in hoofdstuk 2 al betoogd dat de algemene pragmatische opvatting van de wetenschap dichter bij van Fraassen staat dan bij de realisten. We proberen theorieën te ontwerpen die verrassende voorspellingen doen, die nog blijken te kloppen ook. Ieder van de successen geeft ons een betere greep op de processen die voor ons van belang (bruikbaar) zijn. Dat soort kennis levert de wetenschap, de rest is bespiegeling en geloof. Leuk dus, maar niet belangrijk voor het wetenschapsbedrijf op zich (mogelijk wel als denkoefening of motivatie voor de deelnemers). De strijd in de

wetenschap gaat normaliter tussen theorieën die goed zijn en theorieën die nog beter zijn in voorspellend opzicht. Als een bepaalde theorie al generaties lang de beste is in dit opzicht, weten we toch nog niet of hij 'waar' is, want morgen kan er een andere worden ontwikkeld die nog beter voorspelt, of die meer kennis integreert.

Vrijwel alle wetenschappers zien daarom, impliciet of expliciet, theorieën en kennis als producten van een soort evolutieproces. Zoals ook het biologisch evolutieproces geen einddoel heeft, maar zich alleen op pragmatisme baseert (wat werkt dat werkt), zo ziet men dat vrij algemeen ook bij wetenschappelijke theorieën en modellen. Kortom, of nu uiteindelijk realisme of idealisme beter is als aanname, kan men af laten hangen van het empirisch succes van de voorspellingen die deze aannames opleveren. In de moderne natuurkunde is de stand 1-0 voor constructief empirisme (idealisme). Hoe het verder gaat wachten we af. Wie zich in de discussie wil mengen wordt aangeraden bij Churchland en Hooker (1985) te beginnen, en zich via de referenties daarin tot kenner te ontwikkelen. Voor de alledaagse praktijk in de natuurwetenschap heeft de discussie voorlopig relatief weinig belang.

4.3 Eerste aanzetten tot functielocalisatie in het zenuwstelsel

4.3.1 Globale kenmerken van het zenuwstelsel van vertebraten

Het analyseren van de fylogenetische ontwikkeling van zenuwstelsels is niet eenvoudig. Er is geen duidelijke sequentie van kleine evolutiestapjes aan te geven die leidde van oervertebraat tot de mens. Veel tussenstadia zijn speculatief en grotendeels spoorloos verdwenen. Bovendien compliceert het verschijnsel van de convergente evolutie een poging tot reconstructie. Convergente evolutie wil zeggen vergelijkbare aanpassing van dieren uit totaal verschillende evolutielijnen aan vergelijkbare aspecten van hun leefomgevingen. Een uil en een kat bijvoorbeeld jagen beide in schemerduister op kleine zoogdieren zoals muizen. Hiertoe is steelse nadering, geduld en het vermogen goed stil te zitten nodig, evenals binoculair zien bij lage lichtsterkten. Men kan dus overeenkomsten verwachten die met de levensstijl en niet met de afstamming van de soort te maken hebben. Ecologische en fylogenetische factoren kunnen elkaar wederzijds maskeren.

Als we erop staan zo goed mogelijk een antropomorfe evolutieschaal te ontwerpen, dan zou dat zoiets worden als mens – chimpansee – aap – stekelvarken – buidelrat – schildpad – salamander – beervis – kaakloze vis (Walker, 1983), waarbij ieder van die diersoorten model staat voor een gemeenschappelijke voorouder. We moeten natuurlijk niet denken in termen van de helaas gebruikelijke, maar zeer foutieve metafoor van het evolutieproces als ‘boom’, met een herkenbare stam (hoofdlijn) die de mens als culminatie heeft. Zelfs de betere metafoor van een woeste struik, waarbij veel autonome ‘takken’ alleen dicht bij de wortels bij elkaar komen en er geen gemeenschappelijke stam bestaat, is misleidend. Immers bij dat soort groeisel gelden mechanische randvoorwaarden die voor de hypothetische struik van de evolutie niet gelden. (Met een metafoor importeert men naast gewenste betekenissen ook dit soort ongewenste betekenissen, zie ook hoofdstuk 2.) Een zijtak van een echte struik is bijvoorbeeld altijd dunner dan de tak waaraan hij vastzit. Dat hoeft bij de hypothetische evolutiestruik niet zo te zijn. Aan dunne ‘oorsprongtakken’ kunnen daarbij veel dikkere en zwaardere groeisel zitten. Toch is er ook bij zo’n hypothetische woeste struik steeds een kortste pad van een bepaald blad (huidig levende soort) terug naar een gemeenschappelijk beginpunt met willekeurig welk ander blad aan willekeurig welke andere tak. Zo’n punt is het afsplitsingspunt van de twee vanaf daar autonome lijnen waar de twee bladeren toe behoren.

De genoemde diersoorten behoren ieder tot een afstammingslijn, die naar prominente afsplitsingspunten voert op de lijn van de mens terug naar de gemeenschappelijke oorsprong, de kaakloze vis. Een probleem is dat we niet weten hoe representatief de genoemde moderne dieren zijn voor hun voorouders, zoals die leefden op het moment van afsplitsing. Zo zijn schildpadden moderne vertegenwoordigers van voorouders van 320 miljoen jaar geleden, die ongeveer tegelijk leefden met de splitsing tussen zoogdierlijn en de dinosauriërslijn (waaruit later de vogellijn ontstond). Hoe representatief is de huidige schildpad voor zijn voorouders van toen? Zonder zulke kennis is een systematische analyse van de preciese aard en volgorde van de veranderingen tijdens de diverse afsplitsingen bijzonder moeilijk. Daar komt bij, dat er zelfs nauwelijks pogingen gedaan zijn de zenuwstelsels van deze dieren in hun fylogenetische relatie te onderzoeken. Meestal wordt vrij arbitrair de reeks mens – resusaap – kat – rat – vogel – karperachtige bekeken. Het is dus niet goed mogelijk de fylogenese van het ze-

nuwstelsel van vertebraten systematisch en precies te reconstrueren in vergelijkend anatomisch en vergelijkend fysiologisch perspectief. Desondanks kan er wel vrij veel zinnigs over worden gezegd, dankzij de vele gedetailleerde studies van veel verschillende zenuwstelsels, zie bijvoorbeeld Roth & Wullimann (1996). In deze subparagraaf beperken we ons tot de meest globale kenmerken, zoals de massa en het aantal zenuwcellen per brein, om dan in de volgende (§4.3.2) na te gaan in hoeverre in deze breinmassa bepaalde functies gelocaliseerd kunnen worden. Bij die functielocalisatie beperken we ons tot de primaten, vooral de mens, omdat daarover het meeste bekend is in dit opzicht.

In de componenten van zenuwstelsels van verschillende dieren zijn in algemene zin geen fundamentele verschillen gevonden. Neuronen van een zeeslak, olifant of mens zien er in principe vrijwel hetzelfde uit, zijn van vergelijkbare grootte, en vertonen in essentie dezelfde elektrische en biochemische eigenschappen. De overgrote meerderheid van de neurotransmitters en bijbehorende membraanreceptoren zijn fylogenetisch oud en zijn dus voor alle zenuwstelsels die tot nu toe hebben bestaan ter beschikking geweest. Wel zijn er grote verschillen tussen diersoorten in het aantal neuronen per zenuwstelsel en hun ruimtelijke ordening (het 'bouwplan'). Sommige weekdieren en insecten hebben slechts tienduizend tot tien miljoen neuronen, de mens minimaal 10^{11} tot 10^{12} . De variatie in gemiddelde grootte van zenuwcellen in het dierenrijk is zeer gering vergeleken met de variatie in het lichaamsgewicht, namelijk respectievelijk ruwweg een factor 10 en ongeveer een factor 10^8 als we alleen dieren met een ontwikkeld zenuwstelsel meerekenen. Het totale bereik aan gewichten in het dierenrijk van eencellige tot blauwe vinvis is zelfs 10^{21} . Zodoende is de hersenmassa in eerste benadering representatief voor het aantal zenuwcellen. Zou hersenmassa positief correleren met intelligentie? Laten we die gedachte eerst binnen onze eigen soort bekijken (zie voor een verkorte en enigszins gepopulariseerde versie van grote delen van de rest van dit hoofdstuk: Van de Grind, 1996b).

Stephen Gould (1981) bespreekt op smakelijke wijze de ruzies tussen de diverse 'hersennassameters' uit de vorige en het begin van deze eeuw over de betekenis van hersenmassa. De Amerikaanse neuroloog Spitzka publiceerde bijvoorbeeld een plaatje dat de hersenen van de beroemde wiskundige K.F. Gauss vergeleek

met die van een bosnegervrouw en een gorilla. Hij vond de stap in hersengrootte van Gauss naar bosnegervrouw even groot als van bosnegervrouw naar gorilla. In een ander plaatje vergeleek hij de hersenen van drie eminente blanke mannen. Hun hersenmassa's verschillen onderling praktisch even sterk als die van het eerstgenoemde plaatje. Spitzka verklaarde voor dit geval de verschillen echter uit allerlei correctiefactoren voor ouderdom, lichaamsbouw en dergelijke.

Broca, een beroemd Frans neuroanatom en neuroloog, gaf een vernietigend commentaar op de stelling van een andere Franse neuroloog, Gratiolet, die beweerde dat hersenmassa niet correleert met denkvermogen. Gratiolet, die minder prominent was, schrok en nuanceerde zijn stelling. Toch trachtte hij zijn stelling vervolgens verder te onderbouwen. Hij rapporteerde dat Duitsers gemiddeld 100 gram zwaardere hersenen hebben dan Fransen, en concludeerde dat dit bewees dat hersenmassa niets met denkvermogen te maken kon hebben. Immers in Duitsland kon men zeker niet beter denken dan in Frankrijk. In antwoord hierop reedeneerde Broca de verschillen meer dan weg en kwam na uitvoerige discussie tot de conclusie dat Fransen gemiddeld zelfs méér hersenen hebben dan Duitsers, mits je op de juiste wijze corrigeert.

Het gemiddelde hersengewicht van een grote groep mensen lag rond de 1400 gram voor mannen en 1300 gram voor vrouwen. Broca's eigen hersenmassa bleek later (oh schandel!) vrijwel gelijk aan het mannelijk gemiddelde te zijn. Opvallend is de grote spreiding in hersenmassa van beroemde mannen, zoals de volgende lijst illustreert:

Toergenjev (Russisch dichter, 1818-1883 = 65 jr)	2000 gram
Cuvier (Franse zoöloog, 1769-1832 = 63 jr)	1830 gram
Gauss (Duitse wiskundige, 1777-1855 = 78 jr)	1492 gram
Broca (Franse neuroloog, 1824-1880 = 56 jr)	1424 gram
Walt Whitman (Amerikaanse dichter, 1819-1892 = 73 jr)	1282 gram
Franz Joseph Gall (Duitse frenoloog, 1758-1828 = 70 jr)	1198 gram
A.France (Franse schrijver, 1844-1924 = 80 jr)	1017 gram

Om deze spreidingen te verklaren moesten de hersenmetristen zich in nogal wat bochten wringen. Er werden veel correctiefactoren voorgesteld, zoals de invloed van lichaamsgewicht, voedingsgewoonten en ouderdom. Toch bleef het pijnlijk dat een zo groot geleerde als Gauss, zonder twijfel één der belangrijkste wiskundigen aller tijden, met zijn hersenmassa van 1492 gram zo

dicht bij het gemiddelde zat. Bischoff publiceerde gegevens over de hersenmassa van misdadigers en verergerde daarmee het probleem. De brute geweldsmisdadiger Le Pelley had met 1803 gram maar liefst 311 gram meer hersenmassa dan Gauss. Bischoff vond zelfs een vrouw met meer hersenmassa (1565 gram) dan Gauss, maar die had dan ook haar man vermoord.

Het idee om te corrigeren voor lichaamsgewicht volgde vooral uit de vergelijking van hersenmassa's van verschillende vertebraten. Immers, als men de mens aan de top wil, dan moet er een correctie worden gevonden voor bijvoorbeeld de olifant, die gemiddeld 3,5 keer zoveel hersenmassa heeft als de mens. Deelt men hersenmassa door lichaamsmassa, dan ontstaat een schaal van relatieve hersenmassa. Op die schaal echter scoort de spitsmuis 1,5 keer hoger dan de mens. Meer in het algemeen blijkt, dat kleine dieren op zo'n schaal hoger scoren. Een algemenere aanpak is te vinden in de allometrie. Allometrie is de studie van de verandering van proporties die correleert met de verandering van lichaamsgrootte of -volume (McMahon en Bonner, 1987). Men spreekt over positieve allometrie als een orgaan sneller dan de rest van het lichaam in massa of volume toeneemt. Een algemene allometrische wet die de relatie tussen hersengewicht H en lichaamsgewicht G geeft voor een zeer groot aantal soorten vertebraten is als volgt:

$$H = c \cdot G^{2/3} \approx k \cdot A$$

met A = lichaamsoppervlak en c en k constanten. Figuur 19 illustreert deze relatie, waarbij we zien dat de beste databeschrijving met deze $2/3$ -machtswet voor 'lagere' vertebraten (beenvissen en reptielen) wordt bereikt met c -waarden (ca. 0,007) die een factor 10 lager liggen dan die voor hogere vertebraten (zoogdieren en vogels). De hogere vertebraten hebben dus zo'n 10 keer grotere hersenmassa dan lagere vertebraten van gelijk lichaamsgewicht. Deze factor 10 hoeft overigens absoluut niet met 'slimheid' te correleren. Het verschil in hersenmassa kan ook te maken hebben met het fysiologische verschil tussen poikilothermie en homiothermie. Poikilotherme dieren nemen de temperatuur van de omgeving over (men noemt dit ten onrechte wel eens 'koudbloedig', maar de bloedtemperatuur kan in tropische streken soms aardig oplopen). Homiotherme dieren (ook wel warmbloedigen genoemd) hebben hun eigen thermostaat en houden hun lichaamstemperatuur daarmee op een constante, relatief hoge waarde.

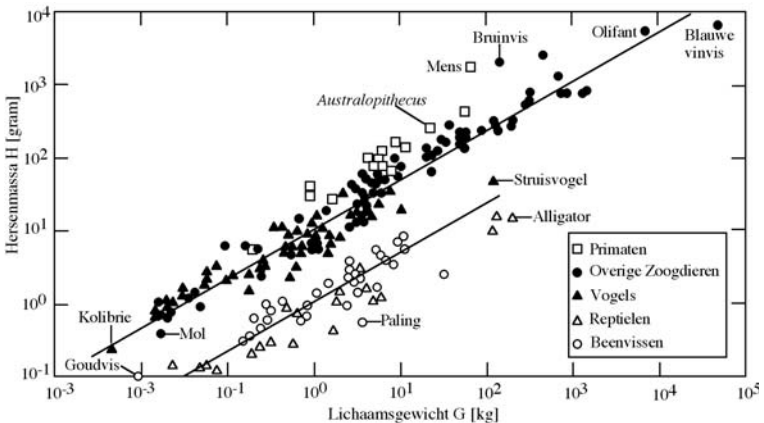
Het zogenaamde encefalisatiequotiënt EQ houdt rekening met deze allometrische wet. Stel E_w is de werkelijk gemeten gemiddelde hersenmassa van een diersoort en E_T is de theoretisch volgens de gegeven allometrische relatie te verwachten gemiddelde hersenmassa van die soort. Dan definieert men het encefalisatiequotiënt als:

$$EQ = E_w/E_T$$

Op zo'n EQ -schaal scoort de mens veruit het hoogst en vinden we:

mens	7,17
chimpansee	2,56
olifant	2,05
varken	0,59
spitsmuis	0,57

Dat is het type resultaat dat velen zoeken en geruststellend vinden, vooral via de onuitgesproken gedachte dat intelligentie recht evenredig zou kunnen zijn met deze EQ -waarden.



Figuur 19 Schalingswetmatigheid voor de hersenen van vertebraten. De hersenmassa blijkt globaal gezien evenredig met het lichaamsoppervlak A (oftewel de $2/3$ macht van de massa of het volume) te zijn. Let op de log-log schalen in deze grafiek. Op die schalen wordt een machtswet een rechte lijn, waarvan de helling gelijk is aan de macht, hier dus $2/3$. De ingetekende rechte lijnen hebben de juiste helling, maar zijn verder vrij arbitrair op het oog door de puntenwolken getrokken. Vrij naar McMahon en Bonner (1987).

Een reden waarom men voorzichtig moet zijn met dit soort wetmatigheden en hun vaak impliciete interpretaties is dat er heel andere correlaties aan ten grondslag kunnen liggen dan men vermoedt. Zo zouden behalve gewicht en het verschil tussen homiothermie en poikilothermie ook eetgewoonten grote invloed kunnen hebben. Zowel onder primaten als onder vleermuizen blijken bijvoorbeeld de fruitetende soorten een significant hogere EQ te hebben dan insectenetende of bladerenetende soorten. Eenzelfde positieve correlatie werd gevonden met de grootte van het voedselzoekgebied. Bij voedselspecialisten zijn deze zoekgebieden groter dan bij voedselgeneralisten, dieren die een breed spectrum aan soorten voedsel eten (Harvey en Clutton-Brock, 1983).

Eén van de vele andere suggesties uit de vorige eeuw was dat grotere intelligentie bij de mens behalve met hersenmassa ook correleert met een groter hersenoppervlak, met meer convoluties van de hersenen. Dit gold bijvoorbeeld volgens Spitzka voor Gauss van wie hij de hersenkronkels op het oog vergeleek met die van een papoea om te kunnen begrijpen hoe Gauss met zo'n matig hersengewicht toch zo slim kon zijn geweest. Je vraagt je natuurlijk wel af over welke slimheid we het hier hebben. De papoea uit deze vergelijking zal waarschijnlijk veel knapper zijn geweest in het overleven in een oerwoud dan Gauss. We weten niet of dit wellicht meer eist van de hersenen dan wiskunde. Het idee van een correlatie tussen intelligentie en hersenmassa lijkt bovendien strijdig met moderne bevindingen van onderzoek aan personen met een waterhoofd (hydrocephalus). De Engelse neuroloog J. Lorber deed onderzoek met hersenscanmethoden aan de hersenen van begaafde personen met een waterhoofd. Bij deze personen is tengevolge van een verhoogde cerebrospinale vloeistofdruk de hersenmantel samengedrukt tot een zeer dunne plak en zijn de ventrikels vergroot. Het verrassende is dat een flink deel van deze personen nauwelijks enige meetbare functiestoornis lijkt te hebben. Een zeer succesvolle student wiskunde bijvoorbeeld had in plaats van de gebruikelijke hersenmanteldikte van 4,5 cm slechts een manteldikte van enkele millimeters. Lorber schrijft enigszins overdreven: "He has virtually no brain". Hoewel dit voorbeeld dichter staat bij sensatiejournalistiek dan bij wetenschap en we dus voor overdrijving moeten corrigeren, suggereert het zeker dat met een platgedrukte cortex en dus met minder convoluties, eenzelfde type intellectuele prestaties mogelijk zijn. Nu is deze student nog geen Gauss en van hem weten we evenmin hoe hij het

zou doen in de barre strijd om het bestaan in een oerwoud zonder sociale steunverbanden.

Een andere mogelijkheid is dan toch weer de zogenaamde neuro-architectuur. In dit verband is het aardig om een onderzoek te vermelden aan de hersenen van Einstein. De neuroloog R. Wagner verrichtte in de jaren na Einsteins dood histologisch onderzoek aan Einsteins hersenen. Hij gebruikte hierbij monstertjes uit allerlei hersengebieden, kleurde die met een veelheid van technieken en vergeleek de microstructuur met die van referentiehersenen van 'doorsnee'-mensen die op ongeveer dezelfde leeftijd waren gestorven. Zijn conclusie was dat Einsteins hersenen in microstructuur niet verschilden van die van de gemiddelde man van dezelfde leeftijd. Het onderzoek raakte in de vergetelheid en de restanten van Einsteins hersenen verbleven jarenlang in een potje op een plank van een histologisch laboratorium. Een wetenschapsjournalist van *Science* ontdekte dit bij toeval en schreef een romantisch relaas getiteld 'Brain that rocked physics rests in cider box' (*Science* 201, Aug. 1978). Mogelijk hierdoor geïnspireerd bekeken Diamond e.a. (1985) dit probleem nog eens met een gliacelkleuring. Ze vonden dat in een bepaald gebiedje van Einsteins hersenen (area 39 volgens Brodman, zie figuur 20 die later aan de orde komt) een significant hogere gliacel/zenuwcel-verhouding bestond dan in 11 ermee vergeleken hersenen van andere mannen. De suggestie was dat een betere isolatie van de zenuwcellen of een betere metabolische verzorging bevorderlijk zou zijn voor het denkvermogen. Het zijn interessante, maar nogal incidentele bevindingen, temeer omdat de afwijkende verhouding niet gold voor drie andere gebiedjes van Einsteins hersenen. Gliacellen zorgen onder andere voor de isolatie van zenuwceluitlopers en vergroten de transmissiesnelheid van zenuwsignalen aanzienlijk. Het ligt daarom voor de hand te verwachten dat grotere diersoorten, waarbij signalen over grotere afstanden moeten worden getransporteerd, meer gliacellen in hun brein hebben. Dit zou een deel van de toename van het hersengewicht met de lichaamsgrootte van diersoorten kunnen verklaren. Of de variaties binnen de soort, zoals in het geval van Einsteins area 39, van belang zijn, valt nog te bezien.

4.3.2 *Funcielocalisatie en functionele architectuur*

De klassieke bespiegelingen over het brein waren niet, zoals veel modern hersenonderzoek, ‘bottom-up’, maar ‘top-down’. Men ging uit van een zeer globale karakterisering van mentale processen en postuleerde dan, zonder zich op empirische gegevens te beroepen, vrij arbitrair welke hersendelen voor die mentale processen verantwoordelijk moesten zijn. Zo zag Claudius Galenus (129-201) de hersenen al als zetel van het denken, waarbij de zintuigen en hersenventrikels de *pneuma*, de ‘*spiritus animalis*’ (geestesfluïdum) waarmee waargenomen en gedacht werd, bevatten (Grüsser & Landis, 1991). Het feitelijke denkwerk gebeurde dus volgens Galenus in de hersenholtes, de vier ventrikels. De laterale (zijwaarts gelegen) ventrikels bevatten volgens Galenus de ‘*sensus communis*’, een soort intersensorisch centrum waar gegevens van alle zintuigen werden gecombineerd, terwijl *cognitio* in de mediale (op de middenlijn gelegen) ventrikel en *memoria* in de posterioere (achteraan gelegen) ventrikel huisden. Het idee dat de feitelijke informatieverwerking in de hersenholtes gebeurde, heeft lang stand gehouden. Fluïdum (vloeistof of gas) werd kennelijk gemakkelijker met het flexibele, het plastische van de geest geassocieerd dan de vaste hersenmassa, de ‘verpakking’. Dankzij da Vinci (15e eeuw), Vesalius (16e eeuw) en Willis (17e eeuw) werd allengs duidelijker dat de zetel van het denken en de emoties in de hersenmassa te vinden moet zijn, niet in de holtes (Grüsser & Landis, 1991).

Al die tijd en verder tot diep in de twintigste eeuw streden globalisten en localisten over de vraag of je functies al of niet kunt toekennen aan bepaalde vaste plekken in het brein (of de ventrikels). Globalisten gingen ervan uit dat alles met alles samenhangt in het brein of dat globale velden de werking bepalen. Localisten stelden daar – net als Galenus in de grijze oudheid van het hersenonderzoek – tegenover, dat je iedere mentale functie kunt localiseren. Sommigen verbonden daaraan het idee dat er meer massa ter beschikking zou zijn voor de mentale functies die het meest ontwikkeld zijn. Een goed ontwikkelde mentale functie zou dus wellicht zelfs als een knobbel op de schedel voelbaar kunnen zijn. Frenologen, oftewel knobbelkundigen, stelden hiervan knobbelkaarten op. Uitdrukkingen als talenknobbel, wiskundeknobbel en dergelijke herinneren nog aan deze overdrijving van de localisatietheorie. Neurologisch werk in de laat negentiende en vroeg twintigste

eeuw, zoals de correlatie van functiestoornissen met na de dood gecontroleerde posities van de hersenbeschadiging, leek het pleit definitief ten gunste van de localisatietheorie (modulariteitstheorie) te beslechten. Het werk van Brodman en anderen in de twintiger jaren versterkte de localisatietheorie. Ze ontwikkelden relatief objectieve neuroarchitectonische criteria en toonden daarmee aan dat de cortex van de mens inderdaad nogal duidelijk in structureel verschillende gebiedjes onderverdeeld kan worden (zie figuur 20).

Toch stelde Lashley zo'n twintig jaar later een aantal heldere meer globalistische wetmatigheden op, waarmee hij meer aanzien gaf aan globalistisch getinte ideeën. Dat pastte eveneens beter bij het denken in de Gestalt-psychologie, waar men in termen van globale krachtenvelden in de hersenen dacht. In dezelfde tijd werd het ook mogelijk globale veldpotentialen te meten in het electroencefalogram (EEG) en wat men kan meten moet belangrijk zijn. Het localisme raakte daardoor wat uit de mode en de ster van het globalisme rees weer wat. Lashley bestudeerde de invloed van hersenlesies op doolhofleren bij ratten en vatte zijn bevindingen onder andere samen in *de wet van de massa-actie*:

“De mate van functiestoring (bij doolhofleren!) tengevolge van cortexlesies is onafhankelijk van de locatie van de lesie en evenredig met de grootte ervan.”

Lashley bestreedt niet de localisatie van functies in ruggemerg en hersenstam, maar in de cortex. Het probleem van Lashley's stelling is echter, dat doolhofleren zo weinig specifiek is. Als een rat blind gemaakt is en de poten niet meer goed kan bewegen, kan hij zich op zijn gehoor of reuk of het haptisch systeem nog naar het voedsel slepen. Deze omstandigheden, deze keuze van geteste vaardigheden, zijn natuurlijk niet bevorderlijk voor het localiseren van enige specifieke functie.

Localisatie van functie blijkt in elk geval goed te gaan als men de 'juiste keuze' van functie maakt. Al met kleine cortexlesies kan een vertebraat doof of blind worden gemaakt, kan een mens de vaardigheid kleuren te benoemen of gezichten te herkennen verliezen, mits de lesie 'op de goede plek' zit. Zoekt men echter de localisatie van het programma waarmee we de letter E schrijven, dan zal dat vrijwel zeker mislukken. Immers, als schrijven niet meer met de hand gaat, dan gaat het wellicht nog via grovere arm-

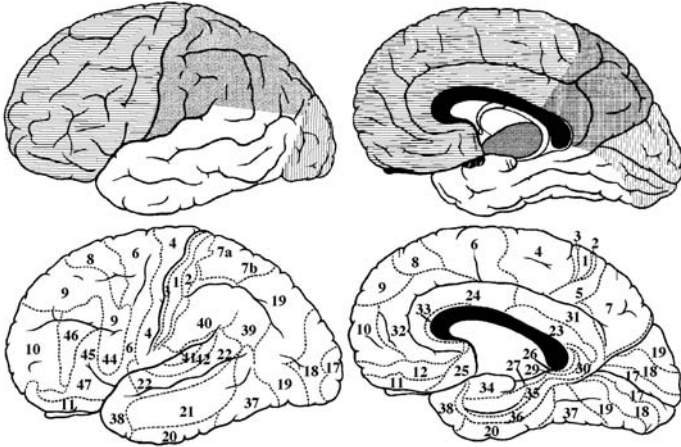
bewegingen of met een voet, desnoods met de mond of via voetstappen in de sneeuw of modder. We kunnen zo'n letter ook zonder visuele terugkoppeling schrijven, enzovoorts. Men moet dus al vrijwel totaal verlamd zijn en vrijwel alle waarnemingsmodaliteiten verliezen, voor men geen E meer kan schrijven. Zelfs een afasie is niet voldoende om het schrijven van de letter E onmogelijk te maken, omdat de E dan vrijwel altijd nog als zinloos patroon gekopieerd kan worden.

We komen hier het decompositieprobleem tegen, de vraag wat de elementaire componenten (modules) van het gedrag en de mentale functies zijn, en waar we de corresponderende functionele modules in de hersenen vinden. Die decompositie in modules hoeft natuurlijk niet overeen te komen met de naïeve modularisatie in de spreektaal, zoals een module om een E te schrijven of een module voor denken of voor leren. De decompositie in functionele modules is verre van triviaal en men kan betwijfelen of de psychologie hier een voldoende handreiking levert aan de neurowetenschap. Het ligt dus meer voor de hand van de goed onderscheidbare hersenkernen en cortexgebieden uit te gaan en er een functie bij te zoeken. Langs die weg zijn er inderdaad flinke vorderingen gemaakt, die we nu kort zullen bespreken.

Brodman sneed van bovenaf naar beneden werkend horizontale plakken van de hersenen van de mens en zocht grenslijnen tussen gebieden op grond van cytoarchitectonische kenmerken. Zodra hij een duidelijke grens tegenkwam tussen cortexgebiedjes kende hij een nieuw nummer aan het nieuwe gebiedje toe. De resulterende indeling blijkt redelijk goed met globale functies te correleren en is dan ook nog steeds in gebruik. Figuur 20 geeft een samenvatting van de belangrijkste corticale gebiedjes (areas) bij de mens.

De enige specifiek menselijke functie, de *taal*, heeft een asymmetrische representatie. Bij alle rechtshandigen en de meeste linkshandigen ligt het corticale zwaartepunt van het taalsysteem in de linkerhersenhalft. Bij beschadiging van het gebied van Wernicke (area 42 in figuur 20) is het taalbegrijpen gestoord en bij beschadiging van het gebied van Broca (area 44 in figuur 20) is de taalproductie gestoord. Deze storingen worden dan ook respectievelijk een sensorische en een motorische afasie genoemd.

Men neemt aan, dat alle talen een gemeenschappelijke oorsprong hebben, omdat ze in fonetisch, syntactisch en semantisch



Figuur 20 Indeling in areas van de menselijke cortex volgens Brodman. Tekeningen vrij naar Rohen (1975). Links zien we de linkerhelft van de hersenen vanaf de buitenkant en rechts zien we de binnenzijde van de rechterhersenhelft. De zogenaamde 'balk', het corpus callosum, een dikke vezelbundel die de beide hersenhelften met elkaar verbindt, is zwart gekleurd. De figuren in de bovenste rij geven de grenzen van de diverse lobbi (kwabben) aan: de frontaalkwab (lobus frontalis) is horizontaal gearceerd, de occipitaalkwab (lobus occipitalis) verticaal, ertussen zien we gestippeld de pariëtaalkwab (lobus parietalis), en de temporaalkwab (lobus temporalis) is blanco gelaten.

opzicht veel gemeenschappelijke kenmerken vertonen, zoals:

- alle talen zijn primair vocaal en gebruiken klinkers en medeklinkers;
- bijna alle talen hebben stop-medeklinkers en nasale medeklinkers;
- alle talen gebruiken woorden die zijn samengesteld uit klank-eenheden of geschreven tekens die op zichzelf geen betekenis hebben;
- alle talen vertonen de subject-predicaat constructie;
- alle talen zijn creatieve/productieve structuren (men kan hetzelfde op een vrijwel ongelimiteerd aantal wijzen zeggen).

De gesproken taal is vermoedelijk het eerst ontstaan, toen onze voorouders rechtop gingen lopen en er dientengevolge veranderingen van het ademhalingsstelsel en strottenhoofd mogelijk werden die voor de spraak nodig zijn. De vergroting van het strot-

tenhoofd met resonantieruimten maakte de vorming van klinkers en andere geluiden mogelijk. De coördinatie van uitademstoten met spierbewegingen van de vijftien spieren in het strottenhoofd maakt het mogelijk de ongeveer veertig klankeenheden of fonemen te produceren, waaruit de gesproken taal is opgebouwd. Over de fysiologische en neurobiologische basis van taal is zo langzamerhand vrij veel kennis vergaard, maar de oorsprong is minder duidelijk.

Nottebohm en zijn medewerkers hebben aangetoond dat er een zekere parallel is tussen spraakrepresentatie bij de mens en zangrepresentatie bij zangvogels. In beide gevallen is de representatie voornamelijk eenzijdig, namelijk links, en in beide gevallen kan dat nog naar de andere hersenhelft verschuiven als er vroeg in het leven links een beschadiging ontstaat. De auditieve oorsprong van de taal is nog te zien aan de ligging van het gebied van Wernicke (area 42) direct naast de primaire auditieve cortex (area 41). Een ander aangrenzend verwant gebied (area 22) heeft met auditieve herinneringen en muzikaliteit te maken (Rohen, 1975). Geluid, spraak en muziek zijn vrijwel zuiver serieel van karakter en onderling sterk verwant.

Op de primaire en hogere orde *visuele cortexgebieden*, respectievelijk area 17 (V1) en de areas 18 en 19 in de occipitaalkwab, zullen we in §4.4 nader ingaan. Globaal gesproken vindt men in de frontaalkwab, dat wil zeggen voor de sulcus centralis (de centrale groeve dwars over de hersenen tussen area 3 en 4), de motorische hersenprogramma's. Verder neemt men tegenwoordig aan dat delen van de frontaalkwab met emoties, persoonlijkheid en bewustzijn te maken hebben (hoofdstuk 5), dat de temporaalkwab vooral voor het herkennen en benoemen van voorwerpen van belang is, en de pariëtaalkwab voor ruimtelijke oriëntatie.

Vroeger ging men ervan uit dat behalve de primaire sensorische cortexgebieden vrijwel de gehele cortex de 'associatie' diende, dat wil zeggen 'hogere' hersenfuncties. Langzamerhand zijn voor steeds meer associatiegebieden vrij specifieke functies gevonden en is de opinie sterk in de richting van die van de localisten verschoven. Zelfs het idee dat een goed ontwikkelde functie relatief meer hersenmassa vereist, is wel plausibel – mits men niet zover gaat te menen dat dit met het blote oog te zien of op de schedel voelbaar moet zijn. Als voorbeeld van een verdergaande invulling van de functie van wat vroeger wel als associatiecortex werd be-

schouwd, bespreek ik onderzoek aan areas 5 en 7 (zie figuur 20). Dit voorbeeld illustreert ook goed hoe tegenwoordig bevindingen van neurologische aard (functiestoornissen tengevolge van hersenlesies), studies met microëlectroden in de hersenen – liefst bij wakkere, handelende dieren (meestal mens of aap), en gedragsstudies goed ineengrijpen. Daar is recent de mogelijkheid bijgekomen om met hersenscantechnieken niet-invasief na te gaan welke gebieden actief zijn bij het uitvoeren van bepaalde taken.

4.3.3 De pariëtale areas 5 en 7

Areas 5 en 7 liggen in de pariëtale hersenschors (cortex). Lesies van de pariëtale cortex, die mede area 5, 7 of beide omvatten, kunnen een globaal kader leveren voor gedetailleerder neurobiologisch onderzoek met microëlectroden aan individuele zenuwcellen. Zulke lesies hebben bij mensen een vrij grote versturende invloed op de perceptie van het eigen lichaam in relatie tot de onmiddellijke omgeving, de ‘persoonlijke ruimte’. Er blijkt een soort onwil te ontstaan om de opmerkzaamheid te richten op het gedragsveld dat contralateraal (aan de andere lichaamszijde) ligt ten opzichte van de lesie en de patiënt wil daar niet tactiel exploreren. Men onderscheidt twee syndromen: het (1) *zuiver contralaterale syndroom* en (2) het *bilaterale syndroom*.

1. Bij het *zuiver contralaterale syndroom* verwaarloost de patiënt meestal zijn contralaterale ledematen. Er is echter geen sprake van een motorische storing, want de contralaterale lichaams helft blijkt alle benodigde bewegingen uit te kunnen voeren. De patiënt wendt zich van alle contralaterale stimuli af en laat deze reactie, het afwenden, de vrije loop (‘release of avoiding reactions’). Verder is er meestal een contralaterale astereognosie (of stereo-agnosie), dat wil zeggen een verlies van het vermogen voorwerpen door uitsluitend aftasten te herkennen. Bovendien ontkent de patiënt dat er iets met hem/haar aan de hand is. In de literatuur zijn fraaie voorbeelden gegeven van tekenstests uitgevoerd bij mensen die een hersenbloeding in de pariëtaalkwab hadden gehad. Zulke patiënten tekenen veelal alle cijfers van de wijzerplaat van de klok aan één helft van een cirkel. Waar normaal de cijfers 12 tot en met 6 staan, brengen zij dan alle cijfers van 12 tot 11 onder. Bovendien zeggen ze zeker te weten dat het een correcte weergave is van een echte wijzerplaten.

Een vrouw in Duitsland die door zo'n lesie de linkerhelft van de wereld was kwijtgeraakt ging iedere ochtend bij de bakker op de hoek (links van haar huisdeur) verse broodjes halen. Op een bepaald moment viel het haar familie op dat ze als ze de deur uitging eerst rechtsafging (links bestond voor haar niet) en dan tot een stoplicht liep, waarna ze omkeerde en terugliep, langs haar eigen huis (dat nu links lag) en langs de bakkerswinkel (die nu ook links lag) tot het volgend stoplicht. Dan keerde ze weer om en bij de bakkerswinkel (nu rechts van haar) ging ze naar binnen, kocht brood, verliet de winkel, ging rechtsaf naar huis, waar ze veilig aankwam en naar binnen ging. Ze weigerde te geloven dat er iets mis was met deze route of met haar ruimtebeeld. Het was volgens haar de kortste route en zo liep ze al zolang ze hier woonde, beweerde ze. Tijdens het onderzoek in de kliniek voerde ze een gewoon gesprek met de neuroloog zolang die rechts van haar stond, maar zodra hij naar links liep kreeg hij geen antwoord meer en gedroeg de vrouw zich alsof ze alleen in de kamer was (Persoonlijke mededelingen van O.J. Grüsser).

2. Het *bilaterale syndroom* betreft globalere storingen, die niet tot de contralaterale zijde beperkt blijven. Deze storingen ontstaan na grotere lesies in de rechter pariëtaalkwab bij mensen die de taalgebieden links hebben (alle rechtshandigen en vele – maar niet alle – linkshandigen). De patiënt kan daarbij zijn/haar ruimtelijk oriëntatievermogen verliezen, inclusief de vaardigheid van kaartlezen en de vaardigheid om de weg te vinden met behulp van visuele aanwijzingen of aanwijzingen via aanraking of tast (haptiek). Grotere lesies in de pariëtaalkwab waar de taal gerepresenteerd is, geven van geval tot geval verschillende syndromen, inclusief de bekende afasieën en agnosieën (zie verder Grüsser en Landis, 1991).

De effecten van vergelijkbare lesies in vergelijkbare pariëtale gebieden bij andere primaten geven in grote trekken – afgezien natuurlijk van de afasieën – dezelfde syndromen. Studie van de eigenschappen van neuronen in de pariëtale cortex van een resusaap zijn dus vermoedelijk redelijk representatief voor alle primaten, inclusief de mens. Mountcastle en medewerkers verrichtten onderzoek aan individuele zenuwcellen in de areas 5 en 7 bij resusapen en gebruikten daarbij onder andere oogfixatietaken en taken waarbij arm en hand moeten worden gebruikt. Een van de taken die de aap bijvoorbeeld leerde, bestond uit de volgende activiteiten:

1. met de blik een visueel doel volgen, in dit geval een karretje met lampje en drukknop, dat langs een rail beweegt;
2. zodra het bewegende lampje aan- of uitgaat, een hendel onder de rechterhand loslaten om aan te geven dat deze gebeurtenis gedetecteerd is;
3. de linkerarm en -hand uitstrekken naar het doelvoorwerp om door indrukken van het knopje op het doelvoorwerp de beloning te verdienen.

Deze taak is dus opgebouwd uit (1) visueel volgen, (2) visueel detecteren, (3) manuele responsie. In andere experimenten kreeg het proefdier de volg- en detecteeropdrachten niet visueel, maar via mechanische stimulatie van de hand. De neuronen die in area 5 werden gevonden, konden in verschillende goed onderscheidbare functionele klassen worden onderverdeeld. Zo waren er de 'passieve gewrichtsrotatieneuronen', de 'passieve spierbewegingsneuronen' en dergelijke, die reageerden op bewegingen van spieren en gewrichten van de aap, die werden veroorzaakt door de experimentator. Interessantere neuronen, ongeveer 10% van de in totaal 900 bestudeerde neuronen, werden armprojectieneuronen en handbewegings- oftewel manipulatieneuronen genoemd. De armprojectieneuronen begonnen sterker te vuren even voordat de detectiesleutel werd losgelaten, waren maximaal actief zolang de arm op weg was naar het doel, en werden weer stil nog vóór de hand het doel aanraakte. De manipulatieneuronen vuurden uitsluitend sterk, gedurende de periode waarin de hand bezig was de doelknop te bedienen. Als dit moeilijker werd gemaakt en langer duurde, duurde het vuren van de neuronen ook langer.

Mountcastle (1976) interpreteert beide subklassen tezamen als de groep neuronen, die het *commando tot de actie geven en zorgen dat het commando wordt volvoerd*. Deze interpretatie berust op de volgende additionele eigenschappen van deze neuronen:

1. ze waren voor geen enkele sensorische prikkeling gevoelig;
2. ze waren alleen voor de beschreven doelgerichte beweging actief, maar niet wanneer de beweging in het kader van een andere motivatie werd gemaakt, bijvoorbeeld tijdens agressieve of afwerende bewegingen;
3. ze reageerden op de beschreven wijze ongeacht het sensorische kanaal dat de beweging initieerde, dat wil zeggen het maakte geen verschil of de stimulus visueel of tactiel was;
4. ze gaven dezelfde responsie ook bij andere doellocaties, dat wil

zeggen bij een geheel ander patroon van spierbewegingen in arm en hand.

De betreffende klasse neuronen wordt gekenmerkt door sterk vuren in relatie met consumptief gedrag.

Vergelijkbaar onderzoek toonde aan dat neuronen in area 7 iets met visuele attentie te maken hebben. Mountcastle (1976) concludeerde uit deze en zijn vele overige bevindingen onder andere:

- De visuele onachtzaamheid van primaten met pariëtaalkwab-lesies kan worden gezien als een defect van het ‘*willen* richten van de attentie’ en niet als een onvermogen de attentie te richten of om de handelingen uit te voeren. De neuronen in deze gebieden geven immers commando’s die gemotiveerd zijn, en betrekking hebben op de directe grijpruimte. Ze houden zich niet met reflexhandelingen bezig.
- Er zijn vermoedelijk veel bronnen van actiecommando’s in de hersenen. Als dit individuele neuronen zijn, worden ze wel ‘pontificale’ neuronen of commandoneuronen genoemd. Welke van deze neuronen of neurgroepen in actie komen, zal afhankelijk zijn van de complexiteit van het te commanderen gedrag en de begeleidingsomstandigheden, zoals motivatie en dergelijke.

De areas 5 en 7 lijken commando’s te geven voor gemotiveerde arm-, hand- en oogbewegingen op basis van:

1. een actueel bijgewerkte kaart van het eigen lichaam en zijn directe omgeving;
2. een bijgewerkt schema van de relatieve positie van het organisme en zijn delen in de ruimte;
3. een overzicht van de interne toestand van het organisme in termen van wensen en interessen;
4. een overzicht van de relatieve waarde (prioriteitschema) van objecten en gebeurtenissen.

Terwijl deze aspecten voortdurend worden bijgehouden, worden zo nu en dan globale commando’s gegeven aan de motorsystemen, die de details van de opdrachten uitwerken.

4.4 Corticale mechanismen van de visuele perceptie

4.4.1 Algemene eigenschappen van de retino-corticale projecties

De cortex is bij zoogdieren zoals de mens, minimaal zo'n drie millimeter dik en heeft overal zes onderscheidbare cellagen, die van het oppervlak naar binnen genummerd zijn van 1 tot en met 6. De areas 17, 18 en 19 van Brodman (figuur 20) hebben een visuele functie en worden wel de primaire, secundaire en tertiaire visuele cortex genoemd, oftewel V1, V2 en V3. Behalve V1 tot en met V3 zijn er tegenwoordig een zeer groot aantal (minstens 40) andere visuele cortexgebieden bekend in wat men vroeger als de 'associatie'-cortex opvatte. De 'hogere' visuele cortexgebieden blijken heel specifieke rollen te vervullen bij het zien (Livingstone en Hubel, 1988). Om een indruk te krijgen van de preciese rolverdeling en de mogelijkheden die dit biedt voor neuroreductie, bespreek ik hier in het kort de rolverdeling tussen het drietal V1, V2 en V3 enerzijds, en twee later gevonden visuele gebiedjes V4 en V5 anderzijds. Area V5, dat vooral een rol speelt bij ruimtelijk zien en bewegingszien, heet in de literatuur ook wel MT, wat alleen van belang is voor degenen die hierover de literatuur willen raadplegen.

Om de mogelijkheden van neuroreductie te kunnen bespreken hebben we ook enkele anatomische gegevens nodig. Dat er vanaf het netvlies, via het tussenstation CGL (corpus geniculatum laterale) naar de ingangslaag (laag 4) van V1 twee verschillende groepen cellen projecteren, namelijk relatief kleine cellen die parvocellen (*P*-cellen) heten, en relatief grote cellen die magnocellen (*M*-cellen) heten, zal wellicht op het eerste gezicht een oninteressant detail lijken. Het wordt al wat spannender als we vermelden, dat grote cellen zoals de *M*-cellen sneller reageren en een reactie sneller transporteren dan kleine cellen zoals de *P*-cellen. Dat betekent immers dat er een snelweg en een langzame baan van retina naar cortex loopt. Is die snelweg via de *M*-cellen nodig als een soort snelle waarschuwing: "pas op, er komt een pakket gedetailleerde informatie aan via de *P*-baan"? Dat zou inderdaad mede een rol van de *M*-banen kunnen zijn, want de *M*-cellen hebben grotere receptieve velden (ongeveer een factor 2-3) en dus een lagere resolutie dan de *P*-cellen en ze zijn veel geringer in aantal. We zullen echter zien dat de *M*-cellen ook zelf in belangrijke mate aan de visuele perceptie bijdragen.

De *M*- en de *P*-banen verlopen tot laag 4 (de ingang) van VI geheel gescheiden en een eventuele interactie kan dus zeker niet voor VI plaatsvinden. Figuur 21A laat zien hoe de *M*-cellen naar twee aparte lagen, de onderste lagen, van het CGL projecteren en de *P*-cellen naar de bovenste vier lagen. Interessant is, dat in de anatomische structuur van die banen via het CGL de 'kaart' van het netvlies behouden blijft. Er is een systematische topografische afbeelding van het netvlies op ieder van de zes lagen van het CGL, waarbij buurgebieden op het netvlies naar buurgebieden in het CGL projecteren. Waarom heeft het CGL dan zes lagen in plaats van twee: één *M*- en één *P*-laag? Op de bovenste laag blijkt informatie uit het contralaterale (aan de andere zijde gelegen) oog aan te komen, op de tweede laag komen vezels uit het ipsilaterale (aan dezelfde kant gelegen) oog aan, op de derde laag weer contralaterale en op de vierde laag weer ipsilaterale axonen. De *P*-cellen uit ieder oog hebben dus ieder twee lagen in het CGL ter beschikking. Waarom dat zo is is niet duidelijk, maar de scheiding van de ogen in het CGL is betekenisvol. Het betekent, dat er in het CGL nog geen binoculaire (twee-ogige) informatie kan worden verwerkt, zoals voor stereopsis nodig zou zijn. Dat moet dus na het CGL gebeuren. Ook de *M*-banen hebben een aparte laag voor ieder oog in het CGL, dus ook voor de banen met relatief laag ruimtelijk oplossend vermogen moet binoculaire combinatie tot VI of later wachten. Er zijn overigens behalve de *P*- en *M*-cellen nog andere soorten retinale ganglioncellen, maar die projecteren niet naar het CGL. Ze projecteren naar de colliculus superior (CS in figuur 17) en naar diverse andere subcorticale kernen. We laten die celklassen hier buiten beschouwing. Ze dienen onder andere voor pupilsturing, oogbewegingssturing, accommodatie, biologische klok en dergelijke, maar spelen ook wel een rol bij ruimteoriëntatie en attentiesturing.

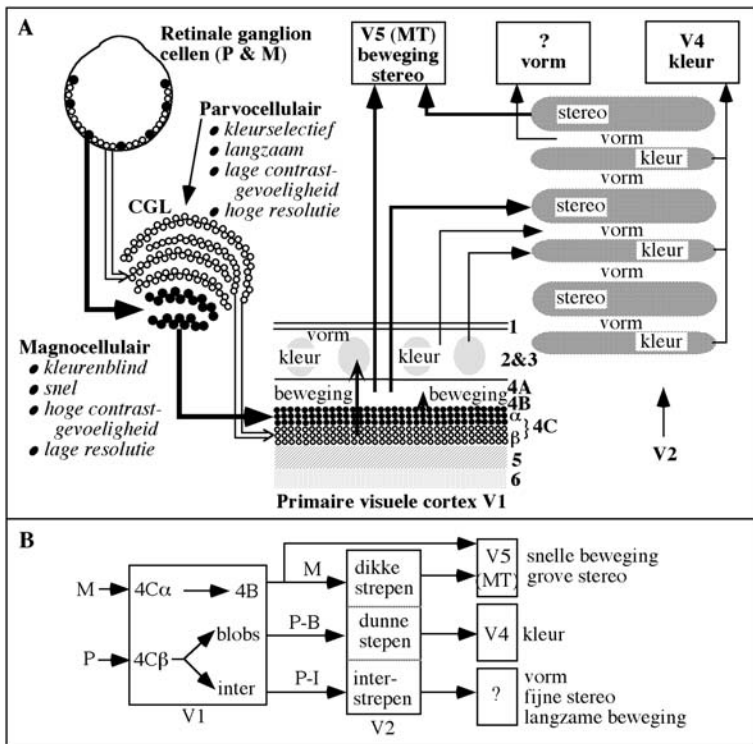
De receptieve velden van de *P*- en *M*-cellen zijn cirkelsymmetrisch (ongeveer) en vrijwel alle van het centrum-omgeving antagonistisch type (zie hiervoor §4.1.1). Ongeveer de helft is Aan-centrum en de andere helft Uit-centrum, beide met antagonistische omgeving. De tweedeling *P*- versus *M*-cellen bestaat al in de retina voorafgaand aan de ganglioncellen. Ook dat is functioneel van groot belang, want het heeft te maken met de vraag welke soorten receptoren de *M*- en *P*-ganglioncellen aansturen. Globaal gesproken blijken de *P*-cellen kleurcontrasten te verwerken en de *M*-cellen zwart-witcontrasten. Circa 90% van de *P*-cellen

zijn gevoelig voor golflengteverschillen, wat geen van de *M*-cellen is. De overige circa 10% *P*-cellen en *alle M*-cellen hebben zowel centrum- als omgeving-input van alle kegeltypen, zodat hun spectrale gevoeligheid breedbandig is (zwart-wit). Het *M*-systeem (en 10% van het *P*-systeem) is dus kleurenblind, achromatisch, maar het is gevoeliger voor lage contrasten. Zowel *P*- als *M*-cellen beginnen te reageren bij 1 à 2% contrast in hun receptieve veld. Echter, de *M*-cel responsie neemt boven die absolute drempel sneller toe met het contrast dan die van *P*-cellen en verzadigt bij 10-15% contrast. De *P*-cellen verzadigen bij veel hoger contrast. De 'responsie versus contrast'-grafieken voor *P*-cellen zijn dus vlakker dan voor *M*-cellen en liggen daarom over een flink contrastbereik onder die voor *M*-cellen.

Het interessante aan dit soort functionele en anatomische details is, dat ze het mogelijk maken in psychofysische proefjes de prikkel zodanig te kiezen, dat óf de *P*-banen óf de *M*-banen, óf een specifieke combinatie geprikkeld wordt. Zo kan men de rolverdeling dus preciseren en gegevens van het gedragsniveau – dankzij de gedetailleerde neurobiologische kennis – direct aan de activiteit van cellen relateren. Licht- en donkeradaptatie bijvoorbeeld is gescheiden per oog mogelijk. Dat betekent dat die automatische versterkingsregeling plaats vindt vóór de combinatie van de signalen uit de aparte ogen, dus vóór laag 4 van V1. Bewegingszien kan monoculair en binoculair worden onderzocht en zo kan men nagaan welk deel van de informatie over beweging vóór de cortex wordt verwerkt en welk deel er na. Het bewegingsnaeffect is een aardig voorbeeld om dit te illustreren. Als we een tijdje naar een continue beweging kijken, naar een waterval of stromende rivier bijvoorbeeld, en vervolgens naar een niet bewegend beeld, dan lijkt dit laatste te bewegen in een richting tegengesteld aan de adaptatierichting (Verstraten e.a., 1995). Adapteert men met het linkeroog dan zal men met het linkeroog ook een sterk naeffect hebben, maar wat gebeurt er als men met één oog adapteert en met het andere test? Er is dan, zo blijkt, enige overdracht van de adaptatie, maar het naeffect is zeer veel geringer. Die overdracht moet dus te maken hebben met de binoculaire combinatie in V1 en later.

Een andere overdracht die men kan bestuderen is die tussen het gezichtsveld rechts van het fixatiepunt (dat op de linker V1 projecteert, zie figuur 17) en links van het fixatiepunt (rechter V1). Treedt daar overdracht, op dan is dit informatie die via de

grote ‘balk’ (het corpus callosum) van de ene naar de andere hersenhelft loopt. Kortom, men kan zeer gedetailleerd bevindingen op perceptieniveau relateren aan de banen en celgroepen in het visuele systeem, en dat is wat we bij neuroreductie willen bereiken. Het verhaal gaat echter nog veel verder, dankzij sensationele bevindingen van de laatste tien-twintig jaar over het verdere verloop van functioneel gespecialiseerde banen in en na V1.



Figuur 21 De lagennummering van de striate (gestreepte) visuele cortex V1 is hier aangegeven samen met de 3 beschreven banen naar V2: M naar de dikke strepen, P-I naar de interstrepen en P-B naar de smalle strepen. We zien dat de M-cellen ook direct naar MT ('middle temporal lobe'), ook wel V5 genoemd, projecteren vanuit V1. Vrij naar Livingstone en Hubel (1988).

De P-M-tweedeling blijkt namelijk in en na V1 nog verder door te gaan. Cytochroom oxidase (een mitochondrion-enzym) kleuring, ontdekt door Wong-Riley (1979), toont in V1 blobs en in

V₂ een strepenpatroon, bestaande uit alternerende smalle en brede donkere strepen gescheiden door 'bleke' strepen. In V_I komen *M*-en *P*-axonen in verschillende lagen binnen en splitsen dan in 3 banen (bestudeer figuur 21A en B):

magno → 4C α → 4B	(M pad)
parvo → 4C β → interblob	(P-I-pad)
parvo (+M) → 4C β → blob	(P-B-pad)

In de 'blobs' in laag 2 en 3, het P-B-pad, blijken vrijwel uitsluitend kleurcontrastgevoelige cellen te zitten en die projecteren naar de smalle strepen in V₂, en vandaar naar V₄, een cortexgebied dat geheel gespecialiseerd lijkt voor het verwerken van kleurinformatie. Men kan cellen in V₄ zeer actief maken met stimuli zoals Mondriaan-achtige plaatjes. Het was zonder meer een sensatie te zien hoe voor de quale 'kleur' van de filosofen een echt eigen cortexgebied is ingericht, V₄, met een eigen 'royal road' vanaf het netvlies, de P-B-baan.

Cellen in het P-I-pad reageren meestal ongeacht het contrastteken, dat wil zeggen zowel voor wit op zwart als zwart op wit. Er zijn zogenaamde 'end-stopped'-cellen bij: als de lijn of rand die de cel optimaal stimuleert langer is dan een bepaalde lengte en daarmee het 'einde' van het receptieve veld van de cel overschrijdt, wordt de responsie sterk geremd. We zullen in §4.4.2 zien dat deze eigenschap belangrijk is voor het detecteren van overlap (anomale contouren) en dus bij het detecteren van sommige Gestalt-aspecten.

Het *M*-systeem van retina, CGL en V_I (waar de *M*- en *P*-cellen op aparte sublagen binnenkomen zoals figuur 21 liet zien) projecteert naar de dikke strepen in V₂. De ontvangende cellen in de dikke strepen zijn zelden 'end-stopped', maar wel vrijwel steeds oriëntatieselectief. De meeste reageren relatief zwak op monoculaire stimulatie en sterk op binoculaire stimulatie. De meeste cellen zijn zeer selectief voor dispariteit (laterale verschuiving van een beeldpunt in het ene oog ten opzichte van het andere oog, wat diepte-informatie draagt). De inputcellen in laag 4B van V_I zijn veelal ook afgestemd op dispariteit. Net als daar vindt men in de dikke strepen cellen voor nuldispariteit (die kijken dus in het fixatievlak) en klassen met ongekruste en gekruiste dispariteit, ook wel 'far' en 'near' cellen genoemd. Er is geen kleurgevoelighed. Deze cellen projecteren op V₅, een gebied dat gespecialiseerd is in de analyse van stereo en beweging.

De relatie tussen perceptie en de activiteit van individuele cellen in de aangegeven drie banen (M, P-I en P-B) kan nu gelegd worden door van allerlei visuele taken na te gaan welke invloed ruimtelijke, tijds- en kleurparameters hebben. De *M*-banen zijn evolutionair ouder, en alleen bij primaten is zo'n enorm uitgebreid *P*-systeem (tien keer zoveel cellen als in het *M*-systeem) gevonden. Het *M*-systeem is zeer belangrijk voor Gestalt-taken, segregatie en koppelen van kenmerken en/of beeldonderdelen. Men gaat er wel van uit dat dit systeem door z'n snelle en kortduurende responsies niet geschikt is voor aanhoudende attentie, maar wel voor direct parallel oppikken van samenhangen. We noemen ter illustratie een aantal bevindingen waarvoor de koppelhypothesen (gedrag-hersenproces) voor het grijpen liggen. Hierbij is het concept equiluminantie van belang, wat ik daarom eerst zal toelichten.

Als een aantal gekleurde lijnen op een anders gekleurde achtergrond wordt getoond, kan ook de volledig kleurenblinde de lijnen meestal zien, omdat ze qua luminantie (lichtsterkte) niet gelijk zijn aan de achtergrond. Er is dus een achromatisch (zwart-wit) contrast naast het tintcontrast. Het is nu mogelijk de kleurintensiteiten zo te kiezen dat het achromatisch contrast verdwijnt en er alleen tintcontrast overblijft. Dit noemt men equiluminante stimuli. Deze stimuli kunnen dus alleen gezien worden door een systeem met onderscheidingsvermogen voor tintcontrast. De neurowetenschappelijke bevindingen laten zien dat dit voornamelijk het *P*-systeem is, terwijl het *M*-systeem alleen achromatische contrasten kan detecteren. Ik noem vijf van deze bevindingen die illustratief zijn voor dit verschil tussen *P*- en *M*-systeem.

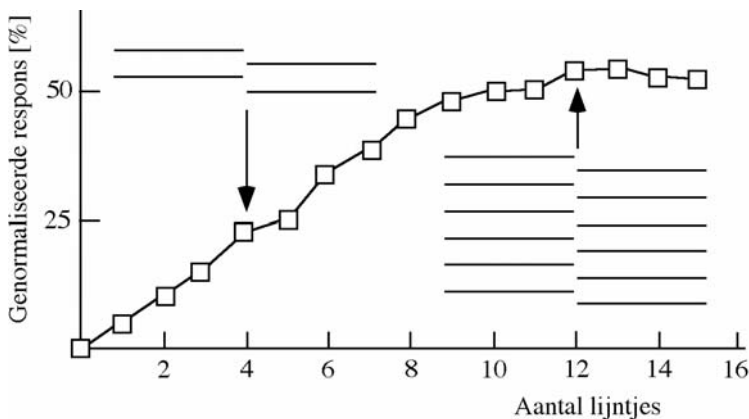
1. *Temporele helderheidsmodulatie* kan tot veel hogere frequenties worden gevolgd dan *equiluminante kleurafwisseling*, wat met de temporele verschillen tussen *M*- en *P*-banen overeenkomt.
2. *Tintgemoduleerde rasters* kan men bij equiluminantie (als de *M*-cellen dus niets meer 'zien') nauwelijks of niet zien bewegen. Soms merkt men wel dat ze verplaatst zijn ten opzichte van een eerder tijdstip, echter zonder de beweging te zien.
3. *Bewegingsparallax* kan diepte en vorm specificeren, maar bij equiluminantie (*M*-cellen uitgeschakeld) verdwijnt dit.

4. *Diepte uit schaduwwerking* verdwijnt bij gekleurde schaduwen zodra ze equiluminant zijn en de *M*-cellen dus niet meer meedoen.
5. De zogenaamde ‘koppelkenmerken’ uit moderne theorieën zijn de Gestalt-organisatieprincipes die delen van een scène als bijeenhorend markeren. Bijvoorbeeld gemeenschappelijke beweging, diepte of afstand, collineariteit (ligging in elkaars verlengde), of ligging op eenzelfde kromme baan, enzovoorts (hoofdstuk 3). Een plaatje met blokken, cilinders, kubussen en dergelijke, die elkaar gedeeltelijk overlappen, bevat veel van dit soort bijeenhorende, maar toch van elkaar gescheiden lijnstukken die ‘gekoppeld’ moeten worden via bijvoorbeeld collineariteit. Bij equiluminantie zijn die plaatjes nauwelijks nog te interpreteren. De *koppelingen* worden kennelijk niet meer gelegd als het *M*-systeem stilvalt.

Deze voorbeelden, die overigens niet alle geheel vrij van controverse zijn, illustreren waarschijnlijk voldoende hoe men een heel eind kan komen met neuroreductie van visuele perceptie via de combinatie van visuele psychofysica en metingen aan individuele neuronen. Dit soort onderzoek is een echt breekijzer gebleken voor de natuurwetenschappelijke studie van de relatie tussen perceptie en bewustzijn (hoofdstuk 5) enerzijds, en hersenprocessen anderzijds. De studie van het zien zou zeker een eigen onderzoeksinstituut aan een Nederlandse universiteit verdienen omdat het van belang is voor en overlappings heeft met kunst, filosofie, techniek (beeldverwerking, robotologie en computerzien, ‘virtual reality’), media (film, televisie), neurobiologie, neurologie, oftalmologie, ‘low vision studies’, cognitiewetenschap, bewustzijns-onderzoek, psychonomie, enzovoorts. Er valt eer te behalen aan onderzoek aan visuele perceptie, het is maatschappelijk en cultureel van belang en er valt geld mee te verdienen. Helaas ontbreekt het de Nederlandse universiteiten aan de middelen voor zo’n diepte-investering en zijn de grote centra voor visueel onderzoek vooral elders te vinden (met name in Japan en de Verenigde Staten).

4.4.2 Cellen in V2 als substraat van de perceptie van anomale contouren

In figuur 7 hebben we kennis gemaakt met anomale contouren, die de Gestalt-onderzoekers opvatten als informatie over occlusie van een achtergrond door een voorgrondobject. Nu blijkt dat bij de aap in V2 cellen worden gevonden die optimaal reageren op een contour van een bepaalde oriëntatie, en die niet reageren op contouren van de loodrecht daarop staande oriëntatie (de nuloriëntatie) terwijl ze toch goed op een anomale contour reageren, die ‘gedragen’ wordt door uitsluitend lijnen in de nuloriëntatie. Figuur 22 illustreert deze bevinding van Von der Heydt en Peterhans:



Figuur 22 Resultaten van von der Heydt en Peterhans (1989). De sterkte van de anomale contour neemt zowel perceptueel als voor de bemeeten cel toe met het aantal lijntjes, terwijl de lijntjes toch in de nuloriëntatie staan, dat wil zeggen op zich reageert de cel niet op lijnen in die oriëntatie. Alleen dankzij de patroonbreuk, de anomale contour, die wel in de optimale oriëntatie staat, is er een respons.

De responsies op anomale contouren in V2 worden gevonden in cellen in de dikke strepen en de interstrepen, maar niet in de kleurgevoelige smalle strepen. De anomale contouren verdwijnen dan ook bij equiluminantie (alleen tintverschil, geen helderheidsverschil). Men vindt zo relatief eenvoudige ‘front-end’ mechanismen, die schijnbaar complexe fenomenen verklaren. Het is goed

mogelijk netwerkmodellen op te stellen, die de resultaten reproduceren en die rekening houden met de bekende gegevens van de diverse verbindingen tussen cellen met verschillende eigenschappen in V1 en V2. Operaties die cognitief lijken, zijn kennelijk ten dele al vroeg in het systeem ingebouwd, al kunnen er natuurlijk allerlei 'top-down'-invloeden van hogere gebieden op inwerken, zoals attentie. Men kan de aap trainen op de anomale contouren te reageren – bijvoorbeeld met bepaalde knopdrukken – en nagaan hoe goed de prestaties van individuele cellen in V2 (of andere gebieden) overeenkomen met die van het hele dier. Bovendien kan men door stroomsturing de cellen tijdelijk stilleggen en nagaan of het proefdier de taak dan nog kan uitvoeren. Blijkt het dier dit nog te kunnen, dan zijn er andere of meer cellen bij de taak betrokken. Zo niet, dan heeft men het cluster cellen te pakken dat aan de perceptuele kant voor de taak verantwoordelijk is.

Dit soort experimenten gaat niet gepaard met pijn of ernstig ongemak. De proefdieren hebben in een aparte operatie een afleidsysteem geïmplanteerd gekregen, dat aan de schedel is bevestigd. Men weet uit menselijke operaties dat dit pijnloos is. Er zitten (behalve in de bloedvaten) noch pijnreceptoren noch mechanoreceptoren in de hersenen, zodat het bewegen van de micro-electroden niet gevoeld wordt. De dieren doen vrijwillig aan de experimenten mee, omdat ze per handeling een kleine beloning krijgen, bijvoorbeeld in de vorm van appelsap, en ze tonen geen tekenen van pijn of stress tijdens deze proeven. Na een uur-tje, als ze laten merken er genoeg van te hebben, gaan ze terug naar hun verblijf. De dieren doen vaak jaren mee met de experimenten.

Tijdens hersenoperaties doet men bij mensen wel vergelijkbare experimenten. Het schedeldak wordt onder locale verdoving gedeeltelijk open geklapt en met microelectroden wordt in diverse gebieden gemeten. Dit heeft normaliter tot doel om epileptische foci op te sporen en die dan door een stroomstoot uit te schakelen. Tijdens het zoeken kan men in interessante gebieden zeer zwakke (niet beschadigende) stroomstootjes geven en de patiënt laten rapporteren wat hij/zij ervaart. Ook kan men eigenschappen van het receptieve veld in kaart brengen (met toestemming van de patiënt). Men heeft zo onder andere gevonden dat verschillende talen verschillende localisatie hebben in de taalcortex, dat men op bepaalde plaatsen hele herinneringsbeelden op kan wekken, enzovoorts (zie bijvoorbeeld Calvin & Ojemann, 1994).

4.4.3 Neuroreductie van het bewegingszien

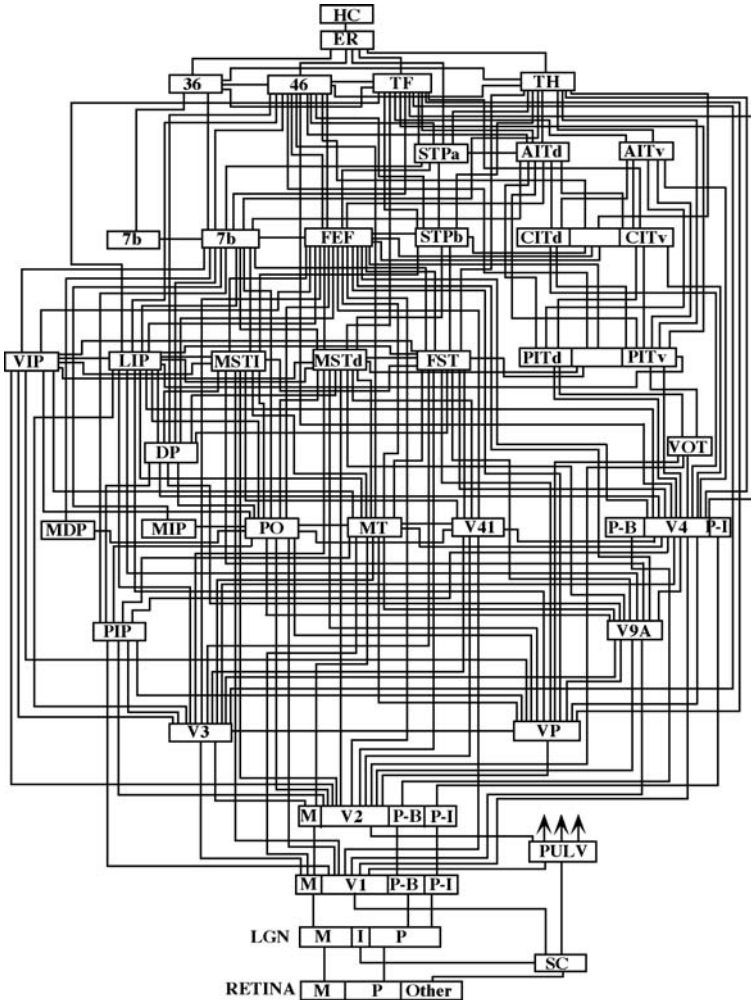
Area V5 (ook wel cortexgebied MT genoemd) blijkt gespecialiseerd te zijn in de verwerking van bewegingsinformatie en het is de laatste jaren wellicht het meest bestudeerde hersengebied geworden. In V5 zijn cellen met gelijke bewegingsrichtingvoorkeur gegroepeerd in kolomvormige clusters. Door microstimulatie van zo'n kolom kan men dus cellen van een bepaalde voorkeursrichting bevoordelen (door excitatie) of benadelen (door inhibitie). Salzman, Britten en Newsome (1990) deden interessante experimenten met een resusmakaak, die een psychofysische detectietaak uitvoert. Ze konden de aap fouten laten maken die voorspelbaar zijn uit de ceileigenschappen, als de microstimulatie tijdens de taak wordt gegeven. Stimuleert men cellen die staan afgestemd op een richting die iets verschilt van de richting die wordt aangeboden, dan maken de apen fouten in de richting van de gestimuleerde cellen (bij excitatie).

Dit type experiment maakt het mogelijk vrij direct ceileigenschappen en gedragsparameters te correleren. Er werd gevonden dat bepaalde celgroepen steeds actief zijn als er een bepaalde specifieke beweging wordt aangeboden (van een bepaalde, optimale, richting en snelheid), en dat de aap steeds reageerde als die celgroep actief was. Onderdrukte men die celgroep met elektrische stroom, dan zag de aap de beweging niet ook al werd die tegelijkertijd aangeboden. Was de visuele beweging er niet maar prikkelde men de betreffende celgroep, dan reageerde de aap alsof de visuele beweging aanwezig was.

In een gebied dat MST heet (figuur 23), zijn inmiddels ook cellen gevonden die bepaalde componenten van het optische-stroomveld ('optic flow', zie hoofdstuk 3) detecteren. Dit onderzoeksterrein is volop 'in beweging' en lijkt een vrij gedetailleerd en compleet beeld te gaan opleveren van de neuronale basis van het bewegingszien.

4.4.4 De snelle toename van kennis over het bedradingschema

Het is in het kader van ons thema niet zinvol hier uitgebreid in te gaan op de vele gedetailleerde onderzoeken aan de eigenschappen van cellen in de diverse visuele hersengebieden. Ik volsta met te vermelden dat men objectdetectoren heeft gevonden in de tem-



Figuur 23 Recente samenvatting van de bedrading tussen de diverse cortexgebieden die zich met visuele analyse bezig houden. (Vrij naar Van Essen e.a., 1992.)

poraalkwab. Gezichtsdetectoren zijn in diverse laboratoria uitvoerig bestudeerd bij de aap. Ze zijn vlak bij het uiteinde van de temporaalkwab te vinden. Eén van de meest markante ontwikkelingen van de laatste jaren is de gedetailleerde histologische analyse van de bedrading. Men heeft criteria kunnen ontwikkelen om vast te stellen wat de 'ingang' en wat de 'uitgang' van bepaalde hersengebieden is, en zo door systematisch onderzoek een soort

schakelschema op kunnen stellen met alle terugkoppelingen en dergelijke. Vele lussen zijn ook functioneel getoetst en in diverse hersengebieden zijn inmiddels al vele celtypen electrofysiologisch bestudeerd.

In zekere zin zijn de resultaten frustrerend, zoals figuur 23 waarschijnlijk voldoende verduidelijkt. De complexiteit is overweldigend! Men vraagt zich in gemoede af hoe deze detailkennis ons tot een goed inzicht kan voeren van de werking van de hersenen. In elk geval is de homunculus als het ware versplinterd door dit superlocalisme, maar we moeten niet verbaasd zijn als hij/zij de kop weer opsteekt in ander verband. Het homunculusprobleem ontstaat iedere keer als geëist wordt, dat ergens in het brein een plaatjesachtige interne representatie van de buitenwereld wordt gereconstrueerd. Iets of iemand moet die representatie dan gebruiken ten behoeve van de perceptie. Deze omzetter van neuronale codes naar percepten is onze vertrouwde homunculus. Zelfs als de interne representatie van een vrij abstracte en gedistribueerde aard is, komt de vraag toch weer boven of we niet een homunculus nodig hebben om dit geheel in een percept te transformeren. We zullen in de volgende paragraaf op deze kwestie terugkomen.

4.4.5 Het bundelingsprobleem en de wederopstanding van de homunculus

Nergens in het brein is een volledige film van de omgeving te vinden, en als die er zou zijn, zou dit nog maar het begin zijn van de perceptie: het homunculusprobleem. De beeldkenmerken worden na V1 over zo'n 40 cortexgebiedjes verdeeld en daarmee is de homunculus versplinterd. De vraag is nu echter, hoe de juiste objectkenmerken bij elkaar kunnen worden gevonden om ze te 'bundelen' in het percept. Stel bijvoorbeeld, dat een man in groen kostuum door ons blikveld naar links loopt en een vrouw in rode jurk naar rechts. Er zijn dan neuronen actief in V5 die de bewegingsinformatie coderen en neuronen in V4 die de kleurinformatie coderen. Waarom zien we de kleuren van kostuum en jurk dan nooit verwisseld, in dit voorbeeld de man in rood kostuum en de vrouw in groene jurk? Kennelijk is er een soort koppeling tussen de kenmerken die bijeen horen, zodat de groen-neuronen in V4 met de neuronen die beweging naar links signaleren in V5 'gekoppeld' zijn, en de rood-neuronen in V4 met de neuronen in V5

die beweging naar rechts signaleren. Die koppelingen mogen niet vast zijn, want er zijn teveel combinatiemogelijkheden van kenmerken om die allemaal vast te leggen. Er moet per situatie een andere bundeling kunnen worden gekozen. Dit probleem van dynamisch bundelen wat bijeen hoort, noemt men het bundelings- of bindingsprobleem.

Tientallen jaren geleden werd al voorgesteld dat het zogenaamde thèta-ritme van de hersenen een rol zou kunnen spelen bij het 'binden' van neuronen tot tijdelijke celgemeenschappen ("cell assemblies"), die voor aspecten van eenzelfde object coderen. Ritmische activiteitsgolven van zo'n 40 Hz, thèta-golven, zouden cellen waarvan de prikkeling net (asynchroon) aan het toenemen is richting drempel, een stevige extra zet kunnen geven, zodat ze alle tegelijk de drempel overschrijden en dus synchron vuren. Cellen waar dan ook in het brein zouden door tegelijk te vuren één en hetzelfde object kunnen representeren, een tijdelijke celgemeenschap kunnen vormen. Synchroniciteit staat dan voor 'bijeen horen'. Het bindingsprobleem lijkt daarmee mogelijk opgelost, maar de homunculus steekt de kop weer op. Immers, welk hersendeel, welke instantie, merkt die synchroniciteit op? Hebben we een homunculus nodig met gevoel voor ritme?

Het ontbreekt niet aan kritiek op de theorie dat synchroniciteit het bindingsprobleem oplost (Golledge e.a., 1996), maar er spreekt ook het een en ander vóór. Reinhardt Eckhorn en medewerkers (1988) vonden coherente oscillaties, toen ze met een groot aantal over een ruim gebied verspreide microëlectroden tegelijk metingen deden in de cortex van de kat. Ze suggereerden dat die een rol spelen bij het oplossen van het bundelingsprobleem. Wolf Singer (1993) en zijn groep hebben ook veel argumenten en empirische evidentie aangedragen voor het idee dat coherente oscillatie tot bundeling leidt. Dat corticale visuele neuronen op bijvoorbeeld 7 mm afstand van elkaar synchron vuren als ze op hetzelfde object betrekking hebben en anders niet, is zeker zeer suggestief. Aan de andere kant bleek uit psychofysische experimenten met stimuli die met 40 Hz flikkerden, maar met diverse onderdelen van de beelden uit fase, dat dit geen verstoring van de perceptuele samenhang gaf. Bovendien zien we de na elkaar visueel afgetaste delen van een object toch altijd direct als bijeenhorend. Er is dus wat voor te zeggen om te zoeken naar alternatieve of additionele oplossingen voor het bindingsprobleem die geen synchroniciteit van neuronale activiteit vereisen.

Een voor de hand liggende oplossing schuilt in de koppeling in twee richtingen die alle hogere gespecialiseerde gebiedjes hebben met VI. Als de resultaten van hun gespecialiseerde analyse terug worden gevoerd naar VI, dan zou VI alle gegevens topografisch geordend bijeen kunnen houden. Deze plaatjesachtige datastructuur in VI, die voorwaartse gegevens combineert met re-entrante (Edelman, 1993) oftewel herintredende (teruggemelde) gegevens, confronteert ons echter weer met de homunculus. De homunculus mag niet langer naar al die verwarrende aparte analysegebiedjes kijken, maar moet zich uitsluitend en alleen met de datastructuur in VI bezighouden. Ook beelddenken zou via zo'n soort terugmelding vanuit 'hogere' cortexgebieden tot activatie van VI kunnen leiden. In dit verband is de discussie of beelddenken ('imagery') plaatjesachtig of symbolisch is (Tye, 1991) vermeldenswaard. Kosslyn en medewerkers (1995) vonden evidentie die volgens hen voor een plaatjesachtige vorm van beelddenken spreekt. Als proefpersonen aan objecten of scènes dachten terwijl hun hersenen gescand werden (PET-scans), bleek er op vele plaatsen in de hersenen extra activiteit te zijn, onder andere ook in VI. Het opmerkelijke was dat als de proefpersonen aan grotere beelden of objecten dachten, ook een corresponderend groter deel van VI actief werd. Als beelddenken van puur symbolische aard zou zijn, zou men verwachten dat alleen de temporale visuele cortexgebieden, waar de symbolische voorstellingen geacht worden te zeten, actief zouden worden en niet VI. Qua verbindingen zou dit alles zeker kunnen, want ieder cortexgebied dat aan een ander gebied iets meldt, ontvangt vrijwel evenveel verbindingen terug van dat doelgebied. Aan de plaatjestheorie van beelddenken en aan de theorie dat VI als bundelingsorgaan dienst doet, koppelen velen de stelling dat alles wat via VI loopt bewust wordt waargenomen. In hoofdstuk 5 gaan we hier nader op in. Een probleem blijft dat we met deze terugmeldtheorie een intern scherm postuleren, en wel in VI. Homunculi zijn, zoals we in §4.2 gezien hebben, gek op interne schermen.

Men kan natuurlijk behalve VI meerdere gebiedjes van de zogenaamde pariëtale stroom bij de interne-schermfunctie betrekken. Immers de pariëtale stroom wordt gezien als de basis van ruimtelijke aspecten van het zien, het vertelt *waar* iets te zien is. De temporale stroom zou verantwoordelijk zijn voor de analyse van *wat* er te zien is. Het meest elementaire aspect van het bindingsprobleem wordt daarmee de vraag *hoe 'wat' en 'waar' gekoppeld worden*.

Treisman en haar groep (review Treisman, 1996) hebben daarom als oplossing voor het bindingsprobleem een ‘feature integration theory’ (FIT) opgesteld, die ervan uitgaat dat spatiële attentie het bindmiddel is, met als zetel de pariëtale stroom van cortexgebieden. Een attentievenster van schaalbare grootte ‘scant’ een mees-terkaart van plaatsen (pariëtale reeks cortexgebieden), selecteert de nu actieve kenmerken binnen het gescande venster voor bundeling, en onderdrukt alle actieve kenmerken buiten dat venster. De gebundelde kenmerken zijn dan tezamen een objectsymbool, dat vergeleken kan worden met in het geheugen vastgelegde objectsymbolen om het object te herkennen. In de woorden van Treisman (1996, p.172): “The suggestion is that binding ‘what’ to ‘where’ through a serial scan of locations also binds the properties and parts of the individual ‘whats’.” De betrokkenheid van de pariëtale stroom wordt ondersteund door neuropsychologische bevindingen in haar laboratorium.

Friedman-Hill e.a. (1995) rapporteerden dat een patiënt met tweezijdige lesies in de occipitale en pariëtale cortex, grote problemen bleek te hebben met het bundelen van bijeenhorende kenmerken van objecten tot een coherent percept. Deze patiënt had simultaanagnosie, dat wil zeggen dat hij of zij niet in staat was de visuele aandacht (attentie) over meerdere objecten tegelijk te verdelen. Ook werden de kenmerken van verschillende objecten vaak foutief gecombineerd. Dat zou in het eerder gebruikte voorbeeld dus tot een rood kostuum en groene jurk kunnen leiden, in plaats van omgekeerd. De auteurs suggereren daarom dat de spatiële attentie – het bindmiddel van de visuele kenmerken – bij de genoemde patiënt niet goed meer functioneerde.

In dit verband is het ten slotte nuttig te wijzen op het klassieke locaaltekenprobleem. Het idee dat een kaartachtige representatie qua kaart zinvol is, vereist een externe structuur (de homunculus, een neurowetenschapper) die naar de kaart kijkt, en bijvoorbeeld weet dat 2 mm afstand op de kaart groter is dan 1 mm afstand. Echter, het zenuwstelsel kan niet buiten zichzelf treden om naar de eigen corticale kaart te kijken, dus de posities of adressen (locaalteken) van de neuronen op de cortexkaart moeten in de activiteiten in het zenuwstelsel verpakt zijn. Men kan zich dat het eenvoudigst in termen van een machine met kleurgecodeerde draden voorstellen. Voor de monteur heeft de kleurcode zin, maar voor de machine is alleen dat wat *in* de draden gebeurt beschikbaar, niet de kleurcode. Iets dergelijks geldt voor de posities op de

cortexkaart, die als het ware de kleurcodes van de draden van CGL naar cortex weerspiegelen die voor externe waarnemers zichtbaar zijn, maar *in* de draden niet te zien kunnen zijn. Locaaltekeninformatie moet dus in het activiteitspatroon van de draden verpakt zitten, maar hoe?

Koenderink (1984 a, b, c) heeft hier naar mijn mening een verlossende theorie ontwikkeld, die laat zien hoe het mogelijk is voor een systeem om zelf uit de correlatiestructuur van de activiteit in de draden locaaltekens te abstraheren. Het gaat hier te ver de theorie, die van abstract mathematische aard is, te behandelen en ik volsta daarom met een parafrasering. Uit de mate van correlatie gedurende langere perioden van activiteiten tussen twee neuronen *A* en *B* kan worden afgeleid, of hun receptieve velden geheel, gedeeltelijk of niet overlappen. Zo zou een correlatiestructuur kunnen worden opgezet die de positie van een neuron vastlegt ten opzichte van andere neuronen. In het simpelste geval van steeds grotere receptieve velden in alfabetische volgorde zou *A* zich in *B*, en die vervolgens in *C*, en die weer in *D* en die in ... enzovoorts kunnen bevinden. Het adres van *A* ligt dan vast zoals kinderen hun huisadres wel geven: nummer zoveel in die straat, in die wijk, in die stad, in dat land, in dat werelddeel, in de wereld, in het heelal. Zo'n soort locaaltekentheorie kan de positie-informatie als een correlatiestructuur in de draden stoppen in plaats van die eraan te hangen. Dat maakt het mogelijk ook de homunculus *in* het zenuwstelsel onder te brengen in plaats van hem/haar als externe waarnemer te laten figureren.

Het lijkt nog te vroeg om definitief te kiezen uit de geschetste ideeën en theorieën, maar het zal wel duidelijk zijn dat dit soort onderzoek niet alleen neurowetenschappelijk gezien spannend is. Het kan ons ook flink verder brengen bij het onschadelijk maken of nader karakteriseren van de homunculus en dus van de 'geest' die volgens substantiedualisten ons zenuwstelsel steeds van buitenaf zou gadeslaan en commanderen.

5 Bewustzijn bij dieren

5.1 Uitgangspunten van een natuurwetenschappelijke studie van bewustzijn

5.1.1 *Enkele biologisch-fysische uitgangspunten*

Veel Nobelprijswinnaars hebben zich na het feestje in Stockholm direct geworpen op wereldproblemen met allure, op onopgeloste raadsels, zoals het bewustzijn. Zo hebben Sir John Eccles, Francis Crick en Gerald Edelman zich post-Nobel op dit onderwerp gestort en er diverse boeken en artikelen over geschreven. Is dan niet alles hierover al gezegd? Gelukkig niet, want het probleem van het bewustzijn heeft vele kanten en er is nog heel wat problematiek voor ons blijven liggen. Bovendien worden de religieus gemotiveerde dualistische ideeën van Eccles, die een vorm van Cartesiaans dualisme aanhangt (zie bijvoorbeeld Popper & Eccles, 1977), in wetenschappelijke kringen niet serieus genomen. Francis Crick is een reductionistisch fysicist van de harde lijn, die onvermoeibaar interessante suggesties en ideeën aandraagt, maar niet het geduld heeft om de argumenten van tegenstanders serieus te nemen (Crick, 1994). Edelman (1993) bekijkt de problemen vanuit een gezonde biologische optiek. Maar de concrete uitwerking die hij geeft van zijn zogenaamd ‘neuronaal Darwinisme’ sluit niet altijd even goed aan bij theorieën en onderzoek van anderen en heeft (nog?) niet tot een spontane schaar volgelingen geleid (Van de Grind, 1995). Bovendien ligt in zijn werk de nadruk niet bij visuele perceptie en de relatie tussen psychofysica en neurowetenschap, zoals in dit boek. Kortom, we moeten grotendeels op eigen kompas verder, maar er zijn in elk geval planken vol boeken en stapels publicaties om ons te steunen.

Hier beschouwen we het bewustzijn vanuit biologisch, dat wil zeggen natuurwetenschappelijk, perspectief. Bewustzijn is geen tastbare stof en heeft dus geen direct dateerbare sporen van zijn

evolutie in de aardlagen achtergelaten. Bewustzijn is een eigenschap van (sommige!) hersenprocessen. We kunnen het alleen beter leren begrijpen door onderzoek te doen aan hersenen en gedrag bij nu levende diersoorten, inclusief de mens. Voor de bioloog is de mens natuurlijk gewoon een diersoort, maar één met een specialisatie die bijna zo eigenaardig is als de echolocatie van de vleermuis, namelijk de taal. Geëvolueerde aspecten van gedrag die we ook bij andere diersoorten verwachten, zoals intelligentie, cognitie, emotie, bewustzijn, mogen niet a priori aan de menselijke specialisatie 'taal' worden opgehangen. Zo'n startpostulaat gaat namelijk uit van iets wat eerst nog bewezen of gefalsificeerd moet worden. De nulhypothese in de biologie is dat van ieder verschijnsel of iedere specialisatie de beginontwikkeling bij een reeks voorlopers terug te vinden is. Dat moet bij bewustzijn ook zo zijn. Het zou natuurlijk kunnen zijn dat bewustzijn door de ontwikkeling van onze menselijke taal en sociale structuren een explosieve ontwikkeling heeft doorgemaakt. In dat geval zou de mens niet alleen de meest bewuste soort van alle diersoorten zijn, maar het bewustzijn van andere dieren zou vergeleken bij dat van de mens wellicht volkomen verwaarloosbaar zijn. We hoeven dan alleen rudimenten van dit bewustzijn te verwachten bij directe voorlopers van de mens. Echter, waarom zou de vleermuis niet even goed aanspraak op bewustzijn kunnen maken? Die praat ook tegen zijn omgeving en krijgt zeer complexe antwoorden (mug naast boom bij water, collega-vleermuis is al op weg en dichterbij, enzovoorts). Waarom zouden olifanthersenen of walvishersenen, die veel groter zijn dan de onze en wellicht superieur qua geheugenfuncties, geen bewustzijn ontwikkeld hebben? Kortom, wat is er nu zo 'talig' aan bewustzijn? Is visuele attentie niet ook een vorm van bewustzijn en welke redenen zouden we hebben die vorm van bewustzijn aan een kat, uil of bever te ontzeggen?

Het is in laatste instantie een empirische kwestie hoe dit alles precies zit. Uit onderzoek wat we nog zullen bespreken, blijkt dat bewustzijn bij de mens waarschijnlijk redelijk goed localiseerbaar is en dus geen globale eigenschap van de hele hersenen. Daarmee is de mogelijkheid gegeven na te gaan, waarin hersendelen waarvan de activiteit tot bewuste ervaringen aanleiding geeft, verschillen van de rest. Daarna kan men onderzoeken of die structuren, processen of eigenschappen van de hersenen ook bij andere dieren voorkomen. Opgemerkt moet worden dat het bewustzijn bij mensen niet exclusief met de taalcortex te maken lijkt te hebben. Diepe afasie leidt niet tot verlaagd bewustzijn.

We gaan niet uit van het vooroordeel dat bewustzijn onlosmakelijk verbonden is met een specialisatie van de mens, maar staan in principe open voor zo'n bevinding, mits die volgt uit serieus natuurwetenschappelijk onderzoek. In elk geval moet de aanzet van het onderzoek soortneutraal zijn. We streven naar verheldering van de argumentatie en bouwen hierbij op de rotsbodem van de moderne biologie, de evolutietheorie. Hierop baseer ik het eerste algemene uitgangspunt over bewuste hersenprocessen.

Bewuste processen moeten overlevingswaarde hebben (gehad), of ze moeten neutrale bijverschijnselen zijn van processen met overlevingswaarde.

Charles Darwin behandelde gedrag van dieren op dezelfde manier als hun structuur, namelijk in het kader van zijn evolutietheorie. Het is merkwaardig dat Darwin zich daarbij niet erg expliciet heeft uitgelaten over mentale verschijnselen zoals bewustzijn. Elf jaar na zijn *Origin of species*, namelijk in 1870, verschenen er twee dikke boeken van Shadworth Hodgson, een Darwinist, die hier wel uitgebreid op inging (Glynn, 1993). Hodgson stelde dat bewuste mentale processen veroorzaakt worden door fysische processen in het zenuwstelsel, maar op hun beurt geen invloed kunnen uitoefenen op die fysische processen en ook niet op elkaar. Bewuste en andere mentale processen kunnen volgens deze visie dus geen gedrag veroorzaken, maar er wel door veroorzaakt worden: het zijn bijverschijnselen, epifomenen. T.H. Huxley, die wel de 'bulldog van Darwin' werd genoemd vanwege zijn rol in de discussie met bisschop Wilberforce, was van dit idee zeer gecharmeerd en noemde deze theorie van Hodgson 'epifomenalisme'. Huxley maakte het epifomenalisme populair onder andere dankzij een beroemde voordracht in 1874, waarin hij de mens een 'bewuste automaat' noemde. Hij vergeleek het bewustzijn onder meer met de fluit van de locomotief, of het tikken en slaan van de klok: bijverschijnselen die geen oorzakelijke invloed op de werking van de locomotief of klok hebben.

Merkwaardig genoeg was het vervolgens een beroemd *psycholoog* die met doorslaggevende biologische bezwaren kwam tegen dit idee, namelijk de Amerikaan William James (Glynn, 1993). In een artikel met de titel *Are we automata?* wees hij in 1879 op het volgende probleem: als bewustzijn geen invloed op gedrag heeft,

kan het ook geen rol spelen in de overlevingskansen van dieren. Maar waarom en hoe zou het dan geëvolueerd zijn? Op zich is dit geen doorslaggevende tegenwerping, want een neutraal epifenomeen kan wel degelijk evolueren als het een bijverschijnsel is van een proces dat wèl aan de overlevingswaarde bijdraagt. Maar, William James' redenatie vervolgde met het voorbeeld van een kind dat zijn hand aan een kachel brandt. Eerst wordt de hand reflexmatig teruggetrokken, nog vóór het pijn doet. De pijn speelt dus geen rol in het directe reflexmatige en effectieve handelen. Vervolgens echter komt de pijn die ervoor zorgt dat het kind zich die situatie inprent en het gedrag, dat tot het branden van de hand leidde, in de toekomst zal trachten te voorkomen. De bewuste ervaring leidt dus tot leren wat goed en wat slecht voor je is en tot beter plannen van toekomstig gedrag. Daarmee heeft het invloed op toekomstig gedrag. Bovendien leidt pijn ertoe dat je gedrag wat al gaande is, stopt en je aandacht naar de pijn en zijn oorzaken verplaatst. Nu kan men wel tegenwerpen dat het geven van een interrupt voor lopend gedrag en leren in principe net zo goed zonder het bewuste aspect van de pijn zou kunnen, maar bij de mens is dat in elk geval niet zo. Als je pijn niet bewust opmerkt, draagt hij er niet toe bij dat je de situatie waaruit hij voortkwam, voortaan vermijdt. Mensen zonder pijnzin leren de schadelijke handelingen (die bij anderen pijn zouden veroorzaken) nauwelijks te beperken, ook al doen ze vreselijk hun best (zie bijvoorbeeld hoofdstuk 8 in Blakemore, 1994).

Zo kwam William James tot de dwingende conclusie dat bewustzijn geëvolueerd moet zijn omdat het voordelen heeft door de invloed ervan op leren, dat wil zeggen op toekomstig gedrag. Het is dus geen epifenomeen. Dit leidt tot een specifiekere vorm van het eerder geformuleerde algemene uitgangspunt:

Mentale verschijnselen, inclusief bewustzijn, moeten overlevingswaarden hebben of gehad hebben en zodoende geselecteerd en dus geëvolueerd zijn.

Omdat we de hersenen verantwoordelijk stellen voor mentale processen volgt ten tweede:

Hersenprocessen en mentale processen zijn verschillende aspecten van eenzelfde biologisch proces.

Voor veel denkers betekent dit automatisch dat je de keuze hebt uit mentalisme of fysicalisme. Óf alles is geest: de wereld inclusief hersenprocessen is een illusie van de geest. Óf alles is fysica en mentale processen moeten tot fysische processen worden gereduceerd. Mentalisme sluit zeker niet aan bij de experimentele biologie. Het zou immers vreemd zijn als evolutie leidt van macromoleculen via ééncelligen en eenvoudige multicellulaire dieren tot dieren met een zenuwstelsel en tot complexe zoogdieren – en dan vervolgens een illusie blijkt te zijn van het denken van sommige van die zoogdieren. Kortom, de bioloog kan niet voor mentalisme kiezen. Toch betekent dat niet automatisch (eliminatie- of reductionistisch) fysicalisme, want er is een minder bekende derde optie.

Hersenprocessen en mentale processen kunnen *complementaire* aspecten zijn van één en hetzelfde proces, zoals ook het deeltjeskarakter en golfkarakter van lichtquanta complementair zijn. In de fysica is het heel gewoon als men bepaalde verschijnselen niet zomaar tot andere kan herleiden, kan reduceren. Er is honderden jaren gediscussieerd over de vraag of Newton nu gelijk had dat licht uit deeltjes bestaat, dan wel Huygens die stelde dat licht een golfkarakter heeft. Niels Bohr was de kampioen van de complementariteitstheorie die beide modellen verenigt. Die theorie stelt dat beide standpunten correct zijn, maar nooit tegelijk. Ze blijken inderdaad beide te volgen uit dezelfde kwantumtheorie, die noch deeltjes reduceert tot golven, noch golven tot deeltjes. Zo'n zestig jaar terug postuleerde Bohr (1938, 1959) in een voordracht in het Deens dat dit ook zou gelden voor mentale processen en hersenprocessen. Er is weliswaar sprake van één en hetzelfde proces, maar soms is de mentale beschrijving correct, soms de beschrijving in termen van hersenprocessen. Zoals de kwantummechanica zowel het golfkarakter als het deeltjeskarakter van fotonen beschrijft, zou men *naar analogie* een theorie kunnen verwachten die zowel de hersenprocessen als de mentale processen beschrijft, zonder de ene tot de andere te reduceren of ze identiek te kunnen verklaren. De hypothese van Bohr luidt als volgt:

“Neuronale processen en mentale processen zijn complementair op een wijze analoog aan die waarop deeltjes- en golfkarakter in de fysica complementair zijn. Het is dus nodig te zoeken naar een theorie die beide aspecten beschrijft, zonder het ene tot het andere te reduceren.”

Bohr poneerde dus niet dat er nieuwe fysische verschijnselen of theorieën nodig zouden zijn om de relatie hersenen-geest te begrijpen, zoals kwantumzwaartekracht (Penrose, 1989) of een theorie van alles. Hij zag zijn redenatie als een analogieredenatie en de studie van neuronale en mentale processen als het legitieme onderwerp van andere vakgebieden dan de natuurkunde. Moderne ‘bewustzijnsfysici’ (een term van Calvin, 1996), zoals Penrose, vertalen een mogelijk vergelijkbare fysische intuïtie vaak op minder bescheiden wijze door ervan uit te gaan dat de natuurkunde wel even een bewustzijnsdeeltje of -golf zal vinden, of een theorie die zo iets beschrijft. Ik denk dat het zinloos is een theorie over mentale processen en hersenprocessen op te gaan stellen zonder gedegen kennis van die processen. Het werk van Penrose (1989) is hiervan een goede illustratie.

Een ander op de fysica geïnspireerd alternatief voor Bohrs hypothese is geformuleerd door de filosoof John Searle (1987). Hij ziet de mentale aspecten als de eigenschappen van neuronale processen van een zeer bepaalde structuur, zoals kristaleigenschappen een gevolg zijn van de roosterstructuur. De componenten op zich (neuronen, respectievelijk moleculen) bepalen niet de macro-eigenschappen, want deze zijn een gevolg van de (causale, respectievelijk geometrische) samenhangen tussen de componenten. In onze terminologie uit hoofdstuk 1 klinkt dat direct minder formidabel. Het betekent dat Searle zegt dat bepaalde hersenprogramma’s, dankzij hun specifieke structuur als macro-eigenschappen bewustzijn opleveren, en andere hersenprogramma’s niet. Bewustzijn zou dan een emergente eigenschap (een ‘Gestalt’) zijn van (de werking van) bepaalde hersenprogramma’s.

5.1.2 Waarom extreem functionalisme (computationalisme) niet acceptabel is

De hypothese van Bohr is niet-functionalistisch van aard. Functionalisme komt me in zijn extreme vormen even absurd voor als

de stelling van Penrose over de relatie tussen kwantumzwaarte-kracht en bewustzijn. Extreme vormen zijn die waarbij men mentale processen ziet als software, dus als vrij verplaatsbaar of als puur symboolproces. Het idee dat mentale processen als het ware identiek zijn aan hun functie voor het gedrag, leidt tot potsierlijke consequenties. Als je de functie nabootst heb je het mentale proces nagebootst, vinden vele functionalisten. In §4.1.3 noemde ik al het gedachtenexperiment van de chipmens en beschreef ik het gevaar van gedachtenexperimenten die geen rekening houden met de fysische realiteit. Niet alles kan op iedere schaal of met ieder materiaal nagebootst worden, er zijn harde fysische grenzen aan de implementatie, de belichaming van functies gesteld. Laten we hiervan een aantal relevante voorbeelden bekijken.

De evolutie vertoont een sterke tendens tot groter worden van de organismen en dat brengt met zich mee dat het bouwplan steeds moet worden aangepast (McMahon & Bonner, 1987). De cellen zijn tot nu toe gemiddeld ongeveer even groot gebleven, zo'n 10 micron, zodat grotere organismen meer cellen hebben. Bij vertebraten is de tendens tot groter worden tijdens de evolutie zeer opvallend; men noemt dit de regel van Cope. Er zijn uitzonderingen op deze regel, maar niet veel. Bij het groter worden neemt niet alleen het aantal cellen toe, maar ook het aantal verschillende celtypen, dat wil zeggen de complexiteit van de taakverdeling neemt toe. Een van de consequenties van het enorme schaalverschil tussen heel grote en heel kleine organismen is een enorme variatie in bouwplan. Schaal en bouwplan hangen samen. De grootste insecten en kleinste zoogdieren overlappen nauwelijks in afmetingen. Ieder bouwplan heeft een beperkt groottebereik waarbinnen het werkt, erbuiten niet.

Een interessante stelling, die de samenhang tussen grootte en bouwplan goed invoelbaar onderstreept, is die van Frits Went (1968). Hij stelt dat de mens vooral zo slim is omdat we de juiste grootte hebben! Hij vergelijkt onder andere mier en mens.

Een mier of een mens van mierenformaat zou geen vuur kunnen onderhouden. De kleinste vlam die levensvatbaar is, is te groot voor de mier om er brandstof op te kunnen gooien. Daartoe zou de mier zo dicht bij moeten komen dat hij zelf zou verschroeien. Een wiel zou de mier of mierenmens nooit kunnen gebruiken, omdat zoiets kleins niet behoorlijk op de aarde kan rollen, tenzij

je alles superglad zou kunnen polijsten. Daar zou gereedschap voor nodig zijn, maar op de mierenschaal heeft vrijwel niets voldoende impuls, voldoende kinetische energie. Met zulke kleine hamertjes kun je niet hameren, met zulke kleine schaarmpjes kun je niet knippen, met zulke kleine mesjes en speertjes kun je niet jagen. In een boek op mierenmaat zou je niet kunnen bladeren, omdat de bladzijden ten gevolge van moleculaire krachten aan-een zouden kleven. De mier kan zich niet wassen onder een douche, omdat de minimale druppelgrootte al het gevaar oplevert dat de mierenmens in een druppel ingesloten raakt ten gevolge van de oppervlaktenspanning. Kijk maar eens hoe moeilijk een vlieg een poot los kan trekken uit een waterdruppel!

Het lijkt waarschijnlijk dat onze hersenmassa nodig is om op ons niveau te kunnen denken en die massa breng je niet in een mier onder. Het alternatief van hetzelfde cel-aantal, maar kleinere cellen, werkt evenmin want cellen kun je niet ongestraft zoveel verkleinen – dan werken ze niet meer. Met een oog van de grootte van een mieren oog zie je niet veel, insecten hebben lage-resolutieogen en de gezichtsscherpte hangt om optische redenen direct samen met de ooggrootte. De mierenmens zou een mierenbrein hebben, nauwelijks zien en geen gereedschap kunnen gebruiken. Ook verbale communicatie zou niet mogelijk zijn, maar daar zullen we niet over uitwijken.

De stelling van Went lijkt me voldoende toegelicht. Laten we blij zijn dat we grote dieren zijn, dichtbij de bovengrens, ver van de ondergrens van het leven. Een bepaalde kritische massa is nodig voor een bestaan als het onze. De verhouding oppervlak-volume oftewel oppervlak-massa is omgekeerd evenredig met de lengte van een dier. Dus een bacterie die 10^8 keer zo klein is als een walvis heeft 10^8 keer zoveel buitenoppervlak per massa-eenheid! Kortom, functionalisme is fysisch gezien pure nonsens. Niet alles kan in alle media, met alle materialen, op alle schalen. Het is zelfs niet principieel uitgesloten dat de huidige natuurlijke realisatie van organismen met de huidige materialen en op de huidige tijd-ruimteschaal de enig mogelijke is. Zoiets kan geen gedachtenexperiment beslissen, dat kun je alleen via natuurwetenschappelijk onderzoek te weten komen.

Bij de evolutie van dieren van toenemende afmetingen en complexiteit hoort een toename van de hersenmassa en van de variëteit aan celtypen en neuronale schakelingen in de hersenen. Bio-

logisch gezien is het een aantrekkelijke theorie dat deze groei en toenemende complexiteit te maken heeft met toenemende autonomie (§I.4.3). Honderd procent autonomie kan geen levend systeem bereiken, omdat ze alle een lichaam hebben, de drager van het erfelijk materiaal, dat onderhoud vraagt en dus interactie met de omgeving. “Freedom is just another word for nothing left to loose” (regel uit *Bobby McGee* van de zanger Kris Kristofferson). Een symboolproces, zoals een wiskunde, is wèl volledig autonoom en kan juist daarom geen goed model van het leven zijn. Het leven is fysisch-chemisch, organismaal, lichamelijk (§I.4.4) van aard; niet functioneel, logisch, wiskundig of computationeel! Dit laat onverlet dat ‘functies’ belangrijke aspecten van het leven zijn, maar dan in samenhang met hun implementatie en de daaraan gestelde fysische, chemische, systemische en oecologische grenzen. Psychologie behoort zich naar mijn mening in de richting van een natuurwetenschap te ontwikkelen, met bijvoorbeeld sterke interesse in cognitieve (en emotieve) neurowetenschap. Functionalisme en sterke AI, computationalisme en dergelijke kunnen wel de informatica (een symboolwetenschap), de techniek van het hanteren van complexe databases en het ontwikkelen van betere symbool-gereedschappen voor de mens bevruchten, maar voor de psychologie zijn ze een doodlopende weg.

5.2 Bewustzijn en het antropomorfe perspectief

5.2.1 Dieren missen essentiële menselijke eigenschappen

Een andere manier (dan functionalisme en reductionistisch fysicalisme) om de biologische aspecten van mentale processen, inclusief bewustzijn, overboord te gooien is ervan uitgaan dat zulke processen voornamelijk of uitsluitend taalprocessen zijn en/of gebonden aan de menselijke cultuur. Als dat zo zou zijn, kan (vrijwel) alleen de mens bewuste processen vertonen. Dit is het klassieke uitgangspunt van het christelijke geloof, dat is gebaseerd op de uniciteit van de mens die immers naar het beeld van god is geschapen. Argumenten voor de uniciteit van de mens behoren tot de laatste restanten van de argumenten tegen de evolutietheorie.

Dennett (1996) heeft recentelijk ook zo’n type uniciteitsstelling als uitgangspunt genomen: bewustzijn is onverbrekkelijk verbonden met volwaardige (dus menselijke) taal. We weten alleen over het bestaan van bewuste processen bij anderen via de taal, via

communicatie met andere mensen. Of een dier bewuste processen heeft, zouden we alleen te weten kunnen komen als het dier zou kunnen praten. Taal is echter niet alleen een voorwaarde om kennis over de geest van anderen te krijgen, maar ook een voorwaarde om zelf bewuste processen te hebben, zo vervolgt Dennett. Het zegt dus tevens wat over de bezitter van het taalvermogen. Taal maakt het mogelijk vragen over ons eigen denken en ervaren te stellen, en tilt ons daarmee volgens Dennett op een heel ander (bewustzijns)niveau, dat op geen mijlen na te bereiken is zonder volwaardige taal. Dennett ziet computers en mensen als vergelijkbare ‘machines’ en uitsluitend omdat ze beide taal ‘hebben’ kunnen ze volgens hem bewustzijn ontwikkelen. Dat een mens geen machine is, en dat computers geen lichaam en dus geen zelforganiserend, zelfbetekenisgevend, taalsysteem hebben (§1.4.4), vindt Dennett kennelijk geen punten van belang. Dieren daarentegen hebben, zo oordeelt Dennett, geen taal, dus ook geen bewustzijn, geen lijden, enzovoorts. Als je taal nodig hebt om pijn te lijden, honger of dorst te hebben, bang te zijn of vermoeid, dan zitten de meeste mensen die huisdieren hebben er flink naast als ze die ervaringen bij hun dieren veronderstellen. Maar waarom dat alles zo zou zijn, doet Dennett niet uit de doeken.

De door Dennett gevolgde tactiek om bewuste processen vanuit de mens te benaderen is klassiek en sluit zoals gezegd goed aan bij een aantal religies. Men heeft eenzelfde tactiek dan ook voor allerlei cognitieve processen geprobeerd. Alleen de mens kan denken, want voor denken is taal nodig (of nog leuker, ‘bewustzijn’). Alleen de mens is intelligent of kan denken, want ... Vul maar één of andere hoog gewaardeerde (liefst exclusief menselijke) vaardigheid in. Eerst beweerde men dat alleen de mens kan leren. Toen lieten leerpsychologen zien dat veel leren conditioneren is, en dat conditioneren universeel voorkomt in het dierenrijk, ook bij de mens.

In hoofdstuk 1 hebben we al besproken hoe ethologen hebben laten zien dat in de natuur veel meer vormen van leren dan alleen klassiek conditioneren voorkomen bij dieren. Dieren bleken zeer inventief te zijn en vaak gedrag te vertonen dat we – als het bij mensen voorkomt – denken en uitvinden zouden noemen. De meeste mensen hebben dan ook een redelijk hoge dunk van de cognitieve vermogens van dieren, zoals een Amerikaans opinieonderzoek aantoonde (Rasmussen e.a., 1993). Uit het onderzoek

blijkt dat 94% van de eigenaars van huisdieren bekend dat ze tegen hun huisdieren praten en dat 81% van die eigenaars van mening is dat de dieren hen begrijpen en met hen meevoelen! Bij vergelijking van een mensenkind, een hond, een kat, een vogel, en een vis, vonden de ondervraagden het vrijwel even redelijk aan te nemen dat ze perceptie hadden die met de onze vergelijkbaar is. Hetzelfde gold voor emoties waaronder dankbaarheid, al bleef de vis daarbij wat achter bij de rest. Wat morele principes betreft scoorden kind en hond hoog, de kat lager, de vogel nog lager en de vis bijna drie keer zo laag als het kind. Het kind werd veel hoger dan alle dieren geschat op de vermogens tot plannen en onthouden, spelen en fantaseren, dromen, tellen en sorteren. Op de vis na scoorden dieren en kind vrijwel gelijk wat betreft object-permanentie (het besef dat een object niet verandert als het even uit zicht is en het vermogen het object te onthouden en dus als reeds bekend object te herkennen). Natuurlijk bewijst de mening van de gemiddelde burger over deze zaken niets over de wetenschappelijke status van de stelling dat dieren emoties en bepaalde cognitieve vermogens hebben. Echter als we iets tegenintuïtiefs willen beweren, dat wil zeggen tegen deze opinies in willen gaan zoals Dennett doet, moeten we tenminste valide argumenten leveren. Zonder dat hoeft niemand de wetenschapper te geloven die zegt dat de gemiddelde burger het totaal verkeerd ziet.

Een ander thema van Dennett (1992), met dezelfde strekking van menselijke uniciteit, is dat bewustzijn een culturele constructie zou zijn. Eerst poneert hij dat menselijk bewustzijn een zo recente evolutionaire innovatie zou zijn, dat er geen tijd zou zijn geweest het in de bedrading vast te leggen. Daarmee staan dieren al direct buiten spel, maar Dennett maakt dat nog explicieter door te stellen (concluderen) dat bewustzijn (grotendeels) een product van menselijke cultuur is. Tijdens onze opvoeding krijgen we allerlei cultuurbrokken (*memen*, Dawkins, 1982) te verteren, en menselijk bewustzijn is een conglomeraat van zulke brokken. Je kunt geen bewustzijn 'hebben' zonder het *concept* van bewustzijn, aldus Dennett. Hij ziet de kennis en cultuur als de 'software', en onze hersenen zoals die zijn geëvolueerd als de hardware. Vandaar dat tussen haakjes 'grotendeels' staat bij de bewering dat bewustzijn een product van de menselijke cultuur is: de hardware is wel nodig. Block (1995, p.238) vat dit als volgt aardig samen:

"The idea would be that perhaps there was a time when people genetically like us ate, drank and had sex, but there was nothing it

was like for them to do these things. Furthermore, each of us would have been like that if not for specific concepts we acquired from our culture in growing up. Ridiculous!”

Het is prettig een ander krachtig te zien reageren op een wijze waar je het mee eens bent. Cultuur heeft natuurlijk (vindt ook Block) wel degelijk invloed op ons bewustzijn. Op een goede weg loopt een mens beter en sneller dan in ruw terrein, maar het lopen is daarmee nog niet pas ontstaan toen er wegen ontstonden – integendeel (anders zouden we wellicht wielen hebben gehad). In zekere zin neemt onze cultuur zelfs een hoop denkwerk en veel vitale beslissingen van ons over. Men zou dus even goed kunnen vermoeden of postuleren dat onze cognitieve vaardigheden of de mate van bewustzijn met de ontwikkeling van onze cultuur sinds de oermens achteruit gegaan moeten zijn. Dennetts ‘Multiple Drafts Theory’ van bewustzijn postuleert dat er steeds meerdere parallele representaties zijn, die een competitie aangaan om de verwerkingseenheden tijdelijk te kunnen monopoliseren en zo invloed te krijgen op geheugen en actie. Zoals Block (1995) terecht opmerkt, is deze theorie alleen compatibel met de aanname dat de hersenen precies op die wijze biologisch geëvolueerd zijn, en niet met de stelling dat deze werkingsmechanismen culturele verworvenheden zijn.

Nog een andere versie van de menselijke uniciteitsthese vinden we bij Bermond (1996), die de dierenleedlobby aanvalt. Hij beschrijft eerst bepaalde eigenschappen van percepten en emoties bij de mens, dan de zetel van zulke percepten en emoties in ons zenuwstelsel (alles wat psychologisch van belang is zetelt in de neocortex, lijkt hierbij zijn devies). Vervolgens concludeert hij hieruit dat dit alles (inclusief lijden, waar het om ging) niet bij andere dieren te vinden kan zijn (mogelijk met uitzondering van primaten en dolfinnen), omdat andere dieren geen vergelijkbare neocortex hebben. Merkwaardigerwijs trekt hij hieruit niet de conclusie dat dierexperimenten dus voor de psychologie geen zin hebben, omdat ze ons toch niets interessants over de mens leren. Integendeel, hij trekt de conclusie dat we niet moeten zeuren over dierexperimenten omdat de dieren toch niet lijden! Hoewel de tandarts niet kan bewijzen dat hij me pijn doet als ik kreun, of in de stoelleuning knijp en mijn ogen dichtknijp tijdens zijn behandeling, reageert hij gelukkig toch op basis van die aanname. Taalvrije communicatie van pijn en rudimenten van verdedigings- en vluchtge-

drag zijn voor hem voldoende. De dierenarts gebruikt dezelfde criteria bij de behandeling van een hond of kat en dat lijkt me zeer terecht. Waarom zouden de pijngedragingen zo op elkaar lijken en zo precies onder dezelfde omstandigheden optreden, maar de bijbehorende ervaringen niet?

Pijnervaringen bevorderen, net als andere bewuste negatieve (respectievelijk positieve) ervaringen, dat we leren de oorzaken in de toekomst te vermijden (respectievelijk op te zoeken), en hebben dus overlevingswaarde, zo stelden we in §5.1.1 in navolging van William James. Het lijden duurt langer dan de oorzaak om gedrag wat al gaande is te kunnen onderbreken, de aandacht te kunnen verleggen en de ervaring in het langetermijngeheugen op te kunnen slaan. Langer hoeft het lijden niet te duren, maar als het pijnsysteem eenmaal zo werkt, zal de pijn aanhouden bij pathologische omstandigheden zoals kanker, waarbij de oorzaak aanwezig blijft. Uiteraard is dat niet door natuurlijke selectie verdwenen, want zulk langdurig lijden heeft de neiging pas na de reproductieve jaren op te treden. Daarnaast kan in een context als onze cultuur geleerd worden emoties te overdrijven, als zulk gedrag beloond wordt doordat je zo andere mensen voor je karretje weet te spannen. Ook een hond kan dat leren; huisdieren maken op etenstijd een aanzienlijk hongriger indruk dan men gemiddeld ziet bij dieren in de natuur. Ze trachten het gevoel te communiceren in plaats van zelf een oplossing te vinden. Dat kan zeker contra-productief zijn, want bedelen voor de koelkast heeft geen zin als er niemand in de buurt is. Bij de mens kan het zelfs voorkomen dat een persoon de emotie alsmaar weer aan zichzelf communiceert en zo versterkt en blijvend maakt, met pathologische contra-productieve gevolgen. Dit soort geleerde of geconditioneerde aspecten van de emotie (langdurig lijden) benadrukt Bermond als redematietruc om tot de conclusie (p. 126) te komen: *“Een en ander betekent dat de emotionele ervaring negatieve survival- of fitness-waarde met zich meebrengt.”* Uiteraard is dit biologische onzin. Als emoties geen overlevingswaarde zouden hebben (gehad), zouden ze gewoon niet bestaan, ook niet bij de mens, tenzij men van een goddelijke (duivelse?) inblazing uitgaat.

Het leidt geen twijfel dat de mens unieke vaardigheden heeft en dat taal met alle daarvan afgeleide symbolsystemen en onze hele cultuur, daarbij een prominente rol spelen. Ook onze handen met de vaardigheden tot schrijven, tot het maken van gereedschappen en wapens, of ons vermogen om van kunst te genieten en weten-

schap te bedrijven, zijn uniek in kwaliteit en kwantiteit. Dat we aan al deze vermogens en vaardigheden en aan onze sociale verbanden een bepaalde hoogmoed ten opzichte van andere dieren verbinden, is niet verbazingwekkend. We kunnen nauwelijks superlatieven vinden om deze geweldige zaken te beschrijven – en terecht. Echter niets wijst erop dat al onze vaardigheden zo uniek en geweldig zijn. We kunnen niet zo goed ruiken als een hond, niet zo goed horen als een uil of zien als een arend; we kunnen niet zo goed navigeren en vliegen als veel vogelsoorten of zwemmen als bruinvissen. We hebben geen echolocatie, zien geen ultraviolet licht, hebben geen antennes met chemoreceptoren, kunnen niet graven als een mol en ga zo maar door. Waarom zou bewustzijn nu precies horen bij de specialisaties van de mens en bij geen van de unieke vaardigheden van andere dieren?

5.2.2 Taalvermogens bij dieren

Kunnen we Dennetts lage dunk over dieren opvijzelen door te laten zien dat ze wel degelijk over taal of iets vergelijkbaars beschikken? De redenatie zou dan zijn: stel dat taal voldoende een voorwaarde voor bewustzijn is en we hebben nu bewezen dat diersoorten *X* en *Y* een taal kunnen leren, dan zijn ze dus bewust. Vanuit de dierpsychologie heeft het niet aan pogingen ontbroken om aan te tonen dat ook bepaalde diersoorten taalachtige vermogens hebben. Apen die via gebarentaal of via computerterminals met mensen communiceren, waren een tijdlang in de media in de mode. Er zijn veel bezwaren tegen de te optimistische conclusies uit die onderzoeken gerezen. Veel werk was niet vrij van de verdenking dat het om ‘slimme Hans’-effecten ging (zie hoofdstuk 1). Desondanks lijkt het er nu op dat bij diverse andere primatensoorten dan de mens door oefening een bepaald vermogen om taalachtige communicatie te gebruiken ontwikkeld kan worden, maar het lijkt nooit erg veel op de enorme taalvermogens van de volwassen ontwikkelde mens. Taalachtige verschijnselen komen natuurlijk bij veel dieren voor, maar taal in een vorm die linguïsten serieus zouden nemen, is en blijft een typisch menselijk vermogen. Alhoewel, hoe zit het met sprekende vogels?

Een beroemd voorbeeld is Alex, een papegaai getraind door Irene Pepperberg. De meest toegankelijk bronnen voor een samenvatting van de taalvaardigheden van Alex Pepperberg zijn Arzt & Bir-

melin (1995), Gould & Gould (1994) en Pepperberg (1991). Irene Pepperberg gebruikte onder andere een originele leer methode (ontwikkeld door Todt, 1975) om Alex het spreken bij te brengen. Niet de gebruikelijke conditioneringsmethode, die leidt tot simpel geconditioneerd gedrag, maar een driehoeksverhouding en jaloezie als motivatie voor Alex. Een leraar en leerling zaten voor Alex, die nog heel jong was en dus als alle jonge dieren (ook de mens) graag in het middelpunt van de belangstelling stond. De leraar pakte dan een object op en vroeg traag en goed gearticuleerd sprekend aan de leerling 'wat is dit?' Waarop de leerling antwoordde, bijvoorbeeld 'sleutel'. Alex zat er voor spek en bonen bij, wat hem niet beviel. Na een aantal herhalingen begon hij zich dan ook in het gesprek te mengen door ook een poging te wagen het door de leerling gebruikte woord te zeggen, wat met aandacht van de leraar beloond werd. Die methode bleek goed te werken, omdat Alex langzaam ook leerde woorden in de juiste context te gebruiken. Als hij iets riep wat niet van toepassing was werd er namelijk geen aandacht aan hem geschonken. De papegaai zag de leerling kennelijk als rivaal en probeerde als een jaloezies kind deze af te troeven. Na tien jaar training beheerste Alex zeventig woorden, waarvan dertig objectnamen, zeven kleurnamen, vijf vormnamen, de vijf eerste natuurlijke getallen, enkele materiaalnamen (bijvoorbeeld 'papier'), een aantal uitdrukkingen zoals 'kom hier', 'wil gaan naar', 'hoeveel' en een aantal woorden zoals kleur, vorm, materiaal, wat, hetzelfde, verschillend, geen, nee. Het lijkt inderdaad mogelijk om 'zinnig' met Alex over diverse zaken te communiceren binnen de grenzen van deze woordenschat, die overigens groter is dan wat we van vele helden in moderne geweldsfilms op de televisie horen. Men kan Alex bijvoorbeeld over twee objecten vragen wat het verschil tussen de twee is. Hij kan dan (in 95% van de gevallen correct) vertellen dat ze in kleur, vorm of materiaal verschillen, of juist nergens in. Hij kan uit een aantal gekleurde sleutels vrijwel feilloos de sleutel van een gevraagde kleur oppikken en aangeven. Kortom, wie Alex meemaakt is verbaasd over zijn taalvaardigheden, die ver uitsteken boven wat een papegaai normaal kan.

Ook de papegaai Silver van mijn Deense schoonouders riep overigens altijd op het juiste moment "farvel!" (tot ziens), namelijk als iemand een jas aantrok of naar de buitendeur liep met de bedoeling om weg te gaan (niet als er gebeld werd en men open ging doen). Het dier was voor deze uiting in dit verband nooit beloond, maar had kennelijk bij het imiteren van de uitroep tegelijk

de situatie waarin die voorkwam geleerd. Zo'n aangeboren neiging een geluid in een situationele context te plaatsen en onthouden, en vervolgens vele verschillende afscheidsscènes als behorend tot die categorie van situaties te herkennen, is bijzonder interessant. Men kan desondanks redelijkerwijs betwijfelen of het als een vorm van taalvermogen opgevat moet worden.

Dit type bevindingen bij papegaaien, de complexere communicatievermogens van apen, of bevindingen met gebarentaal bij dolfijnen zijn natuurlijk linguïstisch gezien te mager om er de conclusie aan te verbinden dat andere dieren een taal kunnen leren beheersen zoals mensen dat kunnen. Het is echter wel voldoende om vast te stellen dat de menselijke taal niet geheel in een vacuüm ontstaan is, en dat simpele vormen van onze taalvaardigheid in andere diersoorten opgedoken zijn, zelfs in totaal andere afstammingslijnen in de evolutie. Zoals bij vleermuizen de combinatie van geluidsproductie en horen heeft geleid tot echolocatie van unieke kwaliteit, heeft die combinatie van geluidsproductie en -perceptie bij de mens geleid tot unieke taalvaardigheden. Dat mensen met veel moeite dieren bepaalde taalvaardigheden bij willen en kunnen brengen, illustreert op vertederende wijze de wederzijdse bereidheid tot communicatieve interactie. Communicatie is in de natuur op bijzonder uitgebreide schaal aanwezig, zeker binnen soorten. Als we menselijke taal opvatten als het beste natuurlijke intraspecies communicatiemiddel, relativiseren we de status van de menselijke taal tot een glanzende evolutionaire verworvenheid in plaats van taal te zien als de centrale basis voor ons bestaan. Zonder de kwaliteit en complexiteit van menselijke taal te hoeven onderschatten, kunnen we dan toch inzien dat het niet zomaar als basis van allerlei andere biologische verworvenheden mag worden gepostuleerd.

De conclusie die ik uit dit alles trek, is dat mensen sterk de neiging hebben hun eigen specifieke vermogens, zoals taal of cultuur, centraal te stellen als het om zaken als denken, intelligentie en bewustzijn gaat. Daartegenover staat het biologische inzicht dat ieder dier in zijn eigen niche de slimste is (Breland-Bailey, 1986). Als vleermuizen over zulke zaken na zouden kunnen denken, zouden ze ons waarschijnlijk achterlijke wezens vinden omdat we geen echolocatiesysteem hebben. Onze taal is van unieke kwaliteit, maar waarom zou dat inhouden dat dit ook geldt voor bewustzijn? We moeten dat gewoon onbevangen onderzoeken,

zonder een van de mogelijke resultaten zomaar als uitgangspunt te nemen.

5.3 Soorten bewustzijn

5.3.1 De wc-schakelaar

In het bovenstaande werd net gedaan of er maar één soort bewustzijn is, maar klopt dat wel? Er zijn zeker zowel bewuste als niet-bewuste processen, maar definieert dan niet ieder apart bewust proces een andere vorm van bewustzijn, zoals ook ieder niet-bewust proces iets anders zou kunnen zijn met een andere zetel in het zenuwstelsel? We zouden bijvoorbeeld kunnen uitgaan van bewust waarnemen, bewust navigeren, bewust plannen, bewust leren en dan postuleren dat dit even zo vele vormen van bewustzijn zijn. Echter, introspectief lijkt ons bewustzijn vaak een eenheid en voor de bewering dat dit slechts schijn is, zouden we toch wel graag argumenten hebben voor we hem accepteren. De dierenarts zegt bij anaesthesie van onze huisdieren dat ze ‘bij’ of ‘buiten’ bewustzijn kunnen zijn. Daarmee doelt hij of zij op een toestand op de schaal wakker-coma, als we droomloze slaap of narcose even gemakshalve ook coma noemen (wat strikt genomen niet correct is, maar voor een globale redenatie voldoende).

We zouden dit bewustzijn dat alle dieren kennelijk kunnen ‘hebben’ en kunnen ‘kwijtraken’ tijdelijk even het wc-bewustzijn (Wakker/Coma-bewustzijn) kunnen noemen. Is dit wel een ‘bewustzijn’? Het is in elk geval universeel aanwezig bij (wakkere) vertebraten, maar mogelijk nog wijder verbreid in het dierenrijk. Zo is zelfs narcose van een kakkerlak mogelijk (met CO₂). Bij vertebraten kan de reticulaire formatie in de hersenstam en het verlengde merg een soort algemene activatie naar alle overige hersendelen sturen. Daardoor wordt bij alle zenuwcellen de activatiedrempel voor hun meer specifieke inputs gemakkelijker overschreden. Hun activatiekans is groter, ze zijn ‘wakkerder’. Tijdens diepe slaap of narcose is niet alleen deze algemene diffuse activatie afwezig, maar worden ook allerlei sensorische ingangen naar de cortex geblokkeerd door poortschakelingen in de thalamus. Daarnaast zijn de diverse actiesystemen (motorprogramma’s) geheel of gedeeltelijk uitgeschakeld, geïnhibeerd.

Over de mechanismen van de narcose is zeker nog niet alles bekend, maar het wc-bewustzijn zien de meeste onderzoekers te-

genwoordig toch als een simpel soort globale ‘schakelaar met dimmer’. Het schakelt als het ware alle vormen van bewuste en niet-bewuste processen (meer of minder) aan en uit, door algemene activatie of deactivatie. Ook als dieren geen enkele vorm van bewustzijn zouden hebben, zou deze wc-schakelaar nog gewoon kunnen werken door de niet-bewuste processen aan en uit te schakelen. Het lijkt dus weinig zinvol dit fenomeen zonder meer als ‘bewustzijn’ te zien. Het spraakgebruik is hier verwarrend. Dat wat de kakkerlak bij anaesthesie met CO₂ ‘verliest’ is niet zijn bewustzijn, maar zijn wakkere toestand en hetzelfde geldt voor andere dieren, inclusief de mens. Toch is het niet geheel onredelijk om bij dieren die bewuste processen hebben in dit geval over bewustzijnsverlies te spreken, omdat de bewuste processen inderdaad ook worden uitgeschakeld of (gedeeltelijk) onderdrukt. De wc-schakelaar lijkt echter op zich geen aparte bewustzijnsvorm te vertegenwoordigen. Overigens zien we hier een voorbeeld van een universele functie, die bij verschillende diersoorten in verschillende delen of processen in het zenuwstelsel zetelt. De kakkerlak heeft natuurlijk geen reticulaire formatie en hersenstam of thalamus zoals de mens, maar de wc-schakelaar werkt bij het dier op geheel analoge wijze. Dit waarschuwt tegen de veelgebruikte redenatie dat als vermogen *X* bij de mens in hersendeel *Y* zetelt, en dier *Z* heeft geen hersendeel *Y*, dat het dier dan ook vermogen *X* niet kan hebben (Bermond, 1996).

5.3.2 *P- en A-bewustzijn volgens Block*

Ned Block (1995) heeft uitgebreid beargumenteerd dat we onderscheid moeten maken tussen ‘phenomenal’ of *P*-bewustzijn en ‘access’ of *A*-bewustzijn. Ik gebruik voorlopig de onvertaalde kwalificaties *P*- en *A*- om er dan in §5.3.3 een verwante, maar aan mijn opvattingen aangepaste, Nederlandse versie van te kunnen geven. Block is het niet eens met de volgende veelgebruikte redenatie in de neuropsychologie: als door een storing of lesie de bewuste ervaring bij een bepaalde actie/perceptie uitvalt en er verandert tegelijk iets aan de kwaliteit van uitvoering van die actie/perceptie, dan definieert die kwaliteitsverandering de rol van de betreffende bewuste ervaring. Twee inleidende voorbeelden illustreren de bekritiseerde redenatie, namelijk ‘blindzien’ en het ‘robotgedrag’ dat soms optreedt tijdens kleinere epilepsieaanvallen.

Blindzien is een verschijnsel dat optreedt bij patiënten met een lesie in V1. Laten we gemakshalve denken aan een lesie waarbij geheel V1 aan één zijde (cortexhelft) weg is. De patiënt is dan blind in het contralaterale gezichtsveld (zie hoofdstuk 4). Het bijzondere van (veel van) deze patiënten is dat ze betrouwbaar kunnen raden wat voor stimuli in hun blinde gezichtsveld worden aangeboden, terwijl ze desondanks zeker weten daar niets te zien. Men moet ze overreden te raden of een lijn of raster bijvoorbeeld verticaal of horizontaal staat, maar als ze het dan uiteindelijk doen, raden ze vrijwel altijd goed. Een aantal van zulke patiënten was bereid aan experimenten mee te doen, waarbij ze als een belletje klinkt, moesten raden of de visuele stimulus in het blinde deel van hun gezichtsveld x (zeg symmetrisch) dan wel y (asymmetrisch) is. Bewegingsrichting, oriëntatie, positie, links-rechts (a)symmetrie en dergelijke kunnen ze vrijwel perfect raden en ook kunnen ze hun hand in de juiste grijphouding brengen, als men vraagt iets in het blinde gezichtsveld te grijpen. Toch weten ze zeker niets te zien! Ze zouden een glas water in hun blinde gezichtsveld niet oppakken en leegdrinken, ook al zouden ze nog zo dorstig zijn. Daaruit heeft men geconcludeerd dat de informatie in het blinde veld wel in het zenuwstelsel vertegenwoordigd is, maar niet beschikbaar is voor rationeel gedrag, voor perceptie, redeneren en handelen. De volgens Block verkeerde conclusie is dat bewustzijn dus de rol heeft rationeel gedrag op basis van neuronale gegevens mogelijk te maken.

Het tweede voorbeeld is van de epilepticus die een aanval krijgt terwijl hij wandelt, autorijdt of pianospeelt. Zo iemand gaat door met de handeling waaraan hij is begonnen met redelijke vaardigheid, maar kan zich er (achteraf) niets van herinneren en is tijdens de aanval ook niet bewust aanspreekbaar. Als er iets onverwachts gebeurt, gaat het mis. De handeling wordt meer robotachtig uitgevoerd en is dus niet meer flexibel en creatief van aard. De door Block bekritiseerde conclusie is dat bewustzijn dus zorgt voor flexibiliteit en creativiteit. (De gedachtenexperimentatoren hebben uit dit verschijnsel de ‘zombie’ gedestilleerd: neem een mens, haal het bewustzijn eruit en je hebt een zombie, zonder bewustzijn, maar nog steeds tot effectief handelen in staat – klaar voor Hollywood!).

Block (1995) meent dat de geschetste en vele verwante redeneringen verkeerd zijn, omdat ze verschillende bewustzijnsconcepten op

één hoop gooien en zo verwarring stichten. Tijdens het gesprek of de discussie kun je dan ongemerkt van de ene naar de andere betekenis overgaan en er eventueel ook nog het al ontzenuwde *wc*-bewustzijn doorheen mengen. Hij wil daarom in elk geval een conceptueel onderscheid aanbrengen tussen *P*- en *A*-bewustzijn. *P*-bewustzijn is de bewuste (subjectieve) ervaring, hoe het is om in een bepaalde toestand te zijn of om 'ik' te zijn. De qualia van de filosoof vallen hier dus onder. Daarentegen is *A*-bewustzijn de bewuste toegang tot gegevens in het zenuwstelsel. Een toestand is *A*-bewust als zijn inhoud klaar staat om te worden gebruikt in denken, redeneren, sturen van actie, communiceren en dergelijke. *A*- en *P*-bewustzijn beïnvloeden elkaar, want een andere denkinhoud geeft een andere ervaring (*P* volgt dan *A*) en een andere ervaring kan de attentie verleggen (*A* volgt dan *P*). Het is echter niet zo dat *P* aanvult wat met *A* verloren gaat, vandaar dat de aangehaalde redeneringen niet correct zijn volgens Block. De patiënt die aan blindzien lijdt heeft geen normaal *A*-bewustzijn, want hij raadt maar naar de stimuli en hij heeft geen *P*-bewustzijn want hij ervaart de stimuli niet. *P*-bewustzijn is een bepaald (intern bepaald?) soort bewustzijn, het betreft ervaringen zoals pijn of de spreekwoordelijke 'rood'-ervaring, en representeert geen specifieke gegevens uit de buitenwereld. *A*-bewustzijn is representatief en een bepaalde waarneming of gedachte kan de ene keer wel, de andere keer niet *A*-bewust zijn. Zelfs pijn heeft naast de *P*-bewuste aspecten ook meestal wel een *A*-bewuste kant (bijvoorbeeld de plaats of oorzaak van de pijn). De genoemde zombie van de gedachtenexperimentatoren zou dus *P*-bewustzijn missen, maar wel *A*-bewustzijn kunnen hebben, zegt Block. (Omdat zombies niet natuurwetenschappelijk bestudeerd kunnen worden heb ik er geen mening over.)

P-bewuste toestanden hebben volgens Block vaak iets 'ik'-achtigs over zich en zouden dus ook een relatie met zelfbewustzijn kunnen hebben, al kan dit laatste even goed een aparte bewustzijnsvorm zijn (§5.4). Block vermoedt dat veel diersoorten *P*-bewustzijn hebben en wat minder soorten ook zelfbewustzijn. In de zogenaamde monitorhypothesen van bewustzijn, zoals Armstrongs eerder genoemde scanninghypothese (§4.1.2), ziet Block niet zo veel. Scannen van interne toestanden doet de computer ook, maar daar verwachten we toch geen bewustzijn van. Het lijkt een wat triviaal proces. Toch sluit hij het idee niet echt uit. In het algemeen stelt Block dat het nog te vroeg is om preciese definities en afbakeningen te geven en acht hij een liberaal termino-

logisch en modelmatig regiem nuttig, mits we maar steeds trachten precies aan te geven over welke aspecten en/of deelprocessen we het menen te hebben.

5.3.3 Ervarings- (E-) en Toegangs- (T-)bewustzijn

De bewuste ervaring die wij mensen hebben bij de waarneming van de kleur rood of bij pijn is individueel, privé, subjectief. We kunnen wel proberen er anderen over te vertellen maar we kunnen niet echt het gevoel, de ervaring overbrengen. Ik noem deze vorm van bewustzijn naar analogie van Blocks *P*-bewustzijn het ervarings- of *E*-bewustzijn. Dit *E*-bewustzijn wordt door velen gezien als het feitelijke mysterie van het bewustzijn. Hiervoor zou de complementariteitshypothese van Bohr (§5.1.1) bijvoorbeeld kunnen gelden. Omdat ik over dit *E*-bewustzijn mijn eigen gedachten wil kunnen ontwikkelen, moest ik een andere aanduiding gebruiken dan Block, die ik niet voor mijn eventuele onzin aansprakelijk wil stellen. Hetzelfde geldt voor een variant van Blocks *A*-bewustzijn, die ik het *T*-bewustzijn zal noemen.

Het Toegangs- of *T*-bewustzijn heeft te maken met ‘weet hebben’ van wat er zich in en met je afspeelt. Als we een nieuwe vaardigheid leren moeten we op alle onderdelen van de activiteit bewust letten, we moeten bewust sturen en bijsturen en gebruiken ons *T*-bewustzijn om te volgen wat er gebeurt, zoveel als het zenuwstelsel toestaat. Niet alles kan ons bewust worden, veel is cognitief of introspectief ondoordringbaar. Als we fietsen, weten we echt niet welke spieren hoe worden aangestuurd, en hoe onze ademhaling, bloedsomloop, temperatuur, hormoonbalans, pupilgrootte, oogbewegingen en dergelijke worden geregeld en gestuurd. De meeste processen in het zenuwstelsel zijn dus niet-bewuste processen. Dit betekent dat wetenschappelijk onderzoek naar bewustzijn in principe mogelijk wordt. Immers als bepaalde processen wel en andere niet bewust zijn, kun je in principe proberen erachter te komen waarin die verschillende soorten processen neurofysiologisch verschillen. Visueel *T*-bewustzijn beïnvloedt bijvoorbeeld onze oogbewegingen. Als we bewust iemand nakijken, zullen de bliklijnen die persoon volgen. Schakelen we ons visueel *T*-bewustzijn vervolgens over op de eettafel, dan draaien hoofd en ogen braaf in die richting en gaan mogelijk weer op eigen houtje afaastbewegingen maken om potentiële doelen

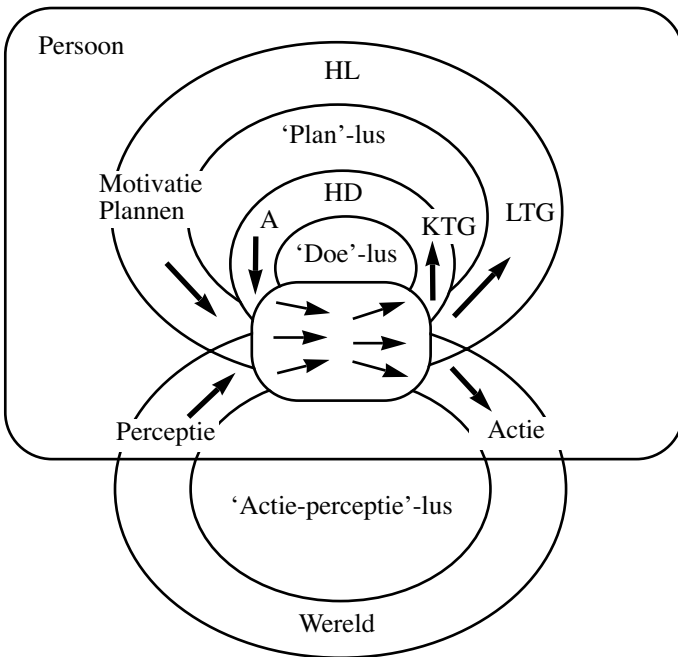
voor onze volgende bewuste waarneming te vinden, zoals een glas champagne of iemands mouw die in de soep hangt. *T*-bewustzijn heeft dus sterk met bewust handelen, bewust waarnemen en redeneren te maken, met attentie oftewel aandacht, en hoe we die richten. Ook bij het bewust inzetten van onze vaardigheden zou het *T*-bewustzijn een rol kunnen spelen. *E*-bewustzijn betreft de bijbehorende individuele ervaringen, de gevoelsmatige kleuring of ‘labelling’ van de al of niet verrassende gebeurtenissen.

Ik zal mijn nek uitsteken en *E*-bewustzijn benoemen tot de vorm van bewustzijn, die een (emotionele) kleuring aan onze ervaringen geeft, een ‘waarde’ toekent waar dat mogelijk en nodig is (§5.3.5). De *E* in de naam kan dus ook voor emotie of evaluatie staan. Het lijkt me niet uitgesloten dat we de globale positie van dit *E*-bewustzijn in ons zenuwstelsel aan kunnen geven. Het *T*-bewustzijn speelt een rol bij allerlei uit te voeren taken, waarbij we bewust de stappen van het proces volgen en sturen. Een toestand of proces is *T*-bewust als zijn inhoud beschikbaar is voor (bewust) denken, redeneren, sturen van actie of communiceren. Het *T*-bewustzijn houdt zich daarbij aan de grote lijn, de details van de processen zijn niet introspectief toegankelijk.

T-bewustzijn kan een emotionele lading of label krijgen door het *E*-bewustzijn, maar dat hoeft niet altijd. We kunnen bijvoorbeeld geïnteresseerd om ons heen kijken en alles met een tamelijk neutrale blik bezien. Daarbij stuurt het zenuwstelsel de visuele attentie van plek naar plek, tot iets ons beroert en het *E*-bewustzijn een rol gaat spelen, de waarneming krijgt dan een label. Bewust kijken betekent *T*-bewust kijken, kijken met attentie en letten op de inhoud van het waargenome. *T*-bewuste processen in het visuele systeem zouden we *TV*-bewuste processen kunnen noemen als we van paradoxale benamingen zouden houden. Ik zie geen reden waarom het visuele (auditieve, somatosensorische, proprioceptieve, ...) *T*-bewustzijn niet bij veel andere dieren in principe (niet in elk detail) vergelijkbaar zou kunnen zijn met dat van de mens. De mens moet daarnaast een *T*-bewustzijn voor taal hebben, waarmee we letten op ons praten en bijsturen waar dat nodig is.

Alvorens nader in te gaan op *T*- en *E*-bewustzijn, is het nuttig te benadrukken, dat we al dit soort zaken dynamisch moeten beschouwen. De soundbite van Heraclitus dat ‘alles stroomt’ (*panta rhei*) vat naar mijn mening een diep inzicht in de levende natuur

samen (ongeacht wat ‘de Duistere’ er zelf mee bedoelde). Bewustzijn heeft slechts betekenis in continu stromende informatie- en materiële processen, in lussen door wereld en zenuwstelsel waarin steeds onrust heerst en steeds iets anders gebeurt. Het is niet gemakkelijk dit idee te verlevendigen, maar figuur 24 is een schuchtere poging. Tijdens het wakkere deel van ons bestaan is er voortdurend stroom in de ‘actie-perceptie’-lus, aangedreven door de ‘doe’-lus in de context van stroom door de ‘plan’-lus. Het liggend rechthoekje symboliseert een neuronale plexus waar alle lussen mengen en weer segregeren. *A* staat voor attentie, *KTG* en *LTG* respectievelijk voor kortetermijngeheugen (werkgeheugen) en langetermijngeheugen. Hersenprogramma’s voor de lange termijn zijn *HL* en die voor directe actie-perceptie *HD* genoemd.



Figuur 24 Het 'panta rhei'-model van een persoon. In het zenuwstelsel worden een aantal lussen in beweging gehouden, namelijk de 'doe'-lus en 'plan'-lus, die tezamen de externe 'actie-perceptie'-lus in beweging houden. De 'doe'-lus levert attentiesturing, de 'plan'-lus levert gegevens over plannen en doelen (motivatie). Beide interne lussen bevatten hersenprogramma's en data (kennis).

Een schema als in figuur 24 heeft natuurlijk weinig om het lijf. Het illustreert slechts dat we in de gaten moeten houden dat de ‘hersentoestanden’ waar in filosofische teksten veel over wordt gesproken, niet echt bestaan – evenmin als retinabeelden. Je kunt het dynamische geheel niet even stoppen om er op je gemak naar te kijken. Terwijl je met iemand praat, veranderen sommige van je eigen hersenprogramma’s zowel als sommige van de luisteraar, en is er activiteit op ongelooflijk veel plaatsen in het zenuwstelsel. Figuur 24 suggereert hoe motivatie/plannen en attentie enerzijds continu de perceptie beïnvloeden, en anderzijds continu beïnvloed worden door de ‘actie-perceptie’-lus via *KTG*- en *LTG*-filters. Het *E*-bewustzijn heeft sterk te maken met de selectie voor en door de ‘plan’-lus, het *T*-bewustzijn relateert eerder aan de ‘doe’-lus, de directe sturing van de ‘actie-perceptie’-lus. Beide lussen bestaan in feite uit een groot aantal individuele lussen, de hersenprogramma’s, die hier en daar een plexus vormen en op andere plaatsen parallel lopen. Figuur 24 is ondanks deze terminologie niet bedoeld als model van het zenuwstelsel, maar meer als illustratie van een dynamische metafoer, de continue stroom. Als we het over perceptie hebben, knippen we impliciet de ‘actie-perceptie’-lus ergens open en laten de wereld en de invloed van eigen acties zo goed mogelijk buiten beschouwing. Tegen de achteloze wijze waarop dat vaak gebeurt, protesteert de directe-perceptietheorie. Ook intern moeten we met zulke complexe en altijd actieve lussen rekenen en ook daar is het moeilijk ze op wetenschappelijk verantwoorde wijze open te knippen om een onderdeel in isolatie te bestuderen.

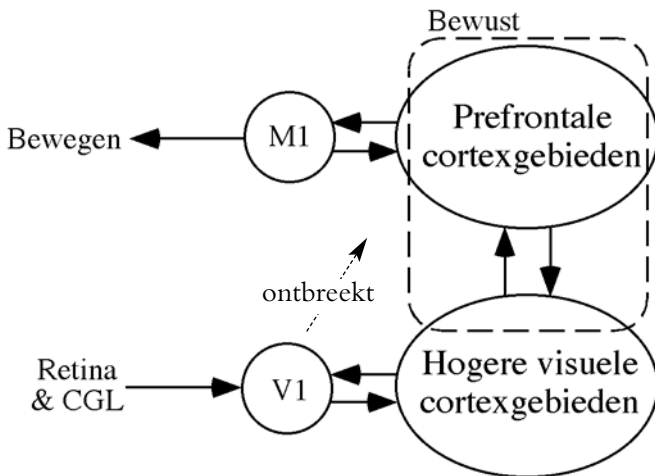
Een goede concretisatie van het probleem om de ‘actie-perceptie’-lus open te knippen is het werk dat in de vijftiger jaren werd uitgevoerd in het laboratorium van Donald Hebb aan sensorische deprivatie. Dit werk is onterecht in de vergetelheid geraakt. Hebb is tegenwoordig vooral nog bekend door zijn voorstelling (in zijn veel geciteerde boek, Hebb, 1949) van een synaptisch leermechanisme: het geleidelijk veranderen van synapsgewichten tijdens gebruik. Ook zijn idee van ‘cell assemblies’, tijdelijke neuronale samenwerkingsverbanden, en zijn gedachten over de associatie van zulke dynamische netwerken in kennisrepresentatie zijn in veel opzichten nog actueel (Milner, 1996). Het werk aan sensorische deprivatie (zie Heron, 1957) is echter uit de belangstelling verdwenen. Als men door allerlei maatregelen zorgt dat mensen enkele uren tot dagen geen enkele sensorische prikkeling ontvan-

gen, als de lus door de omgeving in figuur 24 dus zo effectief mogelijk doorgesneden wordt, krijgen de proefpersonen de vreemdste waanvoorstellingen en hallucinaties. Bij lang volhouden van zulke experimenten lijkt het gevaar van totale 'ontbinding' van de persoonlijkheid niet denkbeeldig. Dat bij langdurig televisiekijken niet een vergelijkbare totale desintegratie optreedt (alhoewel me een gedeeltelijke desintegratie, een bewustzijnsvernaauwing langs die weg geen onwaarschijnlijke hypothese lijkt) zou een gevolg kunnen zijn van de vele mogelijkheden om door oog-, hoofd-, en lichaamsbewegingen, gesprekken met anderen, eten en drinken, een enigszins verarmde parallel lopende 'actie-perceptie'-lus in stand te houden.

5.3.4 *Bewust zien en blindzien*

Zoals we in hoofdstuk 4 zagen, gaan velen er impliciet van uit dat het 'beeld' in de primaire visuele cortex VI bewust wordt waargenomen door de homunculus of door NCC-netwerken ('Neural Correlate of Consciousness'-netwerken) met homunculusachtige eigenschappen. Crick & Koch (1995) merken echter op dat visueel onderzoek bij makaak-aapjes dit direct tegen spreekt. Het lijkt er eerder op dat alleen neuronale signalen die gebieden in de prefrontale cortex bereiken tot bewust zien leiden. Met de prefrontale cortex wordt in dit verband een niet erg nauwkeurig omschreven cortexgebied bedoeld dat vóór de zogenaamde premotorcortex ligt, die op zijn beurt voor area 4 (de primaire motorcortex, M1) in de frontaalkwab (figuur 20) ligt. Deze cortexgebieden zijn nauw verbonden met de basale ganglia (striatum, globus pallidus en substantia nigra) dieper in de voorhersenen, die onder andere met motorische actieprogramma's te maken hebben. Uiteraard komt onder normale omstandigheden de visuele informatie via VI, en dan hogere visuele gebieden (figuur 21 en 23) in de prefrontale cortex. Echter, de stelling is dat VI daarbij zèlf niet bijdraagt aan bewuste perceptie. De hogere visuele gebiedjes wel, maar alleen dankzij hun directe projectie op de prefrontale (premotor)cortex. VI heeft geen directe projectie naar de prefrontale cortex. Crick en Koch (1995) vatten hun voorstel samen met een schema, zoals in figuur 25 is gegeven. De hypothese is in de eerste plaats gebaseerd op de neuroanatomische gegevens, dat bij de makaak VI niet en de hogere visuele gebiedjes wèl direct op de prefrontale cortex projecteren. Daarnaast blijken bij de resusmakaak

bepaalde neuronen in V1 informatie te signaleren die niet correspondeert met datgene waarop het dier blijkbaar reageert, terwijl de activiteit in hogere visuele gebieden wel direct correspondeert met de waarneming.



Figuur 25 Het model van visueel bewustzijn voorgesteld door Crick & Koch (1995). De primaire visuele cortex V1 projecteert niet op de prefrontale cortexgebieden en draagt daarom niet zelf bij aan visueel bewustzijn, maar de hogere cortexgebieden doen dat dankzij hun rechtstreekse verbindingen met de prefrontale gebieden wel.

Laten we eens kijken naar een voorbeeld van dit soort metingen (een zeer vrije stilering van werk door Logothetis & Schall, zie Crick & Koch.) Bij binoculaire rivaliteit zien we soms de informatie van het linkeroog, dan weer van het rechteroog en die beelden wisselen elkaar met onregelmatige intervallen af. Binoculaire rivaliteit treedt op als we met ieder oog naar een ander beeld kijken, bijvoorbeeld met behulp van een stereoscoop, terwijl de beelden niet visueel compatibel, niet-fuseerbaar, zijn. Een voorbeeld van niet-fuseerbare beelden is een horizontaal lijnenraster voor het linkeroog en een verticaal lijnenraster voor het rechteroog. We zien dan soms even verticale, dan weer horizontale, dan weer verticale lijnen, enzovoorts. Aan een wakkere makaak met elektroden in één of meerdere van de visuele cortexgebieden wordt zo'n rivaliserende stimulus aangeboden en het dier is tevooren getraind bij verticale lijnen een hendel naar rechts te bewegen

en bij horizontale lijnen naar links. De hendel geeft dan aan wat het dier ziet. Neuronen in V1 doen echter onder alle omstandigheden hun eigen werk, ongeacht wat de aap ziet. Er zijn neuronen actief die op verticale lijnen zijn afgestemd en neuronen die op horizontale lijnen zijn afgestemd en dat blijft het geval, welke van de twee oriëntaties de aap ook ziet. Meet men nu in V5 of andere hogere visuele gebiedjes, dan is dat niet meer zo. Neuronen die op verticale lijnen aanspreken doen dat alleen als de aap ook aangeeft verticale lijnen te zien en vallen stil zodra de aap horizontale lijnen ziet. V1 weerspiegelt steeds de *aangeboden* gegevens, de hogere gebiedjes de *waargenomen* gegevens. Dit is overigens geen 100% correlatie, want ook in die hogere gebiedjes (in het voorbeeld V5) is er een bepaald percentage van de cellen die zich gedragen als de V1-cellen. Men neemt daarvan aan dat ze direct uit V1 worden aangestuurd en niet zelf op de prefrontale cortex projecteren.

Het voordeel van zo'n moedige en dus misschien niet volledig houdbare hypothese is, dat hij allerlei zinnige experimenten suggereert. Zo weet men dat neuronen in V4 kleurconstantie vertonen en neuronen in V1 niet (Zeki, 1993), zodat het voor de hand ligt na te gaan of de wakkere aap kleurconstantie vertoont, en of die overeenkomt met de eigenschappen van V4-neuronen. Ook kan men de neuronen in de hogere visuele gebiedjes die wel en niet met de waarneming correleren kleuren en dan nagaan of ze in type en/of verbindingen verschillen. Ik noemde al het vermoeden dat neuronen in V5 die niet met de waarneming correleren, maar wel met de V1-informatie, mogelijk de ingangneuronen van V5 zijn. Dat is nog niet gecontroleerd, maar kan worden uitgezocht.

Ook psychofysische bevindingen van Don MacLeod en Sheng He zijn zeer suggestief. Zij vonden dat bij mensen zeer fijne lijnenrasters, net te fijn om door de proefpersoon van een egaal veld te kunnen worden onderscheiden, een oriëntatie-naeffect gaven. Dat wil zeggen dat na adaptatie aan zo'n stimulus grovere, wel zichtbare, rasters bij de adaptatie-oriëntatie een hogere drempel te zien geven dan bij andere oriëntaties. Omdat hogere cortexgebieden een minder fijne resolutie hebben (grotere receptieve velden) dan V1, is de mogelijke verklaring dat de adaptatierasters wel door V1 'gezien' werden, maar niet door de proefpersoon als geheel. Dit ondersteunt het voorstel van Crick & Koch (1995). Men zou dit soort verklaringen kunnen controleren door met PET- of MRI-

scans na te gaan welke areas onder welke omstandigheden actief zijn. De hypothese van Crick en Koch spoort ook goed met de bevindingen van Newsome en medewerkers (Salzman e.a., 1990; Shadlen en Newsome, 1996), die al even in hoofdstuk 4 werden genoemd. Zij vonden dat de activiteiten van neuronen in V5 die beweging signaleren direct correleren met het zien van de wakkerre aap. Als de visuele stimulus er is en de cel reageert, ziet de aap de stimulus; als de cel elektrisch wordt stilgelegd via de meetelektrode, ziet de aap de stimulus niet, ook al is die er wel; als de cel elektrisch via de meetelektrode wordt geprikkeld, ziet de aap de beweging waarvoor de cel codeert, ook als de visuele stimulus er niet is.

Ten slotte is er nog een aspect van het binoculaire zien dat de theorie steunt, namelijk dat men normaal gesproken niet weet via welk oog men bepaalde informatie binnenkrijgt. In VI zijn aparte groepen cellen met een bepaalde oogdominantie, gegroepeerd in oogdominantiekolommen. De informatie uit de twee ogen wordt er niet alleen gecombineerd binoculair gerepresenteerd in binoculaire cellen, maar daarnaast dus ook nog monoculair, voor linker- en rechteroog apart, in cellen die alleen een receptief veld in één van de twee ogen hebben. Deze monoculaire cellen vindt men nauwelijks of niet in volgende visuele cortexgebieden. Omdat we niet bewust kunnen zeggen uit welk oog bepaalde visuele informatie komt, lijkt die bewuste onkunde op de onkunde van de visuele gebieden van hogere orde en niet op die van VI, want die weet de aparte ingangen nog uit elkaar te houden.

In hetzelfde jaar dat Crick en Koch de hypothese formuleerden dat VI niet direct bijdraagt aan visueel bewustzijn, concludeerden Stoerig en Cowey (1995) uit een grondige analyse van de bevindingen betreffende blindzien (p.150): "... *the primary visual cortex is important, and perhaps indispensable for conscious phenomenal vision.*" Er lijkt dus sprake van een interessante tegenspraak. Toch is het niet uitgesloten dat beide scholen gelijk hebben. Immers, de eerste hypothese dat VI geen directe rol speelt, is gebaseerd op het feit dat gebiedjes van hogere orde bepaalde informatie expliciet maken, selecteren, die bewust blijkt te worden, terwijl VI daarnaast ook informatie representeert die niet bewust wordt waargenomen. VI bevat de later bewust geworden informatie impliciet, temidden van veel andere gegevens. De hele redenatie en het model van Crick en Koch is dus gebaseerd op de aanwezigheid van VI. Bij blindzien is VI echter niet aanwezig en spreken we over

andere paden van de retina naar de hogere visuele cortexdelen. Daar zijn er een tiental van, maar de belangrijkste twee voor ons probleem zijn:

1. de baan retina – colliculus superior (CS in figuur 17) pulvinar (een deel van de thalamus) V₂/V₃;
2. retina – intralaminaire neuronen van het CGL – V₂/V₄/V₅/TEO.

Ook zonder V_I komt er dus visuele informatie in hogere visuele cortexgebieden, maar die informatie is ongetwijfeld anders van aard en komt op andere cellen binnen, zal dus mogelijk anders verwerkt worden, en blijkt dan niet tot *E*- of *T*-bewust zien te leiden.

Histologisch onderzoek heeft verder aangetoond dat bij maaak-aapjes met geledeerde V_I een flink deel van de parvocellen in CGL (zie figuur 21) en retina gedegenerereerd zijn, maar de magnocellen niet, evenmin als een derde groep retinale cellen (gamma) die naar CS projecteren. Bij sommige blindzienpatiënten blijkt dat sterke magnostimuli, zoals snelle beweging, inderdaad iets van een *E*-bewuste sensatie geeft. Ze weten dan bewust dat er iets te zien is, maar niet wat, al raden ze wel weer goed als je ze uit een aantal mogelijkheden laat kiezen. Er is dus *E*-, maar geen *T*-bewustzijn van sterke magnostimuli bij deze blindzienpatiënten. Lawrence Weiskrantz, die in 1973 als eerste serieus onderzoek aan blindzien deed en ook de naam bedacht, deed recent onderzoek bij patiënt G.Y., die zulk *E*-bewustzijn van zeer transiënte en van snel bewegende stimuli heeft (review Weiskrantz, 1996). Een PET-scan toonde aan dat zulke stimuli V₃, V₅, area 7 en nog wat gebiedjes activeren, zodat de conclusie in tegenstelling tot die van Stoerig en Cowey moest worden (p.217): “*there is conscious visual perception without V_I*”. Er is dus sprake van convergentie van opinies en van een geleidelijk preciesere afbakening van welke banen en/of cellen wel, en welke niet aan visueel *T*-bewustzijn of *E*-bewustzijn bijdragen.

Een belangrijke methodologische vraag is hoe je dit soort bewustzijnsconcepten experimenteel kunt hanteren. Dat is immers nodig om er natuurwetenschappelijk onderzoek aan te doen. Daartoe allereerst een korte samenvatting van een recent psychofysisch experiment met de al genoemde patiënt G.Y. (zie de review van Weiskrantz, 1996) en dan de vraag hoe je zoiets bijvoorbeeld bij wakkere aapjes kunt doen.

Weiskrantz en medewerkers lieten G.Y. de bewegingsrichting aangeven van een bewegende lichtvlek voor een aantal snelheden en contrasten ten opzichte van de achtergrond. Dit heet een (richting-)discriminatie-experiment en gaat bij deze coöperatieve patiënt net als bij normale proefpersonen. De stimulus wordt kort aangeboden en bij een toontje moet de waarnemer gedwongen kiezen tussen bijvoorbeeld omhoog of omlaag bewegen. Het percentage correct bleek voor afnemend contrast over een groot bereik vrijwel constant tussen de 85 en 95% te liggen. De interessante variant was dat men G.Y. na iedere gedwongen keuze met een extra keuzeknopje liet aangeven of hij iets (bewust) gezien had of niet. (Wát hij zag kon hij sowieso niet beschrijven, dus er was geen *T*-bewustzijn). Hier bleek dat het percentage 'iets gezien' circa tachtig was bij hoog contrast, maar dat zakte bij afnemend contrast snel naar nul procent. *E*-bewustzijn kan bij deze patiënt dus zelfs gekwantificeerd worden!

Kun je zoiets overbrengen naar dierexperimenten? Dat blijkt inderdaad te kunnen. Petra Stoerig en Alan Cowey (1995) trainden apen die aan één zijde *V1* misten, om eerst een lichtvlek middenonder op het scherm te fixeren en aan te raken, waardoor een ander flitsje in één van de vier hoeken van het scherm werd gegenereerd. De dieren moesten vervolgens de plek aanraken waar dat flitsje was gegeven. Dat konden de aapjes ook in hun blinde halfveld, net als mensen met blindzien. Vervolgens trainden de onderzoekers de aapjes te onderscheiden tussen een stimulus en geen stimulus in hun normale gezichtsveld. In het ene geval moesten de dieren op een bepaalde plaats op het scherm drukken en in het andere geval op een andere plek. Daarna boden de onderzoekers een deel van de stimuli in het blinde gezichtsveld van de aapjes aan. Alle prikkels in het blinde gezichtsveld die ze eerst goed konden localiseren, werden nu door de aapjes als 'geen stimulus' geclassificeerd.

In principe is het verschijnsel van blindzien bij aapjes dus hetzelfde als bij mensen en lijkt het redelijk aan te nemen dat deze dieren op vergelijkbare wijze een *E*- en *T*-bewust zien hebben. Met de nodige inventiviteit kan dit soort onderzoek naar andere diersoorten worden uitgebreid en krijgt men experimenteel greep op deze vormen van visueel bewustzijn. Het mooie is natuurlijk dat men psychofysische experimenten, electrofysiologie, scantechnieken en histologie bijeen kan brengen om met grote precisie en stap

voor stap een deel van het mysterie van het bewustzijn op te lossen.

5.3.5 *Het E-bewustzijn, waardetoekenning en emoties*

In aansluiting op de vraag naar de overlevingswaarde van bewustzijn (§5.1.1) stelde William James nog interessante vervolgvragen. Waarom zouden gebeurtenissen die bijdragen aan de overlevingskansen – eten, drinken, geslachtsgemeenschap, spelen, bewegen, presteren – gepaard gaan met aangename gevoelens, positieve emoties? En waarom zouden gebeurtenissen die de overlevingskansen verkleinen – honger, dorst, verwonding, gevaar, mislukking – gepaard gaan met onaangename gevoelens, negatieve emoties? Is dit een gelukkig, respectievelijk ongelukkig, toeval en zou dat echt alleen bij de mens zijn opgetreden, zoals zo velen over dit soort bewuste gevoelens menen (Bermond, 1996)? Vanuit biologisch gezichtspunt lijkt dit toch wel heel onwaarschijnlijk. Deze positieve en negatieve emoties hebben kennelijk overlevingswaarde. Zoals we bij het voorbeeld van mensen zonder pijnzinnigheid (§5.1.1), is die overlevingswaarde – althans bij de mens – sterk gekoppeld aan de bewuste beleving van het ‘gevoel’. Dat kan niet zomaar uit de lucht zijn komen vallen of ingeblazen zijn, het moet geëvolueerd zijn en een basis hebben in neuronale schakelingen. Sterker nog, als er één aspect is dat vanaf het begin van het ontstaan van zenuwstelsels een rol moet hebben gespeeld dan is het wel deze aandrijving van gedrag door positieve en negatieve ‘gevoelens’, deze waardetoekenning aan gebeurtenissen in de omgeving en aan eigen acties. Waarom zou een aardworm ‘onbevooroordeeld’ en geheel neutraal naar de wereld kijken?

In dit verband is het interessant dat *E*-bewustzijn volgens het voorstel van Block (zijn *P*-bewustzijn dus) geen inhoudelijke rol heeft in expliciete argumentatie, in het manipuleren van kennis, in perceptuele transformaties en denken. Het is als het ware puur gevoel zonder expliciete inhoud. Het ligt daarom voor de hand de rol van *E*-bewustzijn te zien als een soort kleuring, aandrijving, motivering, kortom als een evaluatie van de ‘waarde’ voor het individu van zijn waarnemingen en gedragingen in hun context van de eigen strevingen. Daarom zie ik *E*-bewustzijn als de gevoelswaarde van allerlei gebeurtenissen (‘raw feels’), als ‘kale’ emotie, dat wil zeggen emotie los van inhouden. Dit leidt tot een theorie waarbij ook menselijke emoties opgesplitst worden in een niet-

bewust deel, een *T*-bewust deel en het *E*-bewuste ‘skelet’, dat de zaak bijeenhoudt omdat het tot het bedrijfssysteem behoort. Volgens deze gedachtengang zou *E*-bewustzijn vrij universeel kunnen zijn in het dierenrijk in de vorm van de zuivere gevoelsaspecten van emoties. Echter, de inhoudelijke aspecten waarmee dit *E*-bewustzijn gebruikelijkerwijs opgetuigd is (niet-bewuste en *T*-bewuste kennisprocessen) moeten afhangen van wat de hersenen van het betreffende dier aankunnen. De wijze waarop pijn van een baby verschilt van pijn van een ontwikkelde volwassene, komt in de buurt van het verschil tussen *E*-bewuste ervaring met weinig tot geen inhoudelijke bagage en hetzelfde type *E*-bewuste ervaring met veel cognitieve inhoud.

Zit het voorstel van universaliteit van *E*-bewustzijn niet te dicht in de buurt van panpsychisme? Ik denk van niet, want ik zal de laatste zijn om te stellen dat een *E*-bewust hersenproces hetzelfde ‘aanvoelt’, kwalitatief invariant is, ongeacht de *T*-bewuste (en de niet-bewuste) aspecten die ermee gepaard gaan. De pijn van een baby is gewoon niet gelijk aan de pijn van een normale volwassene, want de *T*-bewuste aspecten zijn geheel anders. De ‘kleuring’ als negatieve toestand, als iets waar wat aan gedaan moet worden, zou echter wel eens sterk op die bij volwassenen kunnen lijken. Ook de rol van *E*-bewustzijn om ander gedrag te onderbreken (interruptiefunctie) en de aandacht te verleggen naar het vinden van een oplossing (activeren van een ander hersenprogramma) is in principe hetzelfde. Alleen zal dat streven naar een oplossing voor de hulpeloze mensenvolwassenen communiceren zijn (huilen) en voor de volwassene misschien een bezoek aan zijn huisarts. De evaluatie door het gestarte hersenprogramma van de ‘oplossing’ zal zodoende ook geheel anders zijn. Bij de baby wordt misschien huidcontact met de moeder als oplossing aanvaard, terwijl de volwassene mogelijk een overtuigend verhaal van zijn huisarts of pilletjes nodig heeft. Afhankelijk van de diersoort en van de ontwikkelings-toestand van het individu zal het zenuwstelsel dus anders omspringen met de waardetoekenningen, de zuiver gevoelsmatige kant van de emoties. *E*-bewuste processen spelen volgens deze gedachtengang mogelijk een rol bij de selectie van hersenprogramma’s (plannen voor actie) passend bij de huidige toestand. De ervaring die we *E*-bewustzijn noemen moet zodoende ook afhangen van de beschikbare mogelijkheden, de opties van het organisme. De sterkte van het bij *E*-bewuste ervaringen horende ‘doe iets’-commando kan gering zijn (bij contemplatie of sterven bijvoorbeeld)

of groot (bij gevaar) en zal dus ook afhangen van diersoort en ontwikkelingsstoestand. Hoe iets aanvoelt, zal daarom van vele factoren afhangen die met de structuur van het betreffende zenuwstelsel samenhangen. De meest basale vorm van *E*-bewuste ervaring zal zo iets zijn als 'prettig' versus 'onaangenaam', zonder bijbehorende inhoudelijke overwegingen over het waarom, het hoe, het 'wat nu', en mogelijk met maar één hersenprogramma per evaluatie, respectievelijk 'blijf hier' en 'wegwezen'. We kunnen ons volgens dit model dus zeer goed voorstellen, hoe bewustzijn zowel fylogenetisch als ontogenetisch gradueel kan toenemen in omvang en intensiteit.

Natuurlijk weten we niet door gesprekken met dieren of ze *E*-bewuste en *T*-bewuste ervaringen hebben en zo ja, hoe die dan zijn, maar bij mensen is het ook niet eenvoudig achter die gegevens te komen, zelfs niet met behulp van onze veelbejubelde taal. De neurowetenschap levert hier een nieuwe en preciese ingang, maar de weg naar diep inzicht is ongetwijfeld nog erg lang. De bespiegelingen in deze subparagraaf sluiten zeker aan bij de huidige inzichten in de neurowetenschap, maar dat bewijst nog niet dat ze geweldig zijn of houdbaar. De *T*-bewuste aspecten kunnen worden onderzocht zoals we dat in §5.3.3 beschreven. Zowel de *T*-bewuste als niet-bewuste processen vereisen kennisrepresentaties en geheugenprocessen, die kunnen worden bestudeerd zoals dat nog in §5.4 ter sprake komt. De *E*-bewuste processen betreffen de waardetoekenning en kunnen ook uitstekend nader worden onderzocht, zoals we hier nog kort zullen bespreken. We moeten weer impliciete of expliciete koppelhypotheseën hanteren om de gevoelens en de neuronale processen te koppelen, maar we kunnen die hypotheseën bijvoorbeeld toetsen door elektrische of chemische stimulatie van de betreffende delen van het zenuwstelsel en meting van de effecten daarvan op het gedrag. Ook gedrag is immers door psychologen en ethologen al via grotendeels onafhankelijk ontwikkelde koppelhypotheseën met 'gevoel' in verband gebracht. De twee soorten koppelhypotheseën moeten convergeren en wederzijds bevruchtend werken, willen we verder komen. Door herhaling en verfijning van dat soort onderzoek zullen dan zowel de op gedrag, als de op neurowetenschap toegesneden koppelhypotheseën verbeterd kunnen worden en goede natuurwetenschappelijke theorieën ontstaan over de basis en aard van gedrag en mentale processen, inclusief bewustzijn.

In de psychologie heeft men uitgebreide theorieën over emoties opgesteld, maar er is zeker geen consensustheorie. De meeste theorieën hebben echter gemeen dat men aanneemt dat bewuste emoties beïnvloed worden door drie soorten factoren. Ten eerste de *stimulusfactoren*: eten dat er lekker uitziet maakt hongerig, feromonen wekken paringsdrang op. Ten tweede de *fysiologische factoren*, zoals reacties van het autonome zenuwstelsel en mogelijk de eigen waarneming daarvan (denk aan de James-Lange theorie, §4.1.3). Ten derde *cognitieve factoren*, zoals herinneringen aan vroegere ervaringen, herkenning van aspecten van de situatie, geoefende vaardigheden. Velen houden de basale homeostatische aspecten liever buiten de definitie van emotie, maar dat zal ik hier niet doen.

Rolls (1994) geeft een nuttige opsomming van de functies die emoties volgens hem vervullen. Zijn lijst is hier in bewerkte vorm weergegeven, waarbij ik bij wijze van suggestie een verdeling heb gemaakt in functies die uitsluitend of voornamelijk *E*-bewust respectievelijk *T*-bewust zouden kunnen zijn, en functies waar we beide vormen van bewustzijn bij verwachten. In alle gevallen spelen daarnaast natuurlijk niet-bewuste hersenprocessen een rol bij deze functies, want er is vermoedelijk geen enkele functie van het zenuwstelsel waarvan niet tenminste een deel buiten het bewustzijn om gebeurt.

Functies van emoties die zuiver E-bewust + niet-bewust zouden kunnen zijn:

1. activeren van het autonome zenuwstelsel en het hormoonstelsel (adrenalineshot) om het lichaam voor te bereiden op actie;
2. evalueren van en waarde toekennen aan processen in de ‘actie-perceptie’-lus, waarbij emoties een flexibele interface vormen tussen de waarneming en het kiezen uit en starten van geschikte actieprogramma’s – hetgeen een interruptiefunctie inhoudt;
3. motiveren van de juiste actie, dat wil zeggen vaart erachter zetten en energie leveren.

Functies van emoties die zuiver T-bewust + niet-bewust zouden kunnen zijn:

4. communicatie van het probleem naar de omgeving, vooral soortgenoten, maar soms naar andere diersoorten (huisdieren of vogels die ons laten weten dat ze honger hebben);
5. beïnvloeden van de cognitieve processen en acties om die aan

te laten sluiten bij de geleidelijke verandering van de omstandigheden waarin het organisme verkeert.

Functies van emoties die E-bewust + T-bewust + niet-bewust zouden kunnen zijn:

6. sociaal bindmiddel, zoals tussen ouders en kind (ook de huilende voetballer of snikkende hoofdcommissaris op televisie vertederen en geven ons het gevoel van verwantschap)
7. faciliteren van leren, zodat de situatie en zijn oorzaak kunnen worden onthouden om in de toekomst de oorzaken van de emotie te kunnen vermijden (bij negatieve emoties) of zo mogelijk nog eens te veroorzaken (bij positieve emoties);
8. verlengen van de duur van de ervaring die bij de veelal kort durende emotieveroorzakende gebeurtenis hoort, zodat er tijd voor overdenken en leren ontstaat;
9. oproepen van geheugensporen (uit het episodisch geheugen) die bij de situatie horen, en zo selecteren van mogelijke oplossingen of herinneren van consequenties van vorige vergelijkbare situaties.

De hypothalamus is bij alle gewervelden de 'baas' van het homeostatische systeem en het hormoonstelsel (de neuro-endocriene regulatie) en speelt een belangrijke rol in de waardetoekenning aan externe en interne percepties. In elk geval bij alle zoogdieren hebben daarnaast de amandelkern (amygdala) en andere delen van het zogenaamde limbische systeem grote invloed. Bij primaten staan die basale schakelingen in verbinding met de orbitofrontale cortex (het net boven/achter de oogkas, de orbita, gelegen deel van de frontaalkwabben) en voor de visuele analyse met de temporaalkwab, vooral het onderste deel: de inferotemporale cortex IT (zie ook §5.4). Terwijl de diepere en oudere delen vermoedelijk de E-bewuste aspecten van de waarneming verzorgen, is in elk geval bij primaten voor de T-bewuste processen de verbinding met de orbitofrontale en inferotemporale cortex onmisbaar. Men moet natuurlijk niet uitgaande van primaten simplistisch terugredeneren en stellen dat dieren die geen of nauwelijks een orbitofrontale cortex of IT hebben, ook de daar bij primaten zetelende functies niet hebben (Bermond, 1996; Vroon, 1989). We kunnen de aan- of afwezigheid van functies en hun localisatie in het zenuwstelsel zeker niet ontdekken in een gedachtenexperiment, waarbij de cortex van primaten even wordt weggedacht! (Een vorm van de 'zombie-denkfout'.) Met het bijkomen van

nieuwe hersenstructuren of het ontstaan van nieuwe kernen blijven weliswaar veel oude functies op hun plaats, maar veel andere verschuiven en herorganiseren geleidelijk ter integratie met de nieuwe. Laten we dit met een voorbeeld verduidelijken. Vergelijken met een kikker vindt men bij de mens veel visuele functies in de visuele cortex, die bij de kikker in het tectum (homoloog van ons CS) te vinden zijn. De kikker heeft nauwelijks oogbewegingen, maar bij de mens speelt de CS (collucilus superior) bij de sturing van oogbewegingen een belangrijke rol. Ten opzichte van de kikker is bij de mens op die plek (tectum respectievelijk CS) de visuele perceptie op zich verdwenen, maar de sturing van de oogbewegingen is erbij gekomen.

De hersenen zijn fylogenetisch veel plastischer dan velen denken. Universeel nuttige functies, zoals zien of tasten, maar mogelijk ook *E*-bewustzijn, vele emoties en gevoelens, vindt men op verschillende plaatsen in de diverse soorten zenuwstelsels van de diverse afstammingslijnen terug. Wat in de ene afstammingslijn naar achteren of onder schuift, schuift bij de andere naar voor of boven. Alleen via zorgvuldige, vergelijkend anatomische en vergelijkend neurobiologische studies kan men hier tot redelijke uitspraken komen. Helaas zijn die uit de mode (ondanks het enorme gat dat hier in de wetenschappelijke markt ligt). Het levert nu eenmaal geen onderzoeksgeld en geen status meer op zulk minutieus geduldwerk te doen waar geen industrie op zit te wachten. Verblinde politici roepen overal ter wereld om 'maatschappelijke relevantie' van het onderzoek en bedenken 'top-down' waaraan men mag werken als men onderzoeksgeld nodig heeft. Bewustzijnsonderzoek of vergelijkende neuro-anatomie of neuro-ethologie behoren zeker niet tot de uitverkoren thema's.

In 1954 implanteerde Jim Olds een electrode in een deel van het limbische systeem, het septum, van een rat (per ongeluk, hij mikte op de reticulaire formatie). Na herstel van de rat stimuleerde Olds elektrisch via de electrode, terwijl de rat rondliep in zijn kooi. Het dier keerde snel terug naar de plek waar hij was toen de stimulus kwam en dat bracht Olds op het idee het dier een pedaal voor zelfstimulatie te geven. De rat stimuleerde zichzelf al spoedig zo'n 5000 keer per uur, at niet meer en dronk niet meer zolang hij kon stimuleren. Het dier was bereid over ijzeren stangen te lopen die onder vrij hoge elektrische spanning stonden, alleen om de stimulatiesleutel te bereiken. De rat was duidelijk verslaafd

aan elektrische stimulatie van wat men het 'beloningssysteem' is gaan noemen.

Het is gebleken dat dit beloningssysteem een groep cellen betreft, de A10-groep in het tegmentum, die met dopamine als neurotransmitter werken en vezels projecteren via het septum naar de nucleus accumbens. Heroïne, morfine en andere opiaten werken direct op de A10-cellen in, en cocaïne en amfetamine werken op het andere einde van de keten in de nucleus accumbens.

Op vergelijkbare wijze is gebleken dat de 'straf'neuronen met benzodiazepine-receptoren werken, waarop rustgevendende drugs als barbituraten en benzodiazepines remmend lijken te werken. Kortom, de positieve en negatieve labels aan ervaringen worden kennelijk geleverd door neuronen die bij een bepaalde diersoort een zeer specifieke locatie hebben en een zeer bepaalde neurotransmitter gebruiken. Ze zijn direct en specifiek chemisch aanspreekbaar. We zien hier één van de grote voordelen van de natuurwetenschappelijke aanpak. Die dwingt tot zeer specifieke theorieën en tot toetsen, wat leidt tot kennis die werkt, bruikbaar is en altijd anders dan men via contemplatie zou hebben vermoed. De betreffende neurotransmitters (zoals dopamine) van het waardetoekeningssysteem komen overigens (zover bekend) in alle zenuwstelsels voor, ze zijn fylogenetisch ongeveer zo oud als zenuwstelsels.

Het lijkt me in dit verband niet toevallig dat een fylogenetisch zo oude structuur als de hypothalamus aan het hoofd staat van de homeostatische regelsystemen. Dieren met relatief geringe autonomie zijn sterk aan hun leefomgeving gekoppeld en daarbij zijn de eenvoudigste en oudste waardelabels van vitaal belang. Bij verschijnselen als honger en dorst, copulatie en agressie speelt de hypothalamus een hoofdrol en veel van de bijbehorende gedragingen kunnen door elektrische stimulatie van de hypothalamus worden opgewekt (zie bijvoorbeeld Jürgens, 1974). De hypothalamus stuurt ook de hormoonsystemen die boodschappen over de beslissing om te vechten, vluchten, copuleren, eten of drinken via de bloedbaan door het hele lichaam verspreiden. Het wordt tegenwoordig waarschijnlijk geacht dat de hormonale boodschap aan alle lichaamsdelen die hem kunnen ontcijferen (metafoor: radiobERICHT) de evolutionaire voorloper is van neuronale signalering van zenuwcel tot zenuwcel (metafoor: telefoongesprek). Bepaalde eenvoudige hormonen, de neuropeptiden, dienen dan

ook zowel in het zenuwstelsel, als in de darmen of gonaden als boodschapper.

Dat dit soort stoffen grote universaliteit in levende systemen heeft, vroeg in de evolutie is ontstaan en een rol heeft gekregen, is dan ook zeker relevant voor de vraag naar de oorsprong van gevoelens, waardetoekenningen, homeostase en daarmee mogelijk van het *E*-bewustzijn. De orbitofrontale en inferotemporale cortex projecteren via de amandelkern (amygdala) op de hypothalamus en men ziet de amygdala dan ook wel als de sensorische poort naar de emoties. Zo'n baan zou men verwachten voor het koppelen van de *T*-bewuste en *E*-bewuste processen. Het is natuurlijk nog wat te vroeg om dit soort speculaties erg serieus te nemen, maar omdat er de laatste jaren internationaal intensief onderzoek gaande is (helaas niet in vergelijkend perspectief) naar het limbisch systeem, de hypothalamus, amygdala en andere verwante hersendelen, zoals de hippocampus, kan men in elk geval belangrijke vorderingen verwachten.

5.4 Cognitie, bewustzijn en hersenprogramma's

5.4.1 Zelfkennis en zelfbewustzijn in het dierenrijk

Homeostase verzorgd door hersenstam, hypothalamus en het autonome zenuwstelsel leidt tot motivatie van gedrag en tot waardetoekening in het kader van die actuele motivaties. Dit alles is op het individu betrokken, het zijn persoonlijke (individu-interne) processen. Als deze homeostatische processen bij bepaalde diersoorten een gezamenlijke *E*-bewuste component hebben, ligt het in de rede die component als het ik-gevoel te zien. Daarnaast zijn er gevoelens (of niet-bewuste aandrijvingen) als honger, dorst, seksuele behoefte en dergelijke, die mogelijk in dit basale waardetoekeningssysteem hun oorsprong vinden en naast de ruwe gevoelswaarde (*E*-bewust) ook inhoudelijke aspecten kunnen omvatten (niet-bewuste en *T*-bewuste processen). Die uit zich onder andere in de attentiesturende vermogens van het homeostatische systeem. Een dier dat honger heeft gaat op zoek naar voedsel en houdt daartoe zoekbeelden klaar die de kans op herkenning van voedsel verhogen. Ook deze zoekbeelden zijn persoonlijk en mede bepaald door de ervaringen van het individu: dit vind ik niet lekker, daar wordt ik ziek van, dat eet ik graag. (In alle beschrijvingen van deze aandrijfkraften bij de mens komt het woord 'ik'

voor.) Dat er een ruwe vorm van zelfbewustzijn, ik-kennis, aan deze processen verbonden is, lijkt me bijna triviaal. Ieder organisme heeft een eigen profiel van voorkeuren, motivaties, conditioneringen met betrekking tot dit basale aandrijvende systeem. Welke hersenprogramma's een dier in dit kader gebruikt en welke parameters in die programma's worden ingesteld, hangt mede van actuele proprioceptieve en exteroceptieve informatie af.

Alle dieren hebben een enorme hoeveelheid zelfkennis, geheel of grotendeels niet-bewust, maar wel altijd effectief. Dieren vallen zelden of nooit soortgenoten aan die significant sterker zijn. Ze zijn kennelijk in staat hun kracht perceptueel te vergelijken met die van een ander. Overal waar competitie in het geding is, moet vergelijking tussen het individu en 'de ander' een rol spelen en moet het individu dus zelfkennis hebben en tot zelfwaarneming in staat zijn om de uitkomst te kunnen evalueren of voorspellen. Nog triviale lijkt op het eerste gezicht de zelfkennis die in het zenuwstelsel vastligt over de lichaams grootte, de oogafstand, de staartlengte, geweigrootte en wat al niet. Zonder zulke (impliciete) zelfkennis kan een dier niet veilig door een bos lopen, geen afstanden schatten of obstakels omzeilen, geen voedsel ophappen of sex bedrijven.

Dieren die jeuk hebben, weten feilloos de plek te vinden waar het jeukt. De kat kan tijdens het schoonlikken precies onthouden waar ze gebleven is. Een leeuw zal bij het verslinden van een prooi die tussen zijn voorpoten ligt, nooit een hap uit zijn eigen bebloede voorpoten nemen. Het zenuwstelsel bevat dan ook de nodige 'kaarten' waarin zulke lichaamsinformatie geordend bijeen ligt en die worden bijgewerkt bij groei of beschadiging van het dier. Natuurlijk betreft dit alles voor een groot deel reflexen, die door zelforganisatie, dankzij postnatale plasticiteit, ontogenetisch afgestemd zijn geraakt op de feitelijke lichamelijke structuur van het individu. Als de oorafstand toeneemt omdat het hoofd groeit, moet het richtinghoren opnieuw gekalibreerd worden en zo geldt dat analoog voor alle sensorische systemen.

Proprioceptie omvat ook lussen door de omgeving, zoals Gibson (1966) effectief betoogd heeft. Bij visueel geleid gedrag stelt een dier via het optische-stroomveld vast of het tussen twee obstakels door kan rennen of niet, of het over een sloot kan springen of niet en zo ja waar en wanneer afgezet moet worden. Het visuele systeem rapporteert zo van moment tot moment de situatie van het dier in relatie tot de omgeving en is in die functie niet anders

van aard dan bijvoorbeeld zwaartekrachtorganen, die vertellen in welke stand het lichaam staat ten opzichte van het aardoppervlak. Zodoende dragen niet alleen de gewrichtsreceptoren, peeslichaampjes of spierspoelen en andere 'erkende' proprioceptoren bij aan de houdingsreflexen, maar ook het visuele systeem of evenwichtsorgaan. Omgekeerd dragen de klassieke proprioceptoren bij aan exteroceptie (waarneming van objecten en gebeurtenissen buiten het lichaam), bijvoorbeeld bij het op de tast herkennen van een voorwerp of bij het beschikbaar maken van oogstandinformatie tijdens interpretatie van visuele scènes.

Het totale zelfkennispakket omvat dus tenminste lichaamsvorm en kracht, gezondheidstoestand, houding en beweging, homeostase en voorkeuren, motivaties en emoties. Zelfkennis speelt bij allerlei vitale activiteiten een belangrijke rol en moet vrij universeel in het dierenrijk aanwezig zijn. De vraag daarbij is: welk deel van het zelfkennispakket ondersteunt alleen niet-bewuste processen, welk deel *E*-bewuste en/of *T*-bewuste processen? Voorzover er een *E*-bewustzijn is in relatie tot het zelfkennispakket, zou dat een ruw (oningeruld) 'ik'-gevoel kunnen zijn. Voorzover daarnaast ook *T*-bewustzijn een rol speelt kunnen er complexere vormen van zelfbewustzijn ontstaan. Immers *T*-bewustzijn hebben we voorlopig gedefinieerd als het beschikbaar zijn van gegevens over hersenprocessen voor expliciet denken, voor argumentatie. Zodra 'ik'-gegevens een rol kunnen spelen in bewuste denkprocessen, kan het organisme een beeld (model) van zichzelf vormen en van zijn plaats in de natuur of in sociaal verband. Dat is wat men meestal met zelfbewustzijn bedoeld.

Impliciete zelfkennis is volgens deze redenatie één van de evolutionair oudste vormen van kennis en het lijkt dan ook niet ver gezocht een ruw ik-gevoel, een rudimentair zelfbewustzijn, te vermoeden bij zeer veel diersoorten. Vreemd genoeg druist zo'n conclusie in tegen vrijwel alles wat er over zelfbewustzijn in de literatuur kan worden gevonden. Vrijwel alle filosofische, psychologische en ethologische teksten beschrijven zelfbewustzijn als de hoogste en meest complexe vorm van bewustzijn, alleen voorbehouden aan hogere zoogdieren of uitsluitend aan de hogere primaten of zelfs alleen aan de mens. De logica achter deze gedachte is, dat men een voldoende complex model van de leefwereld en/of van sociale verbanden moet kunnen hanteren om behalve andere individuen ook het 'ik' te kunnen 'plaatsen' in die modellen. Zo stellen Kitchen e.a. (1996, p.7408) bijvoorbeeld dat zelf-

bewustzijn het vermogen is om onderwerp van eigen attentie te worden en zo bewust te zijn van het feit dat men bewust is. Ze zeggen even later: “*Being the highest level of consciousness, there is the phylogenetic question as to when it emerged.*” Hun definitie van zelfbewustzijn lijkt me alleen verdedigbaar als we als (antropomorf) model de meest complexe vormen van zelfreflectie nemen, waartoe de mens in staat is en waarbij talige processen voor interne redentatie van groot belang zijn. Meer in het algemeen moet echter ook zonder taal zelfbewustzijn zeer goed mogelijk zijn, onder andere omdat beelddenken even effectief kan zijn en soms zelfs effectiever dan taaldenken. Het uitgangspunt van de universele noodzaak tot (al of niet bewuste) zelfkennis suggereert dat zelfbewustzijn even goed gradueel met autonomie en cognitieve vermogens toegenomen kan zijn als andere vormen van bewustzijn. Het zou in dat geval zeker niet per se de ‘hoogste vorm van bewustzijn’ hoeven te zijn.

Een dier dat in een groep ‘carrière’ wil maken moet over een uitgebreid arsenaal aan sociale vaardigheden beschikken, en strategieën ontwikkelen die in complexiteit niet of nauwelijks onderdoen voor die bij de mens. Een autonoom niet-sociaal dier moet zijn ruimtelijk gedrag zeer goed plannen om aan voedsel en drank te komen, niet opgegeten te worden en dergelijke. Zo’n leven is complex genoeg om te verwachten dat zeer vele hersenprogramma’s naast elkaar (parallel) en na elkaar (sequentieel) moeten worden gestart en gestopt, dat interrupts en waardetokenningen een rol moeten spelen, dat er een soort bedrijfssysteem moet zijn (zie later) dat dit alles bijhoudt. In zo’n geval lijkt me een met de autonomie evenredige hoeveelheid *T*-bewuste processen nodig, bijeengehouden door ‘ik’-betrokken (*E*-bewuste) gevoelens. Kortom, ook hier opteer ik voor het model van gradueel met de autonomie toenemende vormen van zelfbewustzijn, waarbij de meest rudimentaire vormen (vooral *E*-bewuste aspecten, de kale ik-gevoelens) al heel oud zouden kunnen zijn.

Pas wanneer diersoorten beschikken over complexe vormen van beelddenken of taaldenken kan men het Droste-effect van bewustzijn verwachten: ik ben me bewust van het feit dat ik me bewust ben van mijn bewustzijn, enzovoorts. Dat alles lijkt me dan bijna letterlijk ‘bespiegeland’ in plaats van nuttig voor de levenskansen te worden. Hier lijkt de evolutie aangedreven te zijn door andere zaken dan de waarde van het reflexieve zelfbewustzijn. Het nut van taal voor communicatie en denken heeft als nevenef-

fect, als epifenomeen, dat symbolische modelvorming ook over onszelf mogelijk wordt en dat het genoemde Droste-effect van zelfbewustzijn op kan treden. Menselijk reflexief zelfbewustzijn lijkt me daarom eerder pathologische trekjes te hebben. Dit zou dan analoog zijn aan de evolutie van enorme geweien van elanden, die overduidelijk het lopen en manouvreren bemoeilijken, maar geëvolueerd zijn dankzij het feit dat ze de mannetjes aantrekkelijker voor de vrouwtjes maken en dus de voortplanting langs die weg bevorderen (Gould, 1977).

In de Engelse literatuur wordt vaak het woord ‘aware’ of ‘awareness’ gebruikt voor een soort zwakke vorm van bewustzijn, die dicht ligt bij attentie, merken, gewaarworden. Echter in het Nederlands hebben we slechts één concept bewustzijn, zodat ‘awareness’ en ‘consciousness’ in Nederlandse vertaling synoniemen zijn. Het is leerzaam vanuit die positie te kijken naar pogingen om bewustzijn te definiëren in het Engels, zoals die van McFarland (1985, p.23): “*Consciousness ... involves a propositional awareness that it is I who am feeling or thinking, I am the animal aware of the circumstances.*” Het is dan ook niet uitgesloten dat redenties over bewustzijn in het Chinees of Japans, Frans, Duits of Nederlands vergelijkbare cirkelredenties omvatten, die alleen herkend worden bij vertaling! In de geciteerde definitie zien we verder dat McFarland alle bewustzijn lijkt op te vatten als een uiting van zelfbewustzijn en daarbij vooral de *T*-bewuste aspecten (‘propositional awareness’) benadrukt. Hij vervolgt de geciteerde passage met de stelling dat perceptuele vormen van bewustzijn dan wel redelijk duidelijk zijn aangetoond bij dieren, maar dat het vermogen over de eigen acties te rapporteren, om acties van andere(n) te imiteren, of om zichzelf in de spiegel te herkennen “*need not necessarily require consciousness as defined here.*” Je zou dit in onze termen wellicht kunnen vertalen als zelfkennis bewijst nog geen zelfbewustzijn. Dat is natuurlijk waar, maar de vraag blijft of er testen bedacht kunnen worden die aantonen dat bij bepaalde dieren de zelfkennis niet totaal impliciet – dus niet-bewust – is, maar mogelijk ten dele expliciet – bewust. De markeer-en-spiegeltest van Gallup (1970) is in dit verband voorgesteld, verdedigd (Gallup e.a., 1995), en bekritiseerd (Heyes, 1994, 1995).

Chimpansees lijken zichzelf te herkennen in spiegels of spiegelende wateroppervlakken. Gordon Gallup onderzocht het ontstaan van dit vermogen en vond dat vele, maar niet alle, chim-

pansees na een dag of vier ophouden hun spiegelbeeld als een ander dier te beschouwen en de spiegel dan als hulpmiddel kunnen gebruiken om zichzelf te vlooiën. Hij ontwikkelde toen de volgende test. Een aantal dieren werden onder narcose voorzien van een lik kleurstof op een markante plaats, bijvoorbeeld hun wenkbrauw of voorhoofd. Als ze wakker worden geven ze er geen blijk van deze markeringen te bemerken, tot ze voor een spiegel komen te staan. Ze beginnen dan de gekleurde plek te wrijven in een kennelijke poging de kleurstof te verwijderen. Vele onderzoekers interpreteren dit als een uiting van zelfbewustzijn. Gallup vond soortgelijk gedrag bij orang-oetans, maar niet bij gorilla's (die evolutionair dichter bij de mens staan) en evenmin bij bavianen. De verklaring voor het mislukken van de Gallup-test bij gorilla's zou kunnen zijn dat elkaar aanstaren bij die dieren als een daad van agressie wordt opgevat, zodat ze misschien niet de tijd nemen goed naar zichzelf te kijken in de spiegel.

Hauser e.a. (1995) rapporteren dat ook de tamarin (Zuid-Amerikaans zijdeaapje) vergelijkbaar zelfherkenningsgedrag voor een spiegel vertoont, maar in tegenstelling tot Gallup en medewerkers vinden ze dit geen voldoende test voor het bestaan van zelfbewustzijn. Kitchen e.a. (1996) lieten 6 vrouwelijke chimpansees kijken naar lachspiegels die het spiegelbeeld vervormen of veelevoudigen. De dieren vertoonden het correcte zelfreferentiegedrag en konden dus kennelijk met de vervormingen omgaan. De onderzoekers suggereren dat dit vooral te danken zou zijn aan de causale samenhang tussen zelfbeweging en spiegelbeeldbeweging.

Heyes (1994, 1995) heeft het werk op dit gebied, maar vooral het werk van Gallup en medewerkers, bekritiseerd. In de eerste plaats vindt ze het onderzoek methodologisch niet betrouwbaar. Ze stelt dat door een spiegel geleide lichaamsinspectie en zelfherkenning wellicht ooit bij een aantal primatensoorten betrouwbaar aangetoond zal worden, maar dat de bekritiseerde onderzoeken daarin nog niet geslaagd zijn. Daarnaast vindt ze dat zelfs als zelfherkenning in de spiegel valide aangetoond zou zijn, het nog niets zou zeggen over zelfbewustzijn of het hebben van een zelfconcept.

Dit lijkt me niet de plaats om de discussie in detail te bespreken en partij te kiezen. Wie de spiegeltest accepteert als noodzakelijk en voldoende voor de aanname van zelfbewustzijn, kan concluderen dat alleen sommige primatensoorten zelfbewustzijn hebben.

Een gradualist, die zoals ik meent dat zelfbewustzijn in vele gradaties voorkomt en gradueel geëvolueerd is, zal de test wellicht als suggestief, maar niet als noodzakelijk zien. Dieren die niet slagen voor de Gallup-test, zoals katten of olifanten, zouden best een vorm van zelfbewustzijn kunnen hebben, al zal die zeker anders zijn dan bij primaten. De Gallup-test kan bovendien niet gemakkelijk worden toegepast bij blinde dieren (of mensen!) en die kunnen we toch moeilijk a priori als niet-zelfbewuste organismen beschouwen. Het is jammer dat er voor onderzoek aan zelfbewustzijn nog geen behoorlijke natuurwetenschappelijke ingang gevonden is, zoals dat bijvoorbeeld voor visuele attentie en visueel bewustzijn wel het geval is. Aan de andere kant levert dit een interessante uitdaging voor toekomstige onderzoekers.

Het onder biologen vrij algemeen verbreide idee dat cognitie, emotie en bewustzijn fylogenetisch gradueel ontwikkeld zijn, noem ik korthedshalve gradualisme. In het voorgaande heb ik er diverse argumenten voor aangedragen. Men moet het gradualisme natuurlijk niet antropomorf opvatten en menen dat van alle leuke eigenschappen automatisch bij mensen de hoogste trap van ontwikkeling, de grootste perfectie is bereikt. Het zou kunnen zijn dat emoties in andere afstammingslijnen tot verdere ontwikkeling gekomen zijn dan bij ons, dat (om maar iets te noemen) bruinvissen hogere ethische standaarden, walvissen betere geheugens, bevers beter beelddenken, ratten een intenser ik-gevoel hebben. We weten dat niet en het is onderwerp van biologisch onderzoek. Het gradualisme houdt zich gewoon aan de evolutietheorie vast en gaat niet uit van het idee dat de mens het ultieme eindpunt van de evolutie is, een unicum onder de dieren. Dat betekent niet dat de mens geen unieke eigenschappen heeft (zoals onze taal, handen, cultuur), maar dat ook andere dieren unieke eigenschappen hebben en dat die eigenschappen tot stand gekomen zijn door adaptatie, door zelforganiserende interactie tussen organisme en habitat. Met de term gradualisme wil ik zeker niet de suggestie wekken dat soortvorming altijd met een constante lage snelheid is gegaan of gaat. Het is voldoende aangetoond dat er zowel spurts als perioden van geringere veranderingen zijn geweest. Gradueel betekent niet dat versnellingen en vertragingen afwezig waren, maar dat de verandering van organismen in relatief kleine stapjes per generatie moet plaats vinden, relatief kleine variaties op het basisthema. Bij catastrofes in de leefwereld gaat de evolutie snel door uitsterven van soorten en herverdelen van niches, zodat

series kleine veranderingen kunnen accumuleren die normaal diffuus over de populatie verdeeld zouden zijn gebleven. Men ziet dit soort versnellingen bij fokken van dieren, waarbij de variaties niet meer als ‘random’-walk door de ruimte van mogelijkheden bewegen, maar aaneen worden geregen door de mens die selecteert en zo richting geeft. Bij de overgang in enkele honderden tot duizenden jaren naar een ijstijd of juist terug naar een gematigd klimaat treedt de omgeving als ‘fokker’ op.

Gradualisme houdt in dat er onbevangen biologisch onderzoek nodig is naar de evolutie van allerlei aspecten van cognitie, emotie, bewustzijn en zelfbewustzijn in alle afstammingslijnen. Wie cognitie, emotie en bewustzijn wil begrijpen, moet zich niet tot de mens beperken, zoals de meeste theologen, filosofen, psychologen, linguïsten en medici doen.

5.4.2 *Niet-bewuste versus bewuste hersenprogramma's*

Sommige hersenprogramma's ondersteunen bewuste processen, andere lijken geheel niet-bewust te werken. Voor het visuele systeem hebben we gezien dat er een zeer groot aantal gespecialiseerde ‘hogere-orde’ gebiedjes is. Men zou dus kunnen vermoeden dat die gebiedjes ieder één of een klein aantal gespecialiseerde hersenprogramma's bevatten of ondersteunen. Het zou volgens het voorafgaande zelfs zo kunnen zijn dat er aparte bewuste en niet-bewuste programma's zijn die onderling informatie uitwisselen. Dat zou onder andere verklaren hoe het komt dat kennisbrokken of gedachten vaak al geheel uitgewerkt zijn als we ons ervan bewust worden. Als we ons een naam niet kunnen herinneren, leggen we als het ware bewust dat probleem voor aan een niet-bewuste module, die aan het werk gaat om de gegevens te reconstrueren uit geheugeninformatie. Soms uren of dagen later wordt het resultaat gemeld aan het bewuste hersenprogramma dat de vraag gesteld had en de naam ‘schiet ons te binnen’.

We nemen aan dat hersenprogramma's ten eerste *plaatsgebonden* zijn (niet vrij verplaatsbaar zoals computerprogramma's), ten tweede *zelforganiserend* zijn (niet door een externe programmeur voor externe doeleinden gemaakt) en ten derde grotendeels *parallel* werken. We moeten ze dus zeker niet verwarren met computerprogramma's (§1.4). De ingeslepen metafoor ‘computerpro-

gramma' is feitelijk onjuist, omdat een hersenprogramma een 'plan voor actie' is en computers geen eigen plannen voor actie ontwikkelen. Dat doen de programmeurs en eigenlijk zijn computerprogramma's dus mensprogramma's die met behulp van de computer, een gereedschap, worden uitgevoerd. Hersenprogramma's zijn plannen voor actie van en opgebouwd door het zelforganiserend hersensysteem zelf in de vorm van vast gelocaliseerde neuronale schakelingen. Als we dat verschil goed in de gaten houden, dan kunnen we wel wat leren van de ervaring met computerconstructie.

Zo vereist een geordende complexe organisatie als de computer een bedrijfssysteem (operating system), dat bijhoudt wat er gebeurt en regelend optreedt bij competitie voor ruimte in geheugen of verwerkingseenheid. Als in de toekomst goed werkende parallelle computers worden geconstrueerd, zal men vermoedelijk nog complexere bedrijfssystemen nodig hebben. Die systemen moeten het verkeer van gegevens en de verdeling van taken tussen parallel lopende programma's regelen. Om dat zinvol te doen moeten ze inzicht in de totale taakstelling ontwikkelen en autonoom effectieve taakverdelingen kunnen opstellen. Zulke bedrijfssystemen voor parallelle computers zouden wel eens minder autoritair kunnen zijn dan de huidige systemen, die harde beslissingen nemen aan de hand van preciese regels en prioriteiten. Bij parallelle computers zou 'overleg' met en tussen de modules en een voortdurende evaluatie van onderhandelingsresultaten, een soort democratie, wel eens belangrijk kunnen worden.

Een kenmerk van elk bedrijfssysteem is dat het geen toegang heeft tot de interne mechanismen van de verschillende programma's. Het krijgt alleen signalen, gegevens, toegevoerd (bijvoorbeeld module x is klaar, het resultaat is y ; of module n wacht op gegevens van module m). Naar analogie kan men voor het bedrijfssysteem van de hersenen iets dergelijks verwachten. In tegenstelling tot de situatie bij computers is er dan echter geen team van externe systemen, programmeurs, die het bedrijfssysteem ontwikkelt, en geen ander team van experts, operateurs of gebruikers, die het systeem afstemt op de gebruiksdoelen en taken. Het bedrijfssysteem van het zenuwstelsel is het 'ik' met de eigen stijl van taakverdeling en probleemoplossen, dat door leren met straf en beloning zichzelf programmeert en meewerkt aan de ontwikkeling van andere taakspecifieke hersenprogramma's.

Veel van wat we over het bedrijfssysteem hebben gezegd doet denken aan bewuste processen. Een bedrijfssysteem moet actie-

programma's kunnen onderbreken in geval van urgentie om meer resources aan noodprogramma's te kunnen geven. Een voorbeeld hiervan is de interruptfunctie die we bij pijnreacties noemden. Het bedrijfssysteem moet kunnen interpellieren en ondervragen: hoe staat het ermee module x, bijna klaar, zijn er al tussenresultaten? Bewustzijn zou dus specifiek gebonden kunnen zijn aan alle of sommige acties van het bedrijfssysteem. Dat lijkt op de suggestie van Armstrong (§4.1.2) dat het bewustzijn een soort aftastmechanisme zou zijn dat de rest van de hersenen in de gaten houdt. Alleen verwachten we van een bedrijfssysteem complexere functionaliteit dan 'in de gaten houden', het moet ook ingrijpen en regelen. Het bedrijfssysteem van de hersenen is vermoedelijk hels ingewikkeld en zelf weer modulair opgebouwd. Een vraag die Baars (1993) in dit verband opwerpt, is hoe een coherente geïntegreerde enkelvoudige stroom bewuste ervaringen kan voortkomen uit een zenuwstelsel dat grotendeels niet-bewust werkt, informatie gedistribueerd en parallel verwerkt, en een enorme capaciteit heeft. Er lijken duidelijk systemen met beperkte capaciteit een rol te spelen in de seriële processen van het bewustzijn.

We kunnen maar aan één taak tegelijk behoorlijke aandacht schenken en als we twee dingen tegelijk proberen te doen die aandacht vereisen, doen we ze om en om. Goed geleerde vaardigheden worden als het ware geautomatiseerd en vereisen geen aandacht meer, zolang er niets bijzonders gebeurt. Je kunt dan meerdere dingen tegelijk doen, zoals autorijden (automatische handelingen) en een gesprek voeren (vereist aandacht). Zodra echter in het verkeer moeilijke situaties optreden, stukt het gesprek. Met aandacht lezen en tegelijk met aandacht een gesprek voeren lukt niet, tenzij je alternerend een zin leest en een zin spreekt. Iets dergelijks geldt voor het werkgeheugen. We kunnen een telefoonnummer in gedachten houden terwijl we naar het apparaat lopen, maar het is moeilijk meerdere nummers in het werkgeheugen te houden. Men zegt wel dat er maximaal 'zeven plus of min twee' gegevens in het werkgeheugen kunnen worden gehouden. Dat is dus duidelijk een capaciteitsbeperking. Het langetermijngeheugen kan natuurlijk wel vreselijk veel meer bevatten en lijkt zelfs bijna onbegrensd, maar om er iets in vast te leggen, moet dat iets weer door de flessehals van de aandacht. Tijdens het leren van een nieuwe vaardigheid vereist iedere deeltactie aandacht en gaat alles traag en stap voor stap, maar zodra het gehele proces voldoende geoefend is, ingeslepen geraakt oftewel geautomatiseerd, verloopt

het vlot en buiten het bewustzijn om, terwijl je er andere dingen naast kunt doen. Dit alles suggereert dat vaardigheden en kennis die permanent zijn vastgelegd, zijn geautomatiseerd, onbewust werken en door niet-bewuste parallele processen gebruikt kunnen worden. Bewuste processen die aandacht vereisen zijn daarentegen traag, hebben een beperkte capaciteit en verlopen serieel, na elkaar. Tijdens de leerfase wordt een nieuw hersenprogramma ontwikkeld door of met behulp van het bedrijfssysteem. Als het klaar is hoeft het alleen nog maar op tijd gestart en gestopt te worden door het bedrijfssysteem en werkt het verder relatief autonoom.

Baars (1993) stelt een enigszins ander model voor dan mijn 'bedrijfssysteem', namelijk het 'globale werkruimte'-model. Het is een uitwerking van eerdere ideeën van Baddeley, die een model ontwierp voor het 'werkgeheugen met beperkte capaciteit'. Volgens Baddeley zijn er een soort visueel-ruimtelijk schetsboek en een fonologische lus, die tezamen het werkgeheugen vormen. In het schetsboek kun je een beeld vasthouden, in de fonologische lus bijvoorbeeld het eerder genoemde telefoonnummer. Baddeley vond in verder onderzoek echter interferentie tussen deze twee soorten gegevens in het werkgeheugen, wat leidt tot het voorstel van Baars dat er een soort globale werkruimte zou zijn, waar allerlei specialistische modules even iets neer kunnen zetten en iets uit kunnen halen. Die globale werkruimte is geassocieerd met bewustzijn. Dezelfde gegevens kunnen bewust (in de werkruimte) of onbewust (elders) voorkomen en dan is het verschil bewustzijn 'op zich'. Anderzijds kan men verschillende bewustzijnsinhouden onderscheiden en de overgang daartussen wordt bepaald door 'attentie' (aandacht). Attentie is dus volgens Baars een specifiek aspect van bewuste processen, namelijk de keuze van inhouden. Dit betekent in onze eerdere terminologie, dat attentie en *T*-bewustzijn nauw samenhangen of misschien wel geheel of gedeeltelijk hetzelfde zijn. Volgens Baars is een globale werkruimte een noodzaak bij de samenwerking van verschillende expertsystemen, zoals de verschillende hersenprogramma's. Ook in mijn 'bedrijfssysteem'-model (metafoor?) is het natuurlijk nodig een interne verkeersregeling te hebben met uitwisseling van gegevens tussen hersenprogramma's. Dat zou al of niet een soort globale werkruimte kunnen vereisen.

Weer een ander model is dat van Gray (1995), die postuleert dat de

inhoud van bewustzijn (de *T*-bewuste processen) overeenkomt met de output van een vergelijkingssysteem (comparator). Deze comparator heeft tot doel op een continue tijdschaal bij te houden wat het verschil is tussen de feitelijke gebeurtenissen in organisme en habitat enerzijds en de verwachtingen opgesteld door het zenuwstelsel anderzijds. Alles wat gaat zoals verwacht blijft dus buiten het bewustzijn, afwijkingen worden 'opgemerkt'. Het aantrekkelijke van dit voorstel is, dat het inderdaad de afwijkingen van de verwachting moeten zijn die onze aandacht trekken, die beslissingen vereisen over de voortgang, die onthouden moeten worden. Het model verklaart ook op natuurlijke wijze het introspectieve gegeven van een continue stroom bewuste gebeurtenissen. Toch lijkt me ook hier weer dat de comparatorfunctie typisch een evaluatiefunctie van een bedrijfssysteem zou kunnen zijn, maar niet het hele bedrijfssysteem omvat. Kortom, het idee dat bewustzijn sterk gerelateerd is aan de acties van een bedrijfssysteem lijkt me algemener en het biedt ruimte aan zowel het model van Gray als aan dat van Baars.

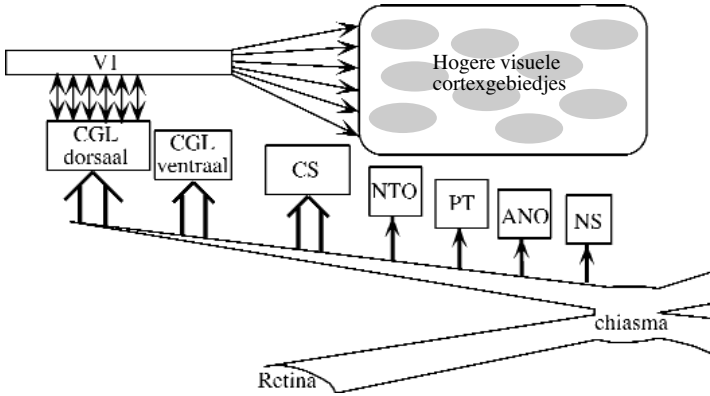
Daniël Dennett en Marcel Kinsbourne (zie bijvoorbeeld Kinsbourne, 1993) hebben een alternatieve opvatting ontwikkeld. Ze vinden dat ieder model dat ervan uitgaat dat ergens in de hersenen, op concrete plek *x*, en/of op een bepaald concreet moment *t* na een externe gebeurtenis bewustzijn 'ontstaat', impliciet een homunculus aanneemt die de betreffende transformatie van hersenactiviteit naar bewustzijn daar en dan bewerkstelligt. Ze zien hierin de reïncarnatie van de pijnappelklier van Descartes. Hun alternatief is dat bewustzijn het product is van een enorm verspreid voortdurend veranderend samenwerkingsverband tussen afzonderlijke modules ('experts', verantwoordelijke 'autonome agenten'). Zo'n samenwerkingsverband is een 'draft' (mogelijke schets) van het gerepresenteerde. Ze postulieren een voortdurende competitie tussen de verschillende samenwerkingsverbanden (drafts) voor dominantie (bepaling van de bewustzijnsinhoud): het 'multiple drafts'-model. Er is dus volgens Dennett en Kinsbourne nòch een concrete plaats nòch een concrete tijd aan te wijzen waar bewustzijn 'ontstaat' en dus geen homunculusprobleem.

Ik denk dat dit model in de eerste plaats niet echt compatibel is met de bevindingen van hersenonderzoek, de bevindingen bij patiënten met blindzien bijvoorbeeld suggereren overtuigend dat bewustzijn localiseerbaar is. Ten tweede vecht het wat te krampachtig tegen de geest van Descartes, tegen diens pijnappelklier en

de homunculus. Dennett en Kinsbourne willen vermijden dat in hun theorie een idee insluit van een ‘Cartesiaans theater’, een gebied waar alles wat er arriveert oftewel ‘speelt’, bewust wordt, als het ware bekeken door een homunculus, de theaterbezoeker. Dit lijkt een echte Descartes-fobie en niet een verbetering ten opzichte van de al genoemde modellen. Immers, of het nu honderden samenwerkende modules op onbestemde plaatsen zijn die op onbestemde momenten de overhand krijgen, of één bepaald bedrijfssysteem met uitlopers door het hele zenuwstelsel, maar met een bepaald anatomisch zwaartepunt of een bepaalde biochemische identiteit: in beide gevallen ‘ontstaat’ bewustzijn uit hersenactiviteit. Het probleem is en blijft hetzelfde, er zijn twee aspecten van hersenactiviteit, die welke we van binnenuit ervaren en die welke de externe waarnemer kan meten.

Laten we terugkeren tot concreet hersenonderzoek aan het visueel systeem om te zien of bewuste processen al of niet modulair zijn en hoe het met de localiseerbaarheid gesteld is. Ik volg daarbij in grote lijnen een recent overzicht door Petra Stoerig (1996) aangevuld met eigen inzichten (Van de Grind, 1984). Figuur 26 illustreert hoe het netvlies projecteert op verschillende stations in middenhersenen en cortex (Van de Grind, 1984). De eerste aftakking gebeurt vlak na de kruising (het chiasma) van de optische zenuwen (zie ook figuur 17). Die eerste aftakking gaat naar een kerntje van de hypothalamus dat nucleus suprachiasmaticus heet (NS in figuur 26). Dit kerntje is van belang voor ons dag-nacht ritme. De lichtinformatie die daar arriveert stuurt onder andere de melanineproductie en geeft bij ochtend een synchronisatiesignaal aan onze biologische klok in de hypothalamus (het centrum voor neuro-endocriene regulatie). Alleen als er absoluut geen werkende cellen meer in het netvlies zitten of er geen ogen meer zijn, is dit signaal afwezig en zal de blinde ook slaap-waakritmestoringen hebben. Als een beschadiging of lesie direct na dit eerste aftakpunt optreedt zal het dag-nacht ritme normaal zijn, maar heeft de blinde geen pupilreflex of oogknipreflex bij fel licht. Dat komt omdat deze reflexen via kerngebieden lopen zoals het pretectum (PT), de nucleus van de tractus opticus (NTO) en de accessorische optische nucleus AON. Zit de lesie hoger, dus in de buurt van de aftakking naar CS, dan zijn deze reflexen intact, maar is de patiënt desondanks geheel blind. Zulke feiten maken het overigens mogelijk een diagnose te geven van de plaats van de lesie. Dat de betreffende ganglioncellen in het netvlies niet (retrograad) degenereren

door de hoger zittende lesie komt omdat het speciale retinale cellen zijn die de hypothalamus aansturen en de reflexen verzorgen, niet (of nauwelijks) de eerder besproken *P*- en *M*-cellen. De verwerking van visuele informatie is dus zelfs in het netvlies al een parallel proces (Van de Grind, 1984)!



Figuur 26 Een sterk vereenvoudigd schema van de visuele banen vanaf de retina tot en met het corpus geniculatum en de primaire visuele cortex V1. Voor een vollediger schema en beschrijving zie Van de Grind (1984).

Lesies van het corpus geniculatum laterale (CGL, vooral het dorsale deel) en/of van VI leiden tot het verschijnsel blindzien in het corresponderende deel van het gezichtsveld, zoals we dat al uitvoerig bespraken (§5.3.4). Patiënten met éénzijdige lesies van dit type hebben in elk geval een hemianopie, dat wil zeggen dat ze in één gezichtsveld helft blind zijn. Immers, ook al kun je in het laboratorium ‘blindzien’ aantonen, toch zijn de patiënten blind wat het normale functioneren in die gezichtsveld helft betreft. Er is in dat halfveld geen bewust zien. Bij zo’n VI-lesie in beide hersenhelften tegelijk zou de patiënt waarschijnlijk totaal blind zijn, niets meer *bewust* kunnen zien. Voor dit geval is er natuurlijk een complicatie bij het gebruik van het woord ‘blind’, want er kan wel degelijk niet-bewuste visuele verwerking plaats vinden. Weiskrantz heeft bijvoorbeeld aangetoond dat er bij blindzien met éénzijdige VI-lesie ook een soort impliciete perceptie op kan treden. Zo kan een visueel waarschuwingssignaal in het blinde deel van het gezichtsveld de reactietijd op stimuli in het ziende deel van het ge-

zichtsveld verkorten. De niet-bewuste verwerking heeft daarbij dus wel degelijk causale invloed op het bewuste zien. Daarnaast hebben we al besproken hoe deze patiënten goed kunnen raden wat er in hun 'blinde' gezichtsveldhelft gebeurt. Er zijn geen patiënten gevonden met goed afgebakende lesies van alleen VI in beide cortexhelften tegelijk, die dus volledig op 'blindzien' aangewezen zouden zijn. Meestal is in geval van bilaterale beschadiging de lesie zeer uitgebreid en door ernstig trauma veroorzaakt, zodat visueel onderzoek met die patiënten zinloos zou zijn. De beschreven éézijdig geledeerde patiënten vertrouwden in het dagelijks leven op hun normale gezichtsveldhelft en tonen dus waarschijnlijk niet voldoende wat bij totaal (bilateraal) blindzien mogelijk zou zijn aan niet-bewust zien. Een aapje (Helen, van N.K. Humphrey) bijvoorbeeld dat wel aan die strenge (precies begrensde, chirurgisch gemaakte) bilaterale VI-lesievoorwaarden voldoet, vertoont nog aardig wat visueel geleid gedrag. Ze kan redelijk navigeren door een rommelige omgeving met obstakels en kan zelfs kakkerlakken en rozijnen oprapen en in de mond stoppen.

Laten we nu eens naar de volgende groep stations kijken. Wat gebeurt er als er een lesie na VI optreedt? Als slechts een beperkte deelverzameling van de al genoemde (40 of meer) gespecialiseerde visuele cortexgebiedjes beschadigd is, maar de overige nog gewoon werken en met VI verbonden zijn, is er in elk geval bij de mens sprake van bewust zien. Dat bewuste zien mist alleen bepaalde qualia. Welke qualia ontbreken hangt van het beschadigde gebiedje af. Stel dat V₄ en mogelijk enig omringend weefsel beschadigd is, dan mist de patiënt kleurenzien. Dit is 'corticale' kleurenblindheid, want de verschillende kleurreceptoren in het netvlies geven bij verschillende kleuren in de buitenwereld nog steeds een met de kleur verband houdend stimulatiepatroon aan de andere cortexgebiedjes af. Dat uit zich in het bewuste zien echter alleen in verschillende tinten grijs. Deze patiënten zien de wereld als een viezig vale zwart-wit film, maar zijn zich volledig van hun probleem bewust en zien overigens redelijk normaal.

Oliver Sacks (1995) heeft een goede beschrijving van dit verschijnsel gegeven in een opstel over het dramatische geval van een schilder, die door een ongeluk corticaal kleurenblind werd. De man was als schilder juist bekend om zijn opvallend kleurgebruik. Hij bleek een scherp waarnemer en rapporteur te zijn van zijn ervaringen vanaf het moment van verlies van zijn kleurenzien tot

het moment, vele maanden later, waarop hij uit de depressie kwam en in grijstinten begon te schilderen. Alle kleurqualia waren verdwenen en bleven verdwenen. Vandaar ook dat Stoerig (1996) deze vorm van corticale blindheid koppelt aan het verlies van qualia, die kennelijk vanuit de desbetreffende specialistische cortexgebiedjes verzorgd worden. Een ander indrukwekkend voorbeeld is de bewegingsblindheid, die al eerder ter sprake kwam bij lesie van gebiedje MT alias V5 (Grüsser en Landis, 1991). Zoiets is een veel ernstiger handicap dan kleurenblindheid, omdat het leven er zeer gevaarlijk door wordt. De beroemdste patiënte op dat gebied beschrijft hoe auto's op straat niet bewegen, maar wel ineens op een andere plaats blijken te zijn dan kort daarvoor. Het is angstaanjagend en normale omgang met de dynamische wereld is nauwelijks mogelijk. In een rustige vertrouwde relatief statische omgeving lijkt er echter visueel niet veel veranderd, het bewuste zien is op de bewegingen na normaal.

Treden er lesies op die verder van V1 aflaggen in de hiërarchie (hoger in figuur 23), dan is het gevolg een agnosie (in dit geval een specifieke visuele 'onkunde'). Bij de zogenaamde apperceptieve visuele agnosie ervaren de patiënten alle gebruikelijke qualia, maar ze kunnen geen objecten herkennen. De patiënt kan de beelden niet segmenteren en groeperen in voorgrond-achtergrond of object-versus-achtergrond en kan de visuele componenten niet bijeenvoegen tot object. Alle objectzien is verstoord, maar deze patiënten kunnen wel kleuren onderscheiden, randen en lijnen zien met een normale gezichtsscherpte, beweging waarnemen, enzovoorts. Zit de lesie nog wat hoger dan lukt het groeperen en objectzien wel, maar treden er veelal classificatieproblemen op. Dit wordt associatieve agnosie genoemd en daarbij zitten de lesies al een flink eind in de temporaalkwab. Een voorbeeld is prosopagnosie, gezichtsblindheid, wat eigenlijk een onvermogen is betekenis te hechten aan gezichten. Gezichten kunnen vaak wel onderscheiden worden, maar niet herkend, ook het eigen gezicht niet. Objectzien en objectherkenning zijn duidelijk gescheiden processen gebleken. Er zijn bijvoorbeeld patiënten die een object wel kunnen natekenen, maar niet herkennen. Vandaar dat Stoerig (1996) concludeert dat bewust zien tenminste drie onderdelen heeft, namelijk: (1) *fenomenaal zien* (qualia), (2) *groepering* van componenten tot objecten en de in hoofdstuk 4 besproken *voorgrond-achtergrond segregatie* (Gestalt-operaties, opbouwen visuele potentiaal), (3) herkennen, klassificeren, betekenis geven in het kader van

de eigen ervaring, kennis en intenties, oftewel de *visuele potentiaal relateren aan geheugeninformatie*.

Vanuit filosofisch oogpunt is in de publicatie van Petra Stoerig (1996) vooral interessant, dat de qualia op een relatief laag niveau in het bewuste zien geplaatst zijn. Veel filosofen zien de qualia als een soort geestelijk ‘toevoegsel’, een sausje dat over de perceptie gegoten wordt als alle visuele verwerking al compleet is. Mij lijkt de indeling van Stoerig zowel interessanter als beter onderbouwd. De visies op binoculair stereozien vertonen een vergelijkbare misvatting. Men meende tot begin zeventiger jaren vrij algemeen, dat eerst objecten en scènes werden herkend en dat daar vervolgens dankzij binoculaire dispariteit tussen de herkende objecten diepte aan werd toegevoegd (als een quale). Het bleek ook hier anders te liggen. Al direct in VI vinden we binoculaire cellen die dispariteitsinformatie verwerken tot een diepte-interpretatie, zonder zich ook maar iets van de preciese vormen en objecten aan te trekken. Ook in random-puntjesstereogrammen zien we de diepte die er door dispariteitsmodulatie in is gestopt. Stereo is een primair aspect van het zien, net als kleur en beweging, dus niet een post hoc constructie. Dispariteitsanalyse gaat, evenals bewegingsanalyse en kleuranalyse vooraf aan objectanalyse. Deze qualia lijken behulpzaam te zijn bij de segregatie en integratie van gegevens, het opbouwen en toetsen van objecthypothesen. Volgens Stoerig geldt dat dus voor alle qualia. Het is een interessant voorstel, dat zeer goed empirisch toetsbaar is en zeker tot allerlei ingenieuze experimenten aanleiding kan geven. Iets analoogs heb ik eerder betoogd voor de (*E*-bewuste) emotionele gevoelens, die me als ruwe gevoelens primitiever en primairder lijken dan de complexere ingevulde emoties. Als Stoerig gelijk heeft zou dat ook implicaties hebben voor qualia bij dieren, ongeacht of hun visuele (of andere sensorische) ervaringen nu in de cortex of in de middenhersenen worden verwerkt.

5.4.3 Visuele geheugenprocessen

Er zijn dus lesies in hogere visuele cortexgebiedjes mogelijk, waarbij een object als geheel, als Gestalt, gezien wordt, maar niet herkend. Dit duidt op een storing in de koppeling tussen hersenprogramma's voor objectzien (de detectiekant van het proces) en voor betekenis-toekenning op grond van geheugeninformatie (de herkenningkant van het proces). Ook hier moeten we weer op-

passen dat we niet misleid worden door premature analogieën met de huidige computers, die een centraal werkgeheugen voor alle instructies en gegevens hebben, ondersteund door evenzeer ge-centraliseerde en seriële massageheugens (schijven, banden, CD's en dergelijke). In massief parallelle systemen, zoals complexe organisaties en bedrijven of het brein, is het efficiënter om slechts weinig en dan nog sterk gecondenseerde, gegevens centraal te bewaren (op directieniveau) en de rest decentraal op te slaan, daar waar de gegevens regelmatig nodig zijn. Dat betekent dat het bedrijfssysteem uit §5.4.2 er weer een taak bijkrijgt, namelijk de gecondenseerde gegevens bekijken, beoordelen en archiveren. Een vraag is dan bijvoorbeeld hoe autonoom de diverse parallelle hersenprogramma's zijn, welke informatie ze intern houden (niet-bewust), welke gegevens ze ongevraagd aan het bedrijfssysteem voorleggen, welke gegevens ze op aanvraag leveren aan elkaar en aan het bedrijfssysteem, of ze autonoom beslissen wat in hun eigen of in een centraal ik-archief moet worden bewaard, enzovoorts. Alleen empirische gegevens kunnen ons uiteindelijk met dit soort vragen verder helpen, of laten zien of we op het goede of op een verkeerd spoor zitten, maar we kunnen in elk geval proberen ons spoor compatibel te maken met de gegevens die er nu al zijn. Die wijzen sterk in de richting van parallelle verwerking op niet-bewust niveau en seriële verwerking binnen de 'stroom van het bewustzijn'. De flesschalzen die seriële verwerking afdwingen lijken daarbij met attentie, met betekenisstoekennend condenserend geheugen en met taakstelling en taakverdeling te maken te hebben, kortom met het bedrijfssysteem van het brein.

Het visuele systeem is in zulk detail bestudeerd, zowel gedragsmatig als met allerlei neurowetenschappelijke methoden en bij een veelheid van diersoorten, dat het de beste basis biedt voor onderzoek van zowel de parallelle als de seriële processen in het zenuwstelsel, van de niet-bewuste en wel-bewuste processen, van attentie en geheugen. Daarom gaan we nu eerst kort in op onderzoek aan visuele geheugenprocessen en in §5.4.4 op visuele attentie. Voor een veel uitgebreidere behandeling, zeker van de neuropsychologische en neurofysiologische aspecten, verwijs ik naar Grüsser en Landis (1991), een waarlijk heroïsche poging tot samenvatting van dit terrein.

Er is in de leerpsychologie al langer onderscheid gemaakt tussen langetermijn- en kortetermijngeheugen (LTG en KTG, figuur 24).

De eerste eenduidige ondersteuning van dit idee uit de neurowetenschap kwam van een epilepsie-operatie door W.B. Scoville op patiënt H.M. Bij deze patiënt werd de hippocampus bilateraal verwijderd, omdat die structuur aan de binnenzijde van de temporaalkwabben de oorsprong bleek te zijn van zeer frequente heftige epilepsie-aanvallen. H.M. bleek na de operatie grotendeels genezen van zijn zware epilepsie, maar kon geen nieuwe informatie in het LTG vastleggen. De kennis van vóór de operatie was nog aanwezig en toegankelijk (τ -bewust), maar na de operatie was er voor nieuwe gebeurtenissen alleen het KTG en werd er kennelijk niets meer vastgelegd in het LTG. H.M. is vreselijk gehandicapt, want hoewel hij gewoon met mensen kan praten (mits hierbij geen post-operatieve kennis essentieel is) zal hij het gesprek direct weer vergeten. H.M. leert geen nieuwe mensen kennen, kan geen nieuwe gegevens onthouden, kende de ziekenhuisstaf niet die hem iedere dag verzorgde, kon na verhuizing de weg naar zijn nieuwe woning niet vinden, enzovoorts. Toch kon men al vrij snel aantonen dat er bij H.M. en soortgelijke patiënten nog wel LTG-vorming mogelijk was, namelijk voor geautomatiseerde vaardigheden, impliciete kennis. Reflexen kunnen geconditioneerd worden en H.M. kan bijvoorbeeld oefenen om met een potlood een doolhof te volgen, terwijl hij dat alleen via een omkeerspiegel kan zien. Hij wordt daar dan van dag tot dag beter in (vaardigheidleren), zonder zich te herinneren de taak ooit eerder uitgevoerd te hebben!

Dit betekent dat ‘het’ LTG tenminste in een niet-bewust en een bewust LTG uiteenvalt of, zoals dat tegenwoordig wel wordt genoemd, een declaratief LTG (T -bewuste kennis) en een impliciet of nondeclaratief LTG. De temporaalkwab, in dit geval vooral de hippocampus, heeft met dit nondeclaratieve LTG kennelijk weinig te maken. Dat spoort met het idee, dat niet-bewuste vormen van leren (zoals conditioneren) fylogenetisch oud zijn en bij allerlei diergroepen voorkomen die men niet van bewustzijn verdenkt. Een zeer eenvoudig zenuwstelsel is al voldoende voor een impliciet LTG (en kan mogelijk zonder ‘bedrijfsysteem’). De laatste jaren wint de opvatting terrein, dat de hippocampus niet echt zelf het LTG is, maar slechts gedurende maximaal enkele weken informatie vastlegt. In die tijd moet de informatie elders, bijvoorbeeld in de cortex, voor permanente structurele veranderingen zorgen, waarbij activatie van DNA in de celkernen mogelijk essentieel is (Kandel & Hawkins, 1992). Er lijkt dus ook sprake van een mid-

den-langetermijngeheugen (MTG), dat gepasseerd moet worden vóór informatie in een ècht LTG komt. Het ligt voor de hand aan te nemen dat deze LTG's dichtbij (of zelfs in) de hersenprogramma's liggen die er gebruik van maken. Voor een overzicht van de vele hypothesen die inmiddels geformuleerd zijn over de mogelijke functies van de hippocampus, verwijs ik naar Shen e.a. (1994). Kandel & Hawkins (1992) bespreken enkele cellulaire en subcellulaire geheugenmechanismen.

Bewuste processen vereisen een minimumduur van de neuronale activatie, een KTG of werkgeheugen. Een pijn die een milliseconde duurt (de duur van 1 actiepotential van een zenuwcel) is geen pijn. Libet (1993) heeft redelijk overtuigend laten zien, dat een hersenactiviteit bij de mens minstens een halve seconde moet duren wil hij bewust kunnen worden en dat de te verwachten bewuste ervaring gedurende die halve seconde nog gemodificeerd kan worden door een tweede stimulus. Ook vele andere onderzoekers hebben op verschillende andere gronden de stelling verdedigd, dat bewustzijn een tussengeschakeld KTG vereist en dat ook gegevens uit de LTGs altijd alleen via zo'n KTG bewust kunnen worden. Het voorstel van Baddeley kwam al kort ter sprake: een visueel schetsblok en een fonologische lus als KTG met beperkte capaciteit. Een ander argument voor zo'n KTG volgt uit objectpermanentie. Als een speelgoedtreintje door een speelgoedtunneltje rijdt, dan verwachten mensen ouder dan bijvoorbeeld 2 jaar, dat het verdwenen object weer op zal duiken na de tunnel en ze kunnen zelfs vrij goed schatten wanneer dat zal gebeuren. Voor babies lijken (volgens sommige onderzoekers) objecten die uit zicht gaan ook weg te zijn en babies tonen dan verbazing als het object weer opduikt. Dit verschijnsel illustreert het probleem van objectpermanentie. Omdat zenuwcellen in het visuele systeem die een object (of zijn onderdelen) detecteren stoppen met vuren als het object uit zicht verdwijnt, is de vraag hoe het organisme weet dat het object er nog is als het wordt afgedekt. Zouden er groepen cellen zijn die object X detecteren en bij tijdelijk verdwijnen van dat object blijven vuren zolang object X terug verwacht wordt? Zulke cellen zouden dan een soort KTG voor objecten representeren. Hoewel veel filosofen en psychologen dat idee lange tijd te gek voor woorden hebben gevonden en ze toch al niet zo veel waarde hechtten aan metingen aan individuele zenuwcellen, zijn zulke cellen de laatste jaren op vrij grote schaal gevonden en bestudeerd.

Men heeft twee verschillende soorten taken gebruikt bij getrainde aapjes, waarbij in diverse hersendelen de activiteit van individuele zenuwcellen werd gemeten met micro-electroden. De eerste taak test 'herkenningsgeheugen', de tweede 'positiegeheugen'. In beide taken wordt eerst een 'hint'-stimulus aangeboden waar de aap naar kijkt maar niets mee doet (behalve de hint onthouden). De hintstimulus verdwijnt dan en na een variabele vertraging D ('delay') wordt de teststimulus aangeboden, waarna de aap iets moet doen dat afhangt van informatie uit beide stimuli. Bijvoorbeeld bij het testen van herkenningsgeheugen zou de hintstimulus object X te zien kunnen geven en de teststimulus tien verschillende objecten waar object X tussen zit. De aap moet X er dan uithalen, wat alleen lukt als het dier X gedurende de wachttijd van D seconden onthouden heeft. Bij testen van positiegeheugen wordt in de hintstimulus een plaats in het gezichtsveld aangewezen en moet het dier bij de teststimulus diezelfde plaats aanwijzen, echter zonder er in de tussentijd naar te kijken. Het dier leert tijdens aanbieding van de hintstimulus en de wachttijd D onafgebroken strak naar een fixatiepunt te blijven kijken (wat gecontroleerd kan worden met oogbewegingsmeting). Pas als de teststimulus komt, mag de aap dan kijken en/of wijzen naar de onthouden positie van de hint.

Het grote voordeel van deze procedure is dat men tijdens de hintstimulus ieder deel van het gezichtsveld kan stimuleren, dus ook een deel waar toevallig een cel naar 'kijkt' die men tegelijkertijd bemeeft. Blijft die cel actief tijdens wachttijd D , ondanks het feit dat zijn receptieve veld dan niet meer gestimuleerd is? Zulke PC-cellen (Positie-Geheugen-cellen) zijn inderdaad door meerdere onderzoekers gevonden in delen van de prefrontale cortex. Als de prefrontaalkwab wordt geledeerd kunnen primaten de test niet uitvoeren, wat trouwens de aanleiding was om daar te gaan zoeken. De positiegeheugentest heeft bijvoorbeeld aangetoond, dat er in de prefrontale cortex neuronen zijn met positiegeheugen, die alleen actief zijn tijdens de wachttijd D tussen hintstimulus en teststimulus, als er dus niets anders te zien is dan het fixatiepunt, dat niet eens in hun receptieve veld valt. Zeg dat een bepaalde PC-cel zijn receptieve veld heeft op klokpositie 3 uur enkele graden vanaf het fixatiepunt en dat op de positie van dat receptieve veld het doel werd getoond tijdens de hintstimulus. Dan zal die PC-cel gaan vuren zodra de hintstimulus uitgaat (en er dus niets meer in zijn receptieve veld te 'zien' is) en blijven vuren tot de teststimulus aangaat en de aap zijn actie start. Tijdens het vu-

ren van de PG-cel fixeert de aap gewoon net als vóór de wachttijd begon. De PG-cel heeft dus niets met oogbewegingen te maken, maar heeft zuiver een 'geheugenveld'. Dat wil zeggen, het gebied waar de PG-cel naar 'kijkt', zijn receptieve veldpositie, wordt onthouden als de positie (ten opzichte van het fixatiepunt, dus de fovea) waar straks de actie op gericht moet worden. Dit onthouden uit zich in een flink verhoogde activiteit van die betreffende PG-cel tijdens de wachttijd (Goldman-Rakic, 1992; Funahashi & Kubota, 1994). Meestal gebruikt men wachttijden van bijvoorbeeld 3 tot 20 seconden. Natuurlijk zijn niet alle cellen in die gebieden van het PG-type, maar welk percentage het betreft is niet zo precies bekend (schattingen liggen tussen 6 en 70%).

Deze PG-cellen krijgen input uit de hogere visuele gebiedjes in de pariëtale cortex (de 'waar'-analyse), onder andere uit area 7, die we in §4.3.3 bespraken. Als daar lesies optreden, worden de PG-cellen niet meer visueel aangestuurd en is het dus begrijpelijk dat de betreffende patiënten het corresponderende deel van de buitenwereld verwaarlozen, niet meer opmerken. Het gebied in de prefrontale cortex waar PG-cellen liggen is ook verbonden met de hippocampus, wat te maken zou kunnen hebben met het oproepen van gegevens uit het LTG. Daarnaast zijn er contacten met andere delen van de temporaalkwab, het visuele 'wat'-systeem, dat voor objectherkenning verantwoordelijk is. Als de wachttijd voorbij is wordt de positie van het receptieve veld van de geactiveerde PG-cel via motorische tussenstations als het striatum en de substantia nigra 'aangewezen' op de motorkaart van de CS (colliculus superior) en een activiteitsfocus op die kaart leidt tot een oogbeweging naar de geactiveerde kaartpositie.

Bij de werking van de PG-neuronen in de prefrontale cortex is de transmitter dopamine (evenals onder andere norepinefrine) van belang en verstoring van de chemische balans in dit gebied, evenals lesies in de prefrontale cortex, geven verschijnselen die lijken op schizofrenie. Als de KTG-functies van de prefrontale cortex uitvallen is er geen behoorlijke connectie via het werkgeheugen meer tussen LTG-kennis en momentane gebeurtenissen. De werkelijkheid wordt dan nauwelijks nog aan kennis getoetst en lijkt bovendien meer op een verzameling snapshots dan op een continu proces. Om die redenen meent Goldman-Rakic (1992) dat men een verband zou kunnen leggen tussen schizofrenie en verminderde werking van de dopaminerge delen van de prefrontale cortex. Hoe dergelijke zaken ook uit zullen pakken, het is

wel duidelijk dat onderzoek aan visuele en visuo-spatiële geheugenprocessen een veelbelovend onderzoeksgebied is voor de cognitieve neurowetenschap.

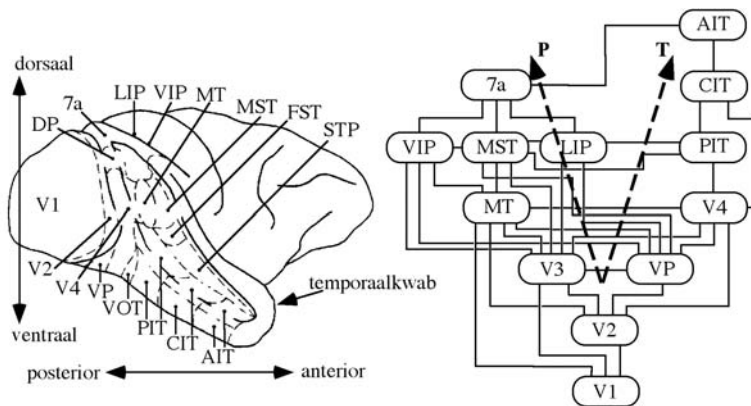
5.4.4 Visuele attentie

Zien is een activiteit en dat uit zich onder andere in de voortdurende aftastbewegingen van de ogen. Tijdens een fixatie wordt met een soort mentaal aftastraampje om het fixatiepunt gekeken op welk deel van de buitenwereld de volgende fixatie plaats moet vinden en wordt de vereiste saccade ‘berekend’. Dat zoekraampje bepaalt dus waar de aandacht na de saccade op gericht zal zijn, terwijl de bliklijn aangeeft wat op dit moment in het centrum van de aandacht staat. Een belangrijke vraag van attentieonderzoek is altijd geweest wat de aard van dat zoekraampje precies is. Kan het visuele systeem parallel het hele blikveld analyseren op interessante nieuwigheden (zoekraam ter grootte van het hele gezichtsveld), terwijl tegelijkertijd een preciese foveale analyse plaats vindt van het gefixeerde gebiedje? Of is het veeleer zo dat het mentale zoekraampje zich net zo saccadisch verplaatst als de bliklijn en dus een seriële analyse verricht van steeds een beperkt gebiedje tegelijk? Het is ook nog mogelijk dat beide methoden van saccadevoorbereiding voorkomen, afhankelijk van de taakstelling of van wat er te zien is. In elk geval is introspectief duidelijk, dat we onze aandacht kunnen richten op een bepaald gebiedje van de buitenwereld, zelfs zonder er direct naar te kijken, maar dat we ook gespitt kunnen zijn op een bepaald kenmerk, waar dan ook in het gezichtsveld. Als we een persoon in een menigte zoeken vinden we haar sneller als we weten dat zij een rode mantel aan heeft. Kennelijk kunnen we de opdracht uit laten voeren ‘zoek iets roods’. Op basis van zulke overwegingen zijn er ongelofelijk veel theorieën ontwikkeld. Attentie zou het gezochte kenmerk faciliteren en andere kenmerken inhiberen, attentie zou een soort zoeklicht zijn, dat soms met de bliklijn mee schijnt, soms in een andere richting, enzovoorts. De neurowetenschappelijke aanpak gaat van de simpelste overwegingen uit en stelt de vragen:

1. Kan het visuele systeem een bepaald kenmerk zoeken door de gevoeligheid ervoor te vergroten en/of de gevoeligheid voor andere kenmerken te verkleinen?
2. Kan het visuele systeem de gevoeligheid voor stimulatie uit een bepaald gebiedje van de buitenwereld selectief vergroten en/of die voor andere delen van het gezichtsveld verkleinen?

Om dat uit te zoeken kan men weer met wakkere aapjes werken die bepaalde taken verrichten om beloningen te verdienen (slokses appelsap bijvoorbeeld) en tijdens het uitvoeren van de taken meten aan diverse neuronen in diverse visuele cortexgebiedjes. Een algemene bevinding is dat al vrij vroeg na VI geen gelijk gewicht meer wordt gegeven aan alle aspecten van een scène en dat de interesse van de kijker bepaalt wat het sterkst tot uiting komt. In figuur 27 is het complement gegeven van figuur 26, namelijk het verloop van de visuele banen na VI. Dit was al in figuur 23 gedaan, maar in die figuur ziet men mogelijk door de bomen het bos niet. In figuur 27 zijn de verbindingen in de pariëtale baan ('waar'-systeem) en de temporale baan ('wat'-systeem) in sterk vereenvoudigde vorm weergegeven, met een aanduiding waar de gebiedjes liggen in de hersenen van een makaak. Laten we allereerst area V4 beschouwen, het gebiedje dat zo sterk in kleurinformatie geïnteresseerd is. Al op dat niveau vinden we duidelijke invloed van attentieprocessen. Het eerste onderzoek is van Connor e.a. (1996) en betreft de zoeklichthypothese. Het idee is dus dat cellen in het attentiefocus (het zoeklicht) aanzienlijk gevoeliger zijn dan cellen die buiten dat focus liggen, maar men verwacht natuurlijk een soort gradiënt van gevoeligheid, die afneemt met de afstand van het attentiefocus.

Connor e.a. (1996) trainden een aapje naar een rood fixatiepuntje te blijven kijken zolang dat aan was en controleerden de fixatie met oogbewegingsmeting. Een halve seconde nadat de aap begonnen was met fixeren werd er een blauw cirkeltje ergens op het scherm aangeschakeld en de aap moest dan, zonder een oogbeweging te maken, zijn attentie op het cirkeltje richten. Het dier moest alle andere visuele gebeurtenissen op het scherm negeren. (Die andere visuele gebeurtenissen waren alleen van belang voor de onderzoekers, die er hun meting mee deden.) Zoiets is heel goed te leren en de dieren maakten maar gedurende ongeveer 2% van de tests een fout. Die mislukte tests werden natuurlijk buiten beschouwing gelaten. Het feitelijke experiment was nu, dat de onderzoekers een receptief veld van een cel in V4 bepaalden, en vervolgens in dat receptieve veld op een uit vijf verschillende gekozen posities (gelijkmatig over het receptieve veld verdeeld) een gekleurde balkvormige stimulus flitsten van optimale kleur en in de optimale oriëntatie. Ze kwantificeerden de responsie van de bemeeten cel op de stimuli in het receptieve veld van die cel.



Figuur 27 Gemodificeerd naar Maunsell (1995). Links: De ligging van veel besproken (niet alle) visuele gebiedjes in de pariëtale en temporale cortex van Rhesus Macaque. Rechts een sterk vereenvoudigd schema van verbindingen tussen enkele van deze gebiedjes (vergelijk met figuur 23). IT staat voor infero-temporaal en de voorvoegsels A, C, P (in respectievelijk AIT, CIT en PIT) betekenen anterior (voor), centraal, posterior (achter). Deze gebiedjes bestaan uit een dorsaal (boven) en ventraal (onder) deel, links in de figuur ieder apart met een lijntje aangegeven. MT heet ook wel V5 en betekent mediotemporaal, terwijl MST medio-superior-temporaal betekent. IP, zoals in VIP en LIP staat voor intrapariëtaal, waarbij de voorvoegsels V en L respectievelijk ventraal en lateraal betekenen. VIP en LIP liggen in de sulcus (groeve). De stippellijnen P en T geven respectievelijk de pariëtale en temporale informatiestroom aan.

Omdat ze de blauwe attentieringetjes een klein stukje onder of boven het receptieve veld gaven en de aandacht daar dus gecentreerd was, vielen de geflitste balkstimuli op verschillende afstanden van het attentiefocus en of erboven of eronder. Zo konden de onderzoekers de attentiegradiënt meten in termen van de responsiesterkte als functie van de afstand van het attentiefocus. Als de aap de attentie onder het veld gericht had, bleek de responsie groter te zijn voor stimuli onderaan in het receptieve veld en nam naar boven af. Was de attentie boven het receptieve veld gericht, dan nam de responsie op de stimuli in het receptieve veld van boven naar onder geleidelijk af. Dezelfde stimulus in hetzelfde receptieve veld geeft dus een andere responsie afhankelijk van de plek waarop de aap de aandacht richt, of liever gezegd, in correlatie met de afstand van het attentiefocus.

Zo kan men het zoeklichtidee dus prima kwantificeren en cellen in V4 vertonen inderdaad het gedrag dat men van een zoeklichtmodel zou verwachten. Nu betreft dit onderzoek duidelijk het richten van de aandacht op een bepaalde *positie*. We kunnen ons dus vervolgens afvragen of het ook mogelijk is het richten van de aandacht op een bepaald *kenmerk* te onderzoeken.

Motter e.a. (1994a,b) zijn erin geslaagd dat probleem te onderzoeken. In deze experimenten is de kleur van het fixatielichtje de aanwijzing (hint) op welke kleur de aap zijn aandacht moet richten in de volgende aanbieding van stimuli. Eerst moet het dier weer fixeren en dan wordt een stimuluspatroon aangeschakeld, dat uit twee groepen van 3 balken van een bepaalde oriëntatie en kleur bestaat. Zo kunnen bijvoorbeeld bij een bepaalde test drie naar links hellende balken rood gekleurd zijn en drie naar rechts hellende balken blauw, waarbij de balken willekeurig door elkaar liggen. Steeds valt echter één van de balken precies in het receptieve veld van de bemeten cel en die balk heeft steeds dezelfde oriëntatie, zodat het receptieve veld – afgezien van de kleur – altijd dezelfde stimulus ‘ziet’. Bij iedere kleurkeuze wordt de balk in het receptieve veld even vaak attentiedoel als niet. Het blijkt dat de reactie van de cel op dezelfde stimuluskleur zeer verschilt tussen de tests waarin op die kleur gelet moet worden en de tests waarbij juist op de andere kleur gelet moet worden. Aandacht voor een kleur geeft steeds een ongeveer 1,5 keer sterkere reactie van cellen die op die kleur zijn afgestemd, terwijl zulke cellen juist minder of nauwelijks reageren als hun kleur niet de aandacht van het dier heeft. (In feite heb ik hier maar een deel van het proefje beschreven, maar dat is voor ons huidige doel voldoende).

Maunsell (1995) deed een vergelijkbaar experiment, maar wat eenvoudiger van opzet. In zijn proef had de aap ook een fixatiepunt van een kleur die aangaf op welke stimulus het dier de aandacht moest richten zonder de ogen te bewegen. Er werden dan twee stimuli gegeven, één in het receptieve veld van de bemeten V4-cel, de ander op een positie symmetrisch ten opzichte van de verticaal door het fixatiepunt (bijvoorbeeld klokpositie 4 uur respectievelijk 8 uur). De twee stimuli hadden verschillende kleur, waarbij de ene wel, de andere niet met de kleur van het fixatielicht overeenkwam. Had het fixatielicht de kleur van de stimulus in het receptieve veld, dan kreeg de stimulus aandacht en bleek de reactie weer zo'n 1,5 keer sterker dan wanneer met de kleur van het fixatielicht de andere stimulus werd aangewezen.

De conclusie uit deze experimenten is eenduidig: attentie kan de qualia benadrukken waarop de aandacht gericht is, en doet dat al in visuele gebiedjes die relatief kort na VI komen (figuur 27). Zoeken we iemand met een rode mantel dan vuren cellen in V4 die voor rood tegen een andersgekleurde achtergrond gevoelig zijn, sterker dan ze normaal zouden doen als we niet specifiek aandacht hebben voor zo'n type visueel kenmerk. Het ligt nu voor de hand om te vragen of dit alleen voor kleur geldt of ook voor andere qualia.

Treue en Maunsell (1996) rapporteerden dat voor beweging iets analoogs geldt als voor kleur. De aapjes fixeerden weer gedurende de hele proef zonder de ogen van het fixatiepunt weg te bewegen. Kort na het begin wordt dan een bewegend stipje elders op het scherm gezet. Dat stipje beweegt heen en weer langs een rechte baan. Als de aap erop let laat hij dat weten door een hendeltje los te laten. Daarop verschijnt er nog één of soms nog twee doelen, die langs een ander recht pad (niet met de eerste kruisend) heen en weer bewegen. De aap moet de aandacht gericht houden op het eerste bewegende doel dat zichtbaar wordt en mag niet op de tweede of derde bewegende doelen letten. De truc is ook hier weer dat of het doel waar de aap op let, of een van de andere doelen beweegt in het receptieve veld van een bewegingsgevoelige cel in area MT (V5) of area MST (figuur 27). Omdat zulke cellen een voorkeursrichting vertonen, zal de reactie groot zijn als de stip in de voorkeursrichting beweegt en klein als de stip in de niet-voorkeursrichting beweegt. Het bewegingspad was natuurlijk steeds optimaal georiënteerd.

De vraag is nu wat de invloed van de attentie van de aap op deze reactie is. Weer bleek dat de celreactie het grootst is als de aap op de optimale stimulus in het receptieve veld van de bemeten cel let en klein als de aap op andere stimuli buiten het receptieve veld let, hoewel de cel dan nog steeds dezelfde stimulatie ontvangt. De toestandafhankelijkheid van deze cellen is duidelijk, het scheelt tot een factor 2 in reactiesterkte of er op de stimulus in het receptieve veld gelet wordt of niet. In het experiment met twee extra bewegende puntjes lieten de onderzoekers twee stimuli langs het optimale pad in het receptieve veld bewegen, maar steeds met tegengestelde richting. Afhankelijk van welke van de twee de aandacht had, veranderde de responsmodulatie 180° in fase. Dat wil zeggen dat de celreactie ontstaat die past bij de stip waarop gelet wordt, en niet bij de andere bewegende stip. De stip

die niet de aandacht heeft kan bijvoorbeeld op een bepaald moment in de voorkeursrichting bewegen, terwijl het attentiedoel in de niet-voorkeursrichting beweegt. De respons komt dan met die op de niet-voorkeursrichting overeen. De cel kan dus zelfs een optimale stimulus negeren als de aap op de andere stip let.

In mijn laboratorium hebben Lankheet & Verstraten (1995) een verwant psychofysisch experiment bij mensen gedaan. Als we een groot veld van random puntjes laten bewegen in een bepaalde richting, zeg α° verdraaid ten opzichte van 12 uur en daaraan een minuutje adapteren om vervolgens naar een statisch veld met random textuur te kijken, zien we de bekende watervalillusie, een bewegingsnaeffect. Er lijkt dan als naeffect een beweging op te treden in de richting $\alpha + 180^\circ$. Adapteren we nu aan twee van die spikkeltjesvelden die transparant door elkaar bewegen met verschillende richtingen α en β , dan blijkt het naeffect in de richting tegenovergesteld aan hun vectorsom te gaan. In het naeffect kan men de componenten niet gescheiden zien, zoals tijdens bekijken van de (adaptatie)stimulus zelf wél kan. Dit correspondeert met electrofysiologische bevindingen dat in area VI beide bewegingsrichtingen gescheiden gerepresenteerd zijn, maar in area MT niet – daar vindt men cellen die de vectorsom representeren. Laten we nu de twee patronen transparant door elkaar in tegengestelde richting bewegen, dan voorspelt het vectorsommodel van het naeffect (Verstraten e.a., 1995) dat er geen naeffect op zal treden. In MT is er geen nettostimulatie in de vectorsomcellen. Deze voorspelling klopt ook met de waarnemingen. Echter, wanneer we nu onze proefpersonen instrueren tijdens de adaptatieperiode – zonder oogbewegingen te maken – op één van de twee bewegingsrichtingen te blijven letten, dan treedt wél een naeffect op. De richting van het naeffect is dan tegengesteld aan de richting van de beweging waar tijdens de adaptatieperiode speciaal op gelet is. Men kan dus kennelijk met attentie de activiteitsbalans in MT beïnvloeden! Dit is het directe psychofysische correlaat van de bevindingen van Treue en Maunsell (1996), die we boven bespraken. We zijn van plan dit soort onderzoek voort te zetten tijdens hersenscans, zodat we kunnen zien hoe en waar attentie de activiteitsbalans kan moduleren. Door psychofysisch werk, electrofysiologie en scanmethoden te combineren kan men zeker een stuk verder komen met de natuurwetenschappelijke studie van attentieprocessen. Op vergelijkbare wijze kan men overigens ook de eerder besproken werkgeheugens nader bestuderen.

Nawoord

Dit boek geeft geen direct antwoord op vragen zoals: kunnen vissen pijn lijden, kunnen apen een taal leren, zijn dolfinnen intelligent? Hoewel zulke vragen concreet en precies *lijken* zijn ze in feite in deze vorm onbeantwoordbaar. Ze roepen tegenvragen op zoals: wat bedoel je met pijn lijden, wat bedoel je met een taal leren, wat bedoel je met intelligent zijn? Vissen zullen niet op de menselijke wijze pijn lijden, apen kunnen geen taal leren zoals de mens dat kan, dolfinnen zijn niet op dezelfde manier intelligent als Einstein of Newton dat waren. Vissen, apen en dolfinnen zijn echt andere diersoorten dan de mens. Ze hebben een ander repertoire aan vaardigheden en gevoeligheden, ze zijn geëvolueerd in een andere niche. Wat voor de ene soort overlevingswaarde heeft, hoeft dat voor de andere soort niet te hebben. We moeten 'pijn lijden', 'taal leren' en 'intelligent zijn' daarom eerst ontdoen van hun alledaagse antropomorfe (op de mens geënte) betekenis. Het resultaat is zoiets als: een op pijn lijden van mensen lijkende negatieve emotie met dezelfde vitale functie kunnen we bij alle dieren met meer dan ongeveer x zenuwcellen verwachten. Over het getal x moeten we het dan bij gelegenheid nog maar eens hebben.

Zo komen we tot de eis dat 'lijden', 'taal', 'intelligent', 'bewust', 'denken' en dergelijke diersoortonafhankelijk moeten worden gedefinieerd. In discussies over zulke onderwerpen, bijvoorbeeld over het al of niet lijden van vissen, moet het dan over die diersoortonafhankelijke betekenis gaan en niet over een antropomorfe betekenis. De biologische evidentie wijst vooral in de richting van een sterke analogie/homologie van (niet-bewuste en/of *E*-bewuste) emoties. Emoties zijn immers gerelateerd aan verhogen of verlagen van de overlevingskansen van een dier. Vluchten, vechten, voortplanten, lichamelijke integriteit, homeostase, oefenen, problemen oplossen, geborgenheid, sociale relaties en dergelijke gaan gepaard met positieve en negatieve emoties, die als het ware aangeven wat 'goed' is (positieve emoties) en wat 'slecht'

(negatieve emoties). Emoties geven richting aan het leven en verdienen zeker een herwaardering in de theorie over intelligent gedrag. Cognitieve vermogens zullen veel meer gerelateerd zijn aan de bijzonderheden van de koppeling tussen dier en habitat, aan wat een dier kan waarnemen en wat daarbij als informatief (bruikbaar) geldt. De verliefdheid van een tijger en die van een mens kunnen qua ruwe gevoelens best op elkaar lijken, maar zullen qua cognitieve en perceptuele aankleding flink verschillend zijn. Wij laten ons niet gauw opwinden door een fraai strepenpatroon. Er is geen reden aan te nemen dat de angst van een vos gigantisch verschilt van die van de mens in termen van het ruwe (mogelijk E-bewuste) gevoel (LeDoux, 1996). De *oorzaak* van de angst van de vos zal meestal een heel andere zijn dan die van de mens en de T-bewuste aspecten zullen dus flink kunnen verschillen.

Emoties hoeven evenmin als cognities steeds bewust te zijn. Veel hedendaagse onderzoekers gaan er bijvoorbeeld van uit dat intuïtie gebaseerd is op niet-bewuste waardetoekenning aan gebeurtenissen en toestanden. Beslissingen worden vaak op zulke intuïties gebaseerd, op 'een goed gevoel' of juist angst, op positieve en negatieve waardetoekenningen die ooit buiten het bewustzijn om zijn geleerd. Er zijn patiënten die dit soort intuïtie missen en die voortdurend verkeerde beslissingen nemen. Dat is meestal een gevolg van een lesie in de prefrontale cortex, het deel van de hersenen net boven de oogkassen. Zulke patiënten zijn emotiearm, ze nemen veel foute beslissingen, terwijl er cognitief niets mis is en ze normaal intelligent kunnen zijn. Op basis van onderzoek aan zulke patiënten meent A. Damasio (zie Vogel, 1997) dat het betreffende hersendeel statistische informatie opslaat (via conditioneren, associatieleren) over vroegere beloningen en straffen en dat die informatie bij gezonde mensen de basis is van intuïtieve beslissingen.

In het kader van onze vraagstelling betreffende natuurlijke intelligentie ben ik uitgegaan van het concept van hersenprogramma's: plannen voor actie opgeslagen en/of ontwikkeld in het brein (Young, 1978). De huishoudelijke gang van zaken met interrupts, stoppen of onderbreken van hersenprogramma's, opnemen en doorgeven van tussenresultaten, regelen van de samenwerking tussen modules, starten of modificeren van hersenprogramma's, vereist een soort bedrijfssysteem. Een deel van de acties van dit bedrijfssysteem kunnen bewust worden ervaren, maar overigens

verlopen vrijwel alle hersenprogramma's buiten het bewustzijn om. Pas als ze hun resultaten afleveren aan het bedrijfssysteem, duiken die resultaten op in ons bewustzijn. Dit lijkt me een tamelijk universeel en dwingend organisatieprincipe van alle zenuwstelsels van 'voldoende' complexiteit, dus van dieren met voldoende autonomie ten opzichte van de momentane omgeving. Hersenprogramma's en het bedrijfssysteem zijn functioneel modulair. Ze zijn niet noodzakelijkerwijs anatomisch localiseerbaar in één enkele hersenkern of cortexmodule. Het bedrijfssysteem zal zeker uit meerdere samenwerkende modules moeten bestaan, gezien de diversiteit aan taken en de verwachting dat toenemende autonomie gepaard gaat met toevoeging van extra modules. Dit voorstel is een veralgemenisering van het uitgangspunt van Baddeley, dat er een 'executive control systeem' moet zijn als kern van het werkgeheugen. Bij mensen en apen zou dat voornamelijk in de prefrontale cortex zetelen. Baddeley en Della Sala (1996) benadrukken, dat ook lesies buiten de prefrontale cortex, bijvoorbeeld in de temporale cortex, ertoe kunnen leiden dat het lijkt alsof het bedrijfssysteem gestoord is. In dit recente werk geven ze ook aan dat er vermoedelijk meer subprocessen (modules) een rol spelen in de 'central executive' en zo komen ze dicht in de buurt van het idee van een algemeen bedrijfssysteem. Als extra taken van de 'executive controller' noemen ze onder andere de verdeling van de aandacht, de organisatie van leren en herinneren en het manipuleren van modellen.

Area 46 (figuur 20) en de omliggende gebieden spelen een belangrijke rol in het bedrijfssysteem van de hersenen van primaten, inclusief de mens. Dit deel van het brein lijkt onder andere als coördinatiecentrum voor het werkgeheugen te functioneren, conform het voorstel dat Baddeley twintig jaar geleden al deed. De prefrontale cortex is de laatste tijd zeer intensief bestudeerd met scantechnieken bij mensen en met microëlectroden bij andere primaten (Wickelgren, 1997). Zo vond men dat area 46 actiever is naarmate de proefpersoon meer gegevens in het werkgeheugen moet houden. Ditzelfde gebied blijkt echter ook een grote rol te spelen (erg actief te zijn) bij het verdelen van de aandacht tijdens het tegelijk uitvoeren van twee taken. Desimone en medewerkers vergeleken celactiviteit in de temporaalcortex van aapjes waar visuele objecten worden herkend, en in de prefrontaalcortex waar het werkgeheugen zou zetelen. Als de dieren een plaatje onthielden waren in beide gebieden cellen actief, maar als er tussentijds een

afleidend plaatje werd getoond vielen de cellen in de temporaal-cortex stil, terwijl de geheugencellen in de prefrontaalcortex actief bleven tot de test was afgerond en de beloning ontvangen. Er zijn langzamerhand complexere modellen en simulatiestudies nodig en ook mogelijk om de rol van de prefrontale cortex te doorgronden. Het lijkt me dat vooral theorieën over de coördinatie van parallel werkende, relatief zelfstandige hersenprogramma's nodig zijn. Nadenken over het bedrijfssysteem van het brein zou wel eens tegelijk zeer leerzaam kunnen zijn voor het ontwikkelen van bedrijfssystemen voor parallelle computers. De computer hoeft niet eeuwig een slecht model van het brein te blijven!

Eén van de meest dramatische hersenoperaties uit de geschiedenis werd door William Scoville begin vijftiger jaren uitgevoerd op patiënt H.M. (zie §5.4.3), die aan onbehandelbare epilepsie leed met focus aan de binnenzijden van de beide temporaalkwabben. De patiënt leeft nu nog, maar kent geen van de feiten of woorden die hij sinds de operatie nieuw heeft gehoord, gezien of gelezen (Parkin, 1996). Dit heet een anterograde amnesie, een verlies van het geheugen voor nieuwe gegevens. H.M. heeft ook een retrograde amnesie, een geheugenverlies voor gegevens van vóór de ingreep, die in zijn geval ongeveer elf jaar teruggaat voor de operatie. Er waren na de ingreep geen epileptische aanvallen meer, dus de operatie was in die zin geslaagd. Maar H.M. herkende na het wakker worden uit de narcose geen enkele van de hem al langer bekende stafleden van het ziekenhuis en dat bleef ook zo. Wat bij H.M. aan beide zijden was weggehaald door Scoville was de hippocampus, een hersendeel dat in dwarsdoorsnede wel wat van een zeepaardje wegheeft en daarnaar genoemd is. Omdat ook de dicht bij de hippocampus liggende amandelkern (amygdala) in beide hersenhelften beschadigd was, was niet absoluut zeker dat de amnesie verband hield met de hippocampus, maar dat bleek uit later werk. H.M. kon wel nieuwe vaardigheden leren, maar dan zonder later te weten dat hij die taken eerder had geoefend! Op grond hiervan heeft men een indeling gemaakt van het langetermijngeheugen in een expliciet, zogenaamd 'declaratief' deel en een impliciet, dus niet-bewust deel wat 'niet-declaratief' heet. Het declaratieve (langetermijn)geheugen blijkt dus onder andere met de hippocampus te maken te hebben. Het niet-declaratieve geheugen wordt tegenwoordig ook in vier of vijf verschillende modules verdeeld ieder met een andere locatie in de hersenen (Squire en Zola, 1996). Zo zou eenvoudige klassieke conditione-

ring van motorprogramma's via het cerebellum lopen en conditionering van emotionele reacties via de amygdala. Vaardigheden en gewoonten vereisen een intact striatum. Uit neuropsychologisch onderzoek en moderne scantechieken heeft men langzamerhand een aardig beeld van dit soort zaken bij primaten. Het lijkt me wetenschappelijk gezien dringend nodig dit type onderzoek in evolutionair biologische richting uit te breiden en na te gaan welke deelsystemen bij welke dieren voorkomen, en hoe, waarom en wanneer ze geëvolueerd zijn.

Het inzicht dat de hippocampus iets met geheugen te maken moet hebben heeft ook geleid tot onderzoek aan hippocampusplakjes. Men kan die enige tijd in een schaalte functioneel houden en dan met microëlectroden meten aan cellen in die plakjes. Zo heeft men neuronale basismechanismen van het geheugen ontdekt. Laten we ons een (post)synaptisch element P voorstellen, waarop onder andere de uitlopers A en B contact maken via een synapspleet. Voor bepaalde van deze verbindingen, die met glutamaat als neurotransmitter werken, geldt dan het volgende. Als A sterk depolariseert tegelijk met P , maar B niet, dan zal het contact tussen A en P versterkt worden en dat tussen B en P verzwakt. De versterking respectievelijk verzwakking van de synaptische invloed kan minuten tot uren aanhouden als de stimulatie sterk genoeg was en enige tijd snel achter elkaar (bijvoorbeeld met 100 Hz) herhaald werd. Men noemt dit verschijnsel 'long-term potentiation' (LTP) respectievelijk 'long-term depression' (LTD). Het mechanisme is dus een soort coïncidentiedetectie en het effect blijft lang genoeg bestaan om het als een vorm van synapsgeheugen te zien. Wil dit een mechanisme voor een langetermijngeheugen zijn, dan moet er een soort consolidatie van de verandering plaatsvinden. Dat blijkt inderdaad te kunnen gebeuren.

Het beeld dat men nu heeft is dat LTP de synapsen als het ware markeert en dat vervolgens een proteïne die onder invloed van de genen in de cellen aangemaakt wordt, zich verbindt met deze gemarkeerde synapsen en zo de verandering consolideert. De consolidatiestof lijkt dezelfde te zijn als die welke een rol speelt bij de ontogenese van de zenuwverbindingen en lijkt bovendien universeel gebruikt te worden van fruitvlieg tot mens (Bear, 1997). De consolidatiestof is op zich niet synapsspecifiek en werkt op alle gemarkeerde synapsen tegelijk. Sterke emotionele gebeurtenissen kunnen waarschijnlijk een grote hoeveelheid van die stof opwek-

ken, waardoor alles wat ermee geassocieerd is wordt vastgelegd. Interessant is ook dat onderdrukken van de productie van de consolidatiestof een amnesie geeft die lijkt op het probleem van H.M. tengevolge van verwijderen van de hippocampus.

De cellulaire en moleculaire mechanismen van leren worden zodoende stap voor stap ontrafeld, terwijl tegelijkertijd de globale architectuur van de geheugenprocessen steeds beter bekend wordt. Dit biedt hoop dat er ook mogelijkheden ontstaan voor de behandeling van geheugenstoornissen, dementie en dergelijke. Overigens gaat men er niet meer van uit dat de langetermijnopslag van allerlei gegevens in de hippocampus zelf plaatsvindt. In de hippocampus worden brokken informatie uit allerlei sensorimotor-sytemen geassocieerd en voor de middenlange termijn vastgehouden. Uiteindelijk blijkt de informatie dan overgebracht te worden naar de betrokken meer gespecialiseerde hersengebieden. Vandaar ook, dat H.M. de oudere herinneringen, die al elders in zijn brein waren ondergebracht, behield. Het brein heeft dus in de hippocampus geen centrale geheugeneenheid, maar een soort bemiddelaar bij het vastleggen van samengestelde gegevens voor de lange termijn. Het lijkt een submodule van het bedrijfssysteem te zijn.

Denken van dieren en intelligentie kunnen op den duur niet vruchtbaar worden onderzocht zonder rekening te houden met dit totale beeld van een grote variëteit aan hersenprogramma's en een complex bedrijfssysteem dat het werk van de programma's coördineert, beoordeelt en zonedig modificeert. Emotie en cognitie zijn via dit bedrijfssysteem gekoppeld. Algemene intelligentie zou dus kunnen samenhangen met de flexibiliteit van dit bedrijfssysteem en de componenten die voor leren en gedistribueerde gegevensopslag zorgen, terwijl intelligentie op gebied X kan samenhangen met verzamelingen meer op gebied X gespecialiseerde hersenprogramma's. De studie van de waarneming in al zijn facetten biedt de mogelijkheid het inzicht hierin te verdiepen. De waarneming als postnatale kennisbron kan ons laten zien wat aangeboren is en wat aangeleerd, hoe het aanleren precies gebeurt en welke beperkingen iedere diersoort hierbij ondervindt. Vooral de studie van ruimtelijk gedrag en ruimtelijke waarneming is hierbij instructief omdat het universele geometrische problemen omvat, waarmee de natuurwetenschap in het algemeen goed overweg kan. Vandaar de nadruk in dit boek op het zien van ruimtelijke relaties en vormen. Dit onderwerp sluit ook goed aan op filo-

sofische kernvragen van empirisme, rationalisme en hun synthese. Hoe is ruimtekennis in het zenuwstelsel gerepresenteerd? Is dat Euclidische of niet-euclidische, topologische of metrische, aangeboren of aangeleerde kennis? Deze vraagstukken hebben we besproken en gedeeltelijk beantwoord. Het is boeiend te zien dat er steeds meer bevindingen pleiten tegen een klassiek idee van een centrale geometrische verwerkingseenheid in het brein, waaraan alle zintuigen en motorsystemen refereren. In hersengebieden die hoofdbewegingen sturen vinden we een codering van wereldposities relatief tot het hoofd, in gebieden die oogbewegingen sturen relatief tot het oog, in gebieden die ledematen sturen relatief tot het betreffende been of de betreffende arm. Er zijn dus als het ware multiële representaties van de ruimte, de persoonlijke omgeving, in het brein te vinden en de vraag rijst dan of en hoe die het met elkaar eens worden. In figuur 23 zien we bijvoorbeeld gebiedjes als LIP, VIP en MIP (IP staat voor intrapariëtaal) op een hiërarchisch niveau onder area 7. We hebben al gezien hoe neuronen in area 7 ruimtelijke taken sturen (zie 4.3.3), maar recent onderzoek (bijvoorbeeld Colby en Duhamel, 1996) toont aan dat ook LIP, VIP en MIP hun eigen ruimtelijke representaties hebben, respectievelijk relatief tot de locatie die we met de fovea fixeren (LIP), tot de hoofdstand (VIP) en tot de stand van de arm (MIP). Dit doet denken aan de profetische titel van een publicatie van Koenderink (1990): *The brain as a geometry engine*. Het is inderdaad niet vergezocht aan te nemen dat geometrische transformaties een hoofdrol spelen in veel neuronale processen. Studie van visuele informatieverwerking en van visuomotor-processen zou ons dan ver kunnen brengen bij onze pogingen het brein te begrijpen.

Het besproken superlocalisme, de versplintering van de homunculus, mag beslist als een verrassende bevinding van onderzoek aan hersenen en gedrag worden gezien. Hetzelfde geldt voor het feit dat postnataal leren en embryonale ontwikkeling van het zenuwstelsel van alle dieren op dezelfde mechanismen van coïncidentiedetectie lijken te berusten, en dat genen en proteïnen die de ontwikkeling en het leren sturen vrijwel identiek zijn van fruitvlieg tot olifant. Actiepotentialen, ionenkanalen, membraaneigenschappen, transductiemechanismen, dat alles is universeel voor alle organismen met een zenuwstelsel (en voor een deel ook daarbuiten). Neuronale netwerken van klein tot groot lijken een soort 'schakelrepertoire' te hebben van slimme transformatienetwerken, zoals ook in de menselijke techniek hefbomen, tandwie-

len, schakelaars, schuifregisters, enzovoorts, in velerlei verband steeds weer terugkomen in allerlei machines met allerlei verschillende taken. Hopfield (1996) noemt deze invarianties in het schakelrepertoire 'motifs of neural circuitry' en hij wijst erop dat een verandering van variabelen (een transformatie) het ene probleem in het andere kan omzetten. Motorsturing en sensorische verwerking berusten op universele principes en de fysische wereld levert met universele wetmatigheden en randvoorwaarden een coherente inbedding. Dit alles is uitstekend met natuurwetenschappelijke middelen te bestuderen. Van ecologische fysica tot cognitieve neurowetenschap is er samenhang in onderzoek naar het intrigerendste mysterie dat we kennen, de geest van mens en dier. Tot nu toe heeft de theoretische neurowetenschap zich vaak beperkt tot toegepast onderzoek, bijvoorbeeld aan neurale netwerken, of tot onrealistisch vergaande simplificaties van het soort 'deze integraal vertegenwoordigt het brein en die de wereld'. Het lijkt me van belang dat er internationaal meer belangstelling en waardering komt voor complexere, realistischere theorieën van het zenuwstelsel en zijn onderdelen.

Het brein van hogere zoogdieren is het meest complexe systeem dat we kennen en het zal duidelijk zijn dat we het niet behoorlijk kunnen analyseren zonder effectieve ingang. Visueel onderzoek is een wonderbaarlijk effectieve en veelzijdige ingang gebleken. Met een groot landelijk centrum voor fundamenteel en interdisciplinair visueel onderzoek zou men dan ook het meest fascinerende doel dat de mensheid zich ooit gesteld heeft naderbij kunnen brengen: het begrijpen van ons eigen brein en dat van de dieren om ons heen. Visueel hersenonderzoek is hersenonderzoek in de breedste zin des woords, omdat er naast de occipitale, pariëtale en temporale cortexgebieden ook frontale cortexgebieden en een enorm aantal subcorticale kernen bij betrokken zijn. Verder is er het enorme voordeel van de toegankelijkheid voor analyse van visuele en visuomotor-taken en de precisie waarmee visuele stimuli gedefinieerd en gevarieerd kunnen worden. Bovendien is visueel onderzoek goed ingebed in een historie van filosofische en gedragsstudies. Het heeft de diepgang en nauwkeurigheid van fysisch onderzoek en de breedte en maatschappelijke uitstraling van de gedragswetenschappen en geneeskunde.

Verklarende woordenlijst

- Actiepotentiaal* Een pulsvormige elektrische verstoring van de potentiaal van het zenuwcelmembraan, vooral aan de uitgangszijde van de cel, het axon. Reeksen actiepotentialen dragen via een soort frequentie-modulatie informatie over van de ene zenuwcel naar de andere, en belichamen daarmee de taal of code waarmee neuronen communiceren.
- Afasie* Een gedeeltelijk of volledig onvermogen om te spreken (motorische afasie) of het gesprokene te begrijpen, zonder dat er sprake is van een geestesstoring.
- Agnosie* Onvermogen om zich bewust te worden van of de aandacht te richten op een bepaald aspect van de waarneming. Dit aspect kan een klasse van objecten zijn (objectagnosie), of het kan alles betreffen wat zich in een bepaald deel van de ruimte afspeelt (bijvoorbeeld links van de patiënt).
- Artificial intelligence* Studie van de mogelijkheden en vormen van intelligentie in machines. Dit technologische onderzoeksgebied wordt vaak afgekort AI genoemd. De Nederlandse vertaling 'kunstmatige intelligentie' wordt meestal niet gebruikt, vanwege de bijbehorende verwarrende afkorting KI.
- Amacrine cel* Zenuwcel zonder axon, zoals de amacrine cellen van het netvlies.
- Analogie* Een overeenkomst tussen twee onafhankelijke systemen. Hier wordt de term vaak gebruikt voor overeenkomsten in aspecten van de bouw of functie tussen verschillende diersoorten, die niet het gevolg zijn van directe afstammingsverwantschap (homologie) en/of gelijke embryonale ontwikkeling. Meestal is de analogie dan het gevolg van de noodzaak vergelijkbare levensproblemen op te lossen, dus van zogenaamde convergente evolutie. Voorbeeld: vleugels van insecten en vogels.
- Anomale contour* Een contour (rand of lijn) die gezien wordt, maar er in feite niet als zodanig is. Het bekendste voorbeeld is de Kanisza-driehoek, waarbij drie pacman-achtige figuurtjes op de hoekpunten een driehoek suggereren en men dan meent een contour te zien tussen

het binnenste van de driehoek en de achtergrond (figuur 7).

Axon Uitloper van een zenuwcel, die de reactie van de cel op prikkeling doorgeeft aan een volgende zenuwcel, of aan een spiercel of een endocriene cel (een cel die bij elektrische prikkeling een hormoon afscheidt). Langs de axonen van zenuwcellen worden normaal gesproken zogenaamde actiepotentialen voortgeleid, pulsvormige verstoringen van de membraanspanning.

Calibreren De meeteenheden van een waarnemingssysteem of ander meetsysteem gelijkmaken aan de meeteenheden van een referentiesysteem, een 'standaard'. Zo kan het visuele systeem bij vele diersoorten de afstand- of richtingbepaling van het gehoorsysteem calibreren.

Catastrofe Plotselinge (veelal noodlottige) wending; iets wat de bestaande situatie op zijn kop zet. Hier gebruiken we de term ongeveer in de zin van de wiskundige catastrofetheorie voor een plotselinge kwalitatieve verandering van de waarneming. Als we bijvoorbeeld ons hoofd om de hoek van de straat bewegen, treedt een visuele catastrofe op, doordat we plotseling dingen zien die eerst niet gezien konden worden.

Causaliteit Oorzakelijkheid. In de filosofie en natuurwetenschap zijn over causaliteit veel discussies gevoerd, bijvoorbeeld over de vraag of de relatie tussen oorzaak en gevolg al of niet een kansrelatie kan zijn, of er al dan niet verschillende soorten oorzakelijke verbanden zijn, enzovoorts.

CGL Corpus geniculatum laterale, het visuele deel van de *thalamus*.

Convolutie Letterlijk: ineenrollen. Hier heeft het betrekking op een bewerking, waarbij allereerst een visueel beeld wordt vermenigvuldigd met een 'weegfunctie' (zie *DOG-functie*) gecentreerd op een bepaald beeldpunt. Dan wordt dit herhaald met dezelfde weegfunctie gecentreerd op een volgend beeldpunt en zo verschuift en vermenigvuldigt men verder tot alle beeldpunten aan de beurt zijn geweest. Daarna worden alle producten per beeldpunt bij elkaar opgeteld. Het resulterende nieuwe beeld is dan de convolutie van de weegfunctie met het beginbeeld. Het netvlies doet een dergelijke bewerking op het beeld wat de receptoren opvangen, en levert het resultaat als neuronale activiteit af aan de uitgangscellen, de *ganglioncellen*.

Cortex Hersenschors. De cortex van zoogdieren bestaat bijna overal uit zes cellagen met een intensieve wirwar van onderlinge celverbindingen. Er zijn regionale bedradings- en celvormverschillen, die het mogelijk maken aparte gebiedjes (*areas*) te onderscheiden aan hun verschillende 'neuroarchitectuur': zie figuur 20. Ook is er een globale indeling in frontale (vooraan gelegen), pariëtale (boven de slapen

gelegen), temporale (onder de slapen gelegen) en occipitale (achteraan gelegen) cortex, die allen weer verder worden onderverdeeld. Bijvoorbeeld: orbitofrontale cortex is het deel van de frontale cortex vlakbij de orbita (oogkas), de inferotemporale cortex is het onderste deel (inferior) van de temporale cortex.

Dead reckoning Zie *gegist bestek*.

Distaal Het verst van het midden of centrum verwijderd. Bij het zenuwstelsel is distaal 'aan de buitenzijde' en proximaal 'meer binnenin'. Bij zintuigsystemen is distaal dan 'eerder' in de signaalweg en proximaal 'later'.

DOG-functie Difference-of-Gaussians, het verschil van twee *Gauss-functies*, namelijk van een smalle positief gerekende en een brede negatief gerekende klokfunctie (Gauss-functie). De *DOG-functie* ziet er ongeveer uit als de doorsnede van een sombrero. Deze functie gebruikt men wel als weegfunctie voor de beschrijving van de convolutieoperatie (zie *convolutie*) die het netvlies op optische beelden zou uitvoeren.

Ecologische fysica Deze wetenschap onderzoekt onder andere dat wat in principe aan de omgeving waargenomen zou kunnen worden, ongeacht door welk organisme. Het gaat daarbij dus om de potentiële (in plaats van feitelijke) koppelingen tussen organismen en omgeving. Zie ook *oecologisch*.

Emergentie Het 'ontstaan' van nieuwe eigenschappen bij voldoende complexe gehelen, die niet al in de onderdelen zijn vervat. De eigenschap van hardheid, of vloeibaarheid, is niet te vinden op moleculair niveau; pas als er voldoende moleculen in een bepaald verband bijeenkomen, duikt de nieuwe eigenschap op (emergeert).

Empirisme De filosofische denkrichting die alle kennis fundeert of wil funderen op de ervaring, de empirie. Meestal nemen empiristen aan dat de waarneming de (enige) bron is van alle kennen.

Endocrien Betrekking hebbend op de interne uitscheiding van hormonen. In het neuro-endocriene systeem zijn neuro-endocriene cellen die enerzijds door zenuwcellen elektrisch geprikkeld kunnen worden en dan anderzijds hormonen afscheiden in de bloedbaan. Deze cellen koppelen het zenuwstelsel aan het hormoonsysteem.

Epigenese Het deel van het ontwikkelingsproces van het individu waarbij er een voortdurende interactie is tussen genetische programma's, de al ontstane structuren of processen, en de omgeving van het individu.

Euclidisch Op de meetkunde van Euclides gebaseerd. Sinds de vorige eeuw weten we dat er naast de vertrouwde Euclidische meetkunde, waarin parallelle lijnen elkaar niet snijden, ook geldige niet-Euclidische meetkundes zijn waarvoor deze parallellenstelling niet geldt.

- Exteroceptie* De waarneming van externe omstandigheden en gebeurtenissen. Dit staat tegenover interoceptie, de waarneming van interne processen en toestanden van het eigen lichaam. Het staat ook tegenover proprioceptie, de waarneming van de eigen houding en beweging.
- Fourier-componenten* De sinusfuncties (zie *sinus*) waaruit men een willekeurige golfvorm op kan bouwen zijn de Fourier-componenten van die golfvorm. De stelling van Fourier garandeert dat we elke golfvorm uit een verzameling sinusfuncties met verschillende parameters (frequentie, amplitude en fase) kunnen opbouwen.
- Fourier-spectrum* De totale verzameling sinusfuncties met hun amplitude- en fasewaarden, waaruit we een willekeurige functie kunnen opbouwen, heet het spectrum van die functie. Meestal geeft men het spectrum grafisch weer met de sinusfrequentie langs de horizontale as en de bijbehorende amplitudes (in het amplitudespectrum) en fasen (in het fasespectrum) verticaal.
- Front-end systeem* De eerste verwerkingslagen van een informatieverwerkend systeem. Bij het visuele systeem noemt men meestal netvlies, *CGL* en de primaire visuele cortex tezamen het 'front-end' systeem. Ook spreekt men in dit verband wel over 'early vision', maar dat is onwenselijk, omdat 'early' in de ontwikkelingsbiologie de betekenis heeft van 'vroeg in het leven', in plaats van 'vooraan in het systeem'.
- Frontoparallel* Parallel met de voorzijde van het lichaam als dat in de primaire houding (zonder verdraaiingen) staat. Als we een muur recht voor ons zien, loodrecht op de kijklijn, is de muur dus frontoparallel.
- Ganglion, ganglia (mv.)* Een afgebakende opeenhoping van zenuwcellen noemt men wel een ganglion (tegenwoordig meestal 'hersenkern'). De uitgangscellen van het netvlies noemt men meestal 'de' ganglioncellen, hoewel hier eerder van een laag cellen sprake is dan van een 'kern'.
- Gauss-functie* Dit is een klokvormige wiskundige functie. Degenen die iets van statistiek weten kennen de functie van de zogenaamde 'normale' of Gaussische verdeling.
- Gegist bestek* Een vorm van positie- en routebepaling tijdens navigatie (zie *navigeren*), waarbij op gezette momenten wordt nagegaan in welke richting en over welke afstand men vanaf het vorige meetpunt is gevorderd en wat dat betekent voor de positie waar men zich naar schatting bevindt. Daaruit schat men dan de volgende af te leggen 'vector' (traject met richting en lengte). Het is de methode van navigeren van de vroegere ontdekkingsreizigers en vroegere zeelui.
- Gonade* De geslachtsklier, waar eicellen of spermacellen worden aangemaakt.

- Hersenprogramma* Plan voor actie vastgelegd in neuronale netwerken.
- Hippocampus* Een hersendeel aan de binnenzijde van de temporaalcor-
tex (zie *cortex*), dat in *frontoparallelle* doorsnede de vorm van een zee-
paardje heeft (waar de naam van is afgeleid). De hippocampus speelt
onder andere een belangrijke rol in het geheugen van zoogdieren.
- Homeostase* Het proces van het handhaven van een zo constant moge-
lijk intern milieu van een organisme.
- Homoiothermie* Het proces van het constant houden van de lichaams-
temperatuur ongeacht de omgevingstemperatuur, zoals we dat bij
vogels en zoogdieren vinden. Het staat tegenover poikilothermie.
Men noemt homoiotherme dieren ten onrechte wel eens ‘warm-
bloedig’, maar dat is geen goede term, omdat het bloed van een kro-
kodil of hagedis (poikilotherme dieren) in de zon warmer kan zijn
dan van de mens (een homoiotherm dier). Het gaat dus niet om de
waarde van de lichaamstemperatuur (koud of warm), maar om het al
of niet door het lichaam zelf constant houden van de temperatuur.
- Homologie* Overeenkomstige structuren bij verschillende soorten die
van overeenkomstige embryologische oorsprong zijn, tengevolge
van de gemeenschappelijke afstammingsgeschiedenis van de be-
schouwde soorten. De vleugels van vogels en onze armen, of de
vleugels van vleermuizen en onze handen zijn homologe structuren.
(Vergelijk dit met *analogie*).
- Homunculus* Het hypothetische kleine mensje in de mens dat beslist en
waarneemt op basis van de interne representatie van externe omstan-
digheden. Als de buitenwereld als film op de primaire visuele cortex
beschikbaar zou zijn, zoals sommige theorieën aannemen, zou een
homunculus naar die film in de cortex moeten kijken en de film in
een ervaring, de waarneming, om moeten zetten. In de meeste mo-
derne theorieën tracht men met meer of minder succes de homuncu-
lus te elimineren.
- Hypothalamus* Hersendeel aan de onderzijde van de voorhersenen bij
vertebraten, dat als hoofdregelcentrum voor de *homeostase* optreedt.
- Lesie* Beschadiging. In dit boek betreft het steeds een beschadiging van
een cortexdeel of hersenkern, die leidt tot een merkbare gedrags-
stoornis.
- Limbsch systeem* Limbus is rand of grens. Het limbsch systeem vormt
als het ware de grens tussen enerzijds primaire, secundaire en tertiaire
cortexgebieden en anderzijds de tussenhersenen (diëncefalon) en
hersensam. Men kent er een rol aan toe in emotie, motivatie en ge-
heugen. Van de cortex omvat het de mediale delen van de pariëtale,
frontale en temporale cortex.
- Loodsen* Dit is navigeren door bekend gebied met gebruikmaking van
de bekende bakens en routes. Vereisten voor loodsens zijn bij dieren zijn

dat het dier de eigen ruimtelijke oriëntatie kan meten en sturen, bakens kan leren kennen en onthouden en enige tijd een vaste koers aan kan houden.

Machinezien Bij pogingen machines (computers) zo in te richten dat ze via een soort visuele sensor, zoals een televisiecamera, objecten of ruimtelijke omstandigheden kunnen detecteren en classificeren spreekt men enigszins overmoedig over ‘machinezien’.

Membraanreceptor In een *synaps* wordt door *actiepotentialen* in het presynaptisch membraan (zie axon) een pakketje *neurotransmitter* vrijgemaakt, dat via de synapsspleet naar het postsynaptisch membraan reist, waar de transmittermoleculen hechten aan een membraaneiwit dat receptormolecuul heet. Als zo’n molecuul een transmittermolecuul bindt, maakt het direct of indirect een soort opening (kanaaltje genoemd) waardoor geladen deeltjes, ionen, de postsynaptische cel kunnen in- of uitstromen. Daardoor verandert de membraanspanning en kan eventueel een actiepotentiaal ontstaan.

Memem Een term die door Dawkins is ingevoerd naar analogie van ‘genen’. Het zijn naar zijn opvatting de kleinste replicerende elementen van kennis en cultuur. Het woord komt van memory, geheugen. Het is immers per definitie de kleinste eenheid van het collectieve geheugen van de mensheid.

Midsagittaal Het midsagittale vlak is het links-rechts-symmetrievlak van dieren.

Monoculair Eénogig. Wordt vaak gebruikt als we één oog wel en het andere juist niet willen stimuleren: monoculaire stimulatie.

Mycoplasma Het kleinste eencellige organisme dat nog een autonoom metabolisme heeft en dus niet zoals virussen voor replicatie afhankelijk is van andere cellen. Het organisme heet ook wel PPLO (‘pleuropneumonia-like organism’) en kan bij mensen longontsteking veroorzaken. Het gewicht is van de orde van grootte 0,000 000 000 000 1 gram (= 10^{-13} gram).

Nativisme De filosofische opvatting die ervan uitgaat dat veel van de kennis (of zelfs alle kennis) aangeboren is en door denken expliciet gemaakt kan worden. Nativisten wantrouwen de waarneming en vertrouwen het ‘zuivere’ denken en staan daarmee tegenover empiristen (zie empirisme).

Navigeren Navigatie is door het organisme zelf gestarte en gestuurde, gerichte beweging om een vermoed of bekend doel te bereiken. Het woord komt oorspronkelijk van navigatio (varen), maar heeft tegenwoordig een zeer brede betekenis in de biologie. Soorten navigatie zijn: gegist bestek, loodsen en kompasnavigatie, waarbij men met ‘kompas’ iedere globale richtingreferentie bedoelt (magneetveld, zon, polarisatierichting licht, elektrische velden, chemische gradiën-

ten, enzovoorts).

Neerwaartse causatie Hiervan spreekt men als een hoger organisatie-niveau van een systeem de oorzakelijkheid (causale samenhangen) op een lager niveau in het systeem bepaalt. Als macroscopische structuren bijvoorbeeld direct invloed hebben op de onderliggende microscopische processen zijn deze laatste geen voldoende verklarende grond voor het gedrag van het geheel en werkt reductie dus niet. Neerwaartse causatie wordt daarom als een verschijnsel gezien dat tegen het reductionisme spreekt.

Neuron Zenuwcel

Neurotransmitter Chemische stof, die als boodschapper fungeert in een *synaps*, de contactspleet tussen twee communicerende zenuwcellen.

Neuropeptiden Peptiden die een rol spelen als neurotransmitter of als modulator van de neurotransmissie in het zenuwstelsel. Peptiden zijn ketens aminozuren die te kort zijn om eiwit genoemd te worden.

Nucleus accumbens Een hersenkern die wel tot het *limbische systeem* wordt gerekend en onderdeel lijkt te zijn van het straf-beloningssysteem.

Objectpermanentie Het besef dat een object niet verandert of verdwijnt als het even uit zicht is, en het vermogen het object te onthouden tot het weer opduikt na een occlusie.

Occlusie Technische term voor het geheel of gedeeltelijk afdekken van een object A door een object B, dat gezien vanuit de waarnemer ervoor staat. B is dan het occluderende en A het geoccludeerde object.

Oecologisch Moderne spelling: ecologisch. De biologische discipline die de wederzijdse koppeling tussen organismen en omgeving en tussen organismen onderling centraal stelt, heet oecologie of ecologie. Iedere aanpak waarin het netwerk van wederzijdse koppelingen serieus wordt genomen geeft men tegenwoordig wel het voorvoegsel 'ecologisch'.

Ontogenese, ontogenie De ontwikkelingsgeschiedenis van een individueel organisme (of een bepaald onderdeel van het organisme) vanaf het stadium van de bevruchte eicel tot volwassenheid of tot een ander beschouwd moment.

Ontologie De leer van het 'zijnde', van dat wat 'is'. Vanuit de kennis-theorie is veel kritiek geleverd op het idee dat het zinnig zou zijn zich met een zijnsleer (ontologie) bezig te houden. Het is onderdeel van de metafysica, een evenmin onder wetenschapsfilosofen, praktiserende wetenschappers of kennistheoretici populaire tak van de filosofie.

Parallax Onuitgelijndheid. Als objecten niet op dezelfde kijklijn liggen hebben ze voor de waarnemer parallax. Als de waarnemer beweegt verandert de parallax en uit die verandering, de zogenaamde 'bewegingsparallax', kan men informatie halen over de relatieve afstanden

van objecten ten opzichte van de waarnemer. Het binoculaire (tweeogige) zien levert een extra vorm van parallax, omdat de parallax van twee objecten voor ieder oog verschillend is. Binoculaire parallax heet ‘dispariteit’ en is de basis van stereozien.

Paramecium Pantoffeldiertje, een algemeen in zoet water voorkomend eencellig organisme, dat zich met zweepkaartjes voortbeweegt en daarbij afhankelijk van de chemische samenstelling van de omgeving ook buitelingen maakt.

Perceptible Een als eenheid waarneembare entiteit. Deze Engelse term wordt vooral in de directe-perceptietheorie van Gibson en volgelingen gebruikt. Ook abstracte concepten kunnen ‘perceptibles’ zijn, zoals tweeheid en dergelijke.

Poikilothermie Het aannemen van de temperatuur van de omgeving. Men noemt poikilotherme dieren ten onrechte wel koudbloedige dieren: zie voor verdere toelichting *homoiothermie*.

Primaat Orde van zoogdieren waartoe de mens, apen en mensapen behoren.

Proprioceptie Waarneming van de eigen houding en beweging, onder andere via de proprioceptoren, receptoren in spieren, gewrichten, aanhechtingen en dergelijke. We weten tegenwoordig dat bijvoorbeeld ook de ogen, oren en het evenwichtsorgaan bijdragen aan de proprioceptie, dus is de term ‘proprioceptoren’ enigszins achterhaald. Alle sensorsystemen lijken zowel aan de proprioceptie als aan de exteroceptie bij te dragen.

Prosopagnosia Gezichtsblindheid, een *agnosie* specifiek voor gezichten, waarbij de patiënten geen agnosie voor andere objecten (hoeven te) hebben.

Proximale stimulus Proximaal is het dichtst bij het centrum, de binnenzijde, gelegen en staat tegenover ‘distaal’.

Psychofysica De studie van de relatie tussen fysische prikkels en psychische processen, meestal waarnemingsprocessen of attentie en geheugen. In het eenvoudigste voorbeeld van een psychofysisch experiment wordt de waarnemer als elementaire detector van prikkels ingezet om na te gaan waar de waarnemingsgrenzen liggen. Een grote serie prikkels met variabele sterkte wordt dan aangeboden en de waarnemer drukt op één knop als hij/zij iets ziet, en op een andere als hij/zij niets ziet. De drempelwaarde kan men dan definiëren als die sterkte waarbij nog net $x\%$ (bijvoorbeeld 75%) van de keuzes goed is. Methodologisch is dit onderzoeksgebied inmiddels erg veel verder ontwikkeld dan dit voorbeeld aan kan geven.

Quale, qualia (mv.) Dit zijn introspectief toegankelijke elementaire waarnemingen, bijvoorbeeld de visuele ervaring van een kleur, zoals rood, of de elementaire visuele ervaring van beweging. De quale is

het gevoelsaspect van die waarneming: bijvoorbeeld hoe het voor een bepaalde persoon aanvoelt om rood te zien.

- Retina* Netvlies. Een gelaagd systeem met zo'n zes hoofdklassen zenuwcellen in drie lagen en een enorme variëteit binnen de hoofdklassen aan zenuwcellen van verschillende vorm (40-60 subklassen) met verschillende neurotransmitters.
- Retino-corticaal* In het visuele systeem vat men alles tot en met de primaire visuele cortex op als 'front-end'. Er zijn vele zijtakken tussen retina en cortex (zie figuur 26), maar de baan die uiteindelijk door gaat en retinale informatie in de cortex brengt, noemt men de retino-corticale baan. Deze omvat alle retinale cellagen (zie *retina*), het *CGL* (zie daar) en de primaire visuele cortex, of althans de lagen daarin waar de axonen (zie *axon*) van het *CGL* binnenkomen.
- Saccade* Oogsprong, een ruksgewijze verplaatsing van ons oog tussen twee fixaties. We tasten de wereld visueel voortdurend (niet-bewust) af met afwisselingen van fixaties en oogsprongen.
- Sense data* Letterlijk 'zintuiggegevens'. Er is een groep perceptietheorieën die men wel 'sense data' theorieën noemt. Ze gaan ervan uit dat de waarneming begint met op zich betekenisloze meetgegevens uit de sensoren (receptorlagen) en dat deze atomen van de perceptie door een proces van intern (onbewust) redeneren in zinvolle verbanden worden vertaald. Dit idee staat tegenover het uitgangspunt van theorieën die stellen dat alleen zinvolle samenhangen (Gestalten, invarianten) worden opgepikt uit de wereld, zodat er geen betekenisloze meetwaarden worden toegelaten en geen interne redeneringen nodig zijn.
- Sensor* Een sensor is een verzameling (veelal een soort matrix van) elementaire omzetteren (receptoren) die één zeer bepaalde vorm van energie omzetten in een energievorm en code waarmee het systeem dat de sensor gebruikt overweg kan. De laag staafjes en kegeltjes in ons netvlies is een lichtsensor, de verzameling haarcellen in het slakkenhuis vormt een geluidssensor, enzovoorts.
- Sensorische systemen* Een sensorisch systeem bestaat uit tenminste één sensor en de verwerkingsapparatuur om de sensordata te interpreteren. Voorbeelden: visueel systeem, auditief systeem, reuksysteem, haptisch systeem (meerdere soorten sensoren), enzovoorts. Analooq aan de term visuomotor gebruiken we 'sensorimotor' als samentrekking om hersenprogramma's aan te duiden waarbij sensorische en motorische processen geheel geïntegreerd zijn.
- Sensorium* Naam die wel gebruikt wordt voor de totale verzameling sensorische systemen van een organisme. Het sensorium is bij verschillende soorten veelal verschillend samengesteld. Tegenover het sensorium stelt men dan het motorium, de totale verzameling van

uitgangssystemen van het zenuwstelsel, zoals de spieren en klieren. Volgens het dualisme worden sensorium en motorium gekoppeld via reflexen (bij mens en dier) en de 'bewuste geest' (alleen bij de mens). Deze indeling in ingang, uitgang en wat daartussen ligt is nogal primitief van aard.

Septum Letterlijk: tussenschot. Hier is het een hersenkern in het limbische systeem, die deel uit lijkt te maken van het straf-beloningssysteem van vertebraten (hoofdstuk 5).

Sinus Hier bedoelen we er de sinusfunctie uit de wiskunde mee. Deze functie kan men bijvoorbeeld zichtbaar maken door een strook papier met constante snelheid horizontaal langs een aan een veer harmonisch op en neer trillende tekenstift te laten lopen.

Sinusraster Een patroon waarbij de lichtintensiteit in één richting volgens een sinusfunctie (zie *sinus*) periodiek toe- en afneemt en in de richting daar loodrecht op overal dezelfde waarde heeft. Zo'n patroon ziet eruit als een traliepatroon dat onscherp is afgebeeld. Het is (dankzij het theorema van Fourier) een elementaire stimulus voor onderzoek aan het ruimtelijk onderscheidingsvermogen van lenzen en visuele systemen.

Slim mechanisme Een mechanisme dat een doel bereikt via een verrassend handige oplossing, die precies in dat verband de beste lijkt. Een aantal onderzoekers meent dat levende organismen veel van dit soort slimme mechanismen omvatten. In die zin zouden ze sterk verschillen van vele mensgemaakte systemen, zoals computers, die steeds dezelfde algemene elementaire stapjes (opdrachten) gebruiken in verschillende combinaties bij de oplossing van verschillende problemen.

Solipsisme Het idee dat we alleen zeker kunnen weten dat we zelf bestaan (of althans onze geest), omdat al het andere dat we menen te ervaren wel eens spontaan opgewekt zou kunnen worden in onszelf. Alles is dan een illusie van de geest (virtual reality), behalve die ene geest die van zichzelf zeker weet dat hij/zij die illusies ervaart. Men gebruikt de hierop geïnspireerde term 'diersoortsolipsisme' wel voor de analoge opvatting dat alleen de mens een (bewuste) geest heeft en kan denken, maar andere dieren niet.

Subitizing Een slecht vertaalbare Engelse term voor het verschijnsel van het direct kunnen waarnemen van aantallen, dus zonder expliciet te tellen. Veel dieren, inclusief de mens, kunnen meteen zonder te hoeven tellen het verschil zien tussen twee en drie of tussen drie en vier objecten, ongeacht hoe slordig die objecten zijn uitgestald. Het verschil tussen 23 en 24 objecten kunnen we niet direct waarnemen zonder tellen of ordenen in herkenbare patronen.

Substraat Grondlaag of voedingsbodem. De term wordt hier vaak ge-

bruikt in de algemenere betekenis 'stof of structuur waarvan iets gemaakt is of waarmee iets gedaan wordt'. Voorbeeld: Het substraat van het denken is het brein.

Synaps Contact tussen twee communicerende neuronen, waarbij meestal een aankomend axon het presynaptische (het signaal verzendende) membraan vormt vanwaar, via de synapsspleet, een neurotransmitter kan worden verzonden naar het ontvangende (postsynaptische) membraan.

Systemisch Inherent aan het systeem of door het hele systeem verspreid.

Tectum opticum Kerngebied in het 'dak' van de middenhersenen waar een neuronale 'kaart' gevonden wordt van de retina of het visuele veld. Bij lagere vertebraten lijkt het tectum het hoogste visuele integratiecentrum te zijn, terwijl dit bij hogere vertebraten de diverse visuele cortexgebieden zijn. In dat laatste geval lijkt de homologe structuur (zie ook *homologie*), de colliculus superior, onder andere voor de sturing van oogbewegingen verantwoordelijk te zijn.

Tegmentum Kern die veelal tot het limbische systeem wordt gerekend en waarin neuronen liggen die iets te maken lijken te hebben met het straf- en beloningssysteem. Veel 'geluks'drugs grijpen hierop aan. Zie hoofdstuk 5.

Thalamus Kerngebied in de tussenhersenen waar vrijwel alle informatie van de zintuigen doorheen gaat op weg naar de cortex. Men noemt de thalamus daarom wel 'de poort naar het bewustzijn'. Het CGL is de visuele deelkern van de thalamus.

Theorema van Fourier De stelling dat iedere (mathematisch 'redelijke') functie beschreven kan worden als de som van een verzameling sinusfuncties van verschillende frequenties, amplituden en fasen. Zie ook *Fourier-componenten* en *Fourier-spectrum*.

Vector, vectorveld Een vector is een grootte met een richting en lengte. Men stelt een vector wel als pijl voor. Als een veld kan worden beschreven door een verzameling meetpunten waarbij in ieder meetpunt een richting en grootte van een fysische grootte kan worden gemeten, kan men het veld opvatten als een geordende verzameling vectoren, als een vectorveld. Een voorbeeld is het optische-stroomveld, zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Ventrikel Holte of kamer. Hier gebruikt voor de hersenkamers of hersenholtes, ruimten gevuld met vloeistof waarin zich geen zenuwcellen bevinden. Langs de wand van de hersenholten bevinden zich cellen, de ventriculaire cellen, waaruit in de embryonale fase de hersencellen door deling zijn ontstaan.

Vertebraat Gewerveld dier.

Visuomotor Dit woord is een samentrekking van visueel en motorisch. Het wordt gebruikt om processen te beschrijven waarbij de visuele

waarneming en de motorische handeling als geïntegreerd geheel werken. Het vangen van een bal is een voorbeeld van zo'n visuomotor-actie.

Literatuur

- Andel P. van (1994). Anatomy of the unsought finding. Serendipity: Origin, history, domains, traditions, patterns and programmability. *British Journal of Philosophical Science* 45, 631-648.
- Armstrong D.M. (1968). *A materialist theory of the mind*. Routledge & Kegan Paul, London.
- Armstrong D.M. (1978). Between matter and mind. *Times Literary Supplement* Feb.17, p.183.
- Arzt V., Birmelin I. (1995). *Haben Tiere ein Bewusstsein?* Goldman Verlag, Taschenbuchausgabe.
- Attneave F. (1971). Multistability in perception. *Scientific American* 225, December, 63-72.
- Baars B.J. (1993). How does a serial, integrated and very limited stream of consciousness emerge from a nervous system that is mostly unconscious, distributed, parallel and of enormous capacity? In: *Experimental and theoretical studies of consciousness*. John Wiley & Sons, Chichester, 282-291.
- Baddeley A., Della Sala S. (1996). Working memory and executive control. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B* 351, 1397-1404.
- Bear M.F. (1997). How do memories leave their mark? *Nature* 385, 481-482.
- Bermond B. (1996). Dierenleed: een neuropsychologische analyse van moedwil en misverstand. *Nederlands Tijdschrift voor de Psychologie* 51, 121-134.
- Blackmore J. (1979). On the inverted use of the terms 'realism' and 'idealism' among scientists and historians of science. *British Journal of Philosophical Science* 30, 125-134.
- Blakemore C. (1994). *The mind machine*. Penguin Books, London.
- Block N. (1995). On a confusion about a function of consciousness. *Behavioral and Brain Sciences* 18, 227-287.
- Boden M.A. (1988). Artificial intelligence and biological intelligence. In: *Intelligence and evolutionary biology*. Eds. Jerison H.J & Jerison I. Springer Verlag, Berlin, 45-71.
- Bohr N. (1938, 1959). *Atomfysik og menneskelig erkendelse*. J.H.Schultz Forlag, København.
- Bouman M.A., Grind W.A. van de, Zuidema P. (1985). Quantum fluctuations in vision. *Progress in optics* Vol. 22, 79-144.
- Boysen S.T., Berntson G.G., Shreyer T.A., Hannan M.B. (1995). Indicating acts during counting by a chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology* 109, 47-51.

- Breland K., Breland M. (1961). The misbehavior of organisms. *American Psychologist* 16, 681-684.
- Breland-Bailey M. (1986). Every animal is the smartest: Intelligence and the ecological niche. In: Hoage & Goldman, 1986.
- Bullock T.H. (1984). Comparative neuroscience holds promise for quiet revolutions. *Science* 255, 473-477.
- Bunge M. (1980). *The mind-body problem*. Pergamon Press, Oxford.
- Calvin W.H. (1996). *How brains think*. Basic Books, Harper Collins, New York.
- Calvin W.H., Ojemann G.A. (1994). *Conversations with Neil's brain. The neural nature of thought and language*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., USA
- Churchland P.S. (1986). *Neurophilosophy*. MIT Press, Cambridge Mass., USA
- Churchland P.M. (1992) *Matter and consciousness* (revised edition). A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge Mass., USA.
- Churchland P.M., Hooker C.A. (1985). *Images of science. Essays on realism and empiricism*. With a reply from Bas C. van Fraassen. The University of Chicago Press, Chicago.
- Clark A. (1980). *Psychological models and neural mechanisms. An examination of reductionism in psychology*. Clarendon Press, Oxford.
- Colby C.L., Duhamel J.-R. (1996). Spatial representations for action in parietal cortex. *Cognitive Brain Research* 5, 105-115.
- Connor C.E., Gallant J.L., Preddie D.C., Van Essen D.C. (1996). Responses in area V4 depend on the spatial relationship between stimulus and attention. *Journal of Neurophysiology* 75, 1306-1308.
- Crick F. (1994). *The astonishing hypothesis. The scientific search for the soul*. Simon & Schuster, London.
- Crick F. & Koch C. (1995). Are we aware of neural activity in primary visual cortex? *Nature* 375, 121-123.
- Cruikshank S.J., Weinberger N.M. (1996). Evidence for the Hebbian hypothesis in experience-dependent physiological plasticity of neocortex: a critical review. *Brain Research Reviews* 22, 191-228.
- Curio E. (1978). Cultural transmission of enemy recognition: One function of mobbing. *Science* 202, 899-901.
- Davis H. (1996). Underestimating the rat's intelligence. *Cognitive Brain Research* 3, 291-298.
- Davis H., Pérusse R. (1988). Numerical competence in animals: definitional issues, current evidence and a new research agenda. *Behavioural and Brain Science* 11, 561-616.
- Dawkins M.S. (1993). *Through our eyes only? The search for animal consciousness*. W.H. Freeman Spektrum, Oxford.
- Dawkins R. (1982). *The extended phenotype*. Freeman, San Francisco.
- Degeneaar M. (1992). *Het probleem van Molyneux*. Proefschrift Erasmus Universiteit Rotterdam, Universiteitsdrukkerij Erasmus, Rotterdam.
- Degeneaar M. (1996). *Molyneux's problem*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Dennett D. (1992). *Het bewustzijn verklaard*. Pandora pockets. Uitgeverij Contact.

- Dennett D. (1996). *Kinds of minds*. Basic Books, Harper Collins, New York.
- DeValois R.L., DeValois K.K. (1988). *Spatial vision*. Oxford University Press, Oxford.
- Diamond M.C., Scheibel A.B., Murphy G.M., Harvey T. (1985). On the brain of a scientist: Albert Einstein. *Experimental Neurology* 88, 198-204.
- Eckhorn R., Bauer R., Jordan W., Brösch M., Kruse W., Munk M., Reitböck H.J. (1988). Coherent oscillations: a mechanism of feature linking in the visual cortex? *Biological Cybernetics* 60, 121-130.
- Edelman G.M. (1993). *Klare lucht, louter vuur. Over de stoffelijke oorsprong van denken en bewustzijn*. Uitgeverij Bert Bakker, Amsterdam.
- Emmeche C. (1991). A semiotical reflection on biology, living signs and artificial life. *Biology and Philosophy* 6, 325-340.
- Enquist M., Arak A. (1994). Symmetry, beauty and evolution. *Nature* 372, 169-172.
- Fischel W. (1932). Tierseelenkunde in Bildern. *Der Naturforscher* 9 (6), 3-8.
- Fraassen B.C. van (1985). Empiricism in the philosophy of science. In: Churchland P.M., Hooker C.A. (Eds).
- Friedman-Hill S.R., Robertson L.C., Treisman A. (1995). Parietal contributions to visual feature binding: evidence from a patient with bilateral lesions. *Science* 269, 853-855.
- Frisby J.P. (1979). *Seeing. Illusion, brain and mind*. Oxford Univ.Press, Oxford UK.
- Funahashi S., Kubota K. (1994). Working memory and prefrontal cortex. *Neuroscience Research* 21, 1-11.
- Futuyma D.J. (1982, 1995). *Science on trial. The case for evolution*. Sinauer Ass., Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Gallup G.G. (1970). Chimpanzees: self-recognition. *Science* 167, 86-87.
- Gallup G.G., Povinelly D.J., Suarez S.D., Anderson J.R., Lethmate J., Menzel E.W. (1995). Further reflections on self-recognition in primates. *Animal Behaviour* 50, 1525-1532.
- Gazzaniga M.S. (Ed.) (1994). *The cognitive neurosciences*. Bradford Book, MIT Press, Cambridge Mass.
- Gibson J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Houghton Mifflin Company, Boston.
- Gibson J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin Company, Boston.
- Glaserfeld E. von (1982) Subitizing: the role of figural patterns in the development of numerical concepts. *Archives de Psychologie* 50, 191-218.
- Glynn I.M. (1993). The evolution of consciousness: William James's unresolved problem. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 68, 599-616.
- Goldman-Rakic P.S. (1992). Working memory and the mind. *Scientific American* 267 (3), September, 72-79.
- Golledge H.D.R., Hilgetag C.C., Tovée M.J. (1996). A solution to the binding problem? *Current Biology* 6 (9), 1092-1095.
- Gombrich E.H. (1988). *Kunst en illusie. De psychologie van het beeldend weergeven*. De Haan, Houten.

- Gould J.L., Gould C.G. (1994). *The animal mind*. Scientific American Library, New York.
- Gould S.J. (1984). *The mismeasure of man*. Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middlesex, England.
- Gould S.J. (1977). The misnamed, mistreated, and misunderstood Irish elk. In: *Ever since Darwin. Reflections in natural history*. Penguin Books, Harmondsworth UK.
- Gray J.A. (1995). The contents of consciousness: A neuropsychological conjecture. *Behavioural and Brain Sciences* 18, 659-722.
- Griffin D.R. (1984). *Animal Thinking*. Harvard University Press, Cambridge Mass, USA.
- Grind W.A. van de (1984). Decomposition and neuroreduction of visual perception. In: *Limits in perception*. Eds. A.J.van Doorn, W.A. van de Grind, J.J.Koenderink. VNU Science Press, Utrecht, 431-494.
- Grind W.A. van de (1987). Vision and the graphical simulation of spatial structure. In: Crow F. and Pizer S.M. (Eds.). *Proc. 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, ACM, New York.
- Grind W.A. van de (1988). Visuele representatie van ruimtelijke structuur in geneeskunde en biologie. *Klinische Fysica* 88-2, 50-57.
- Grind W.A. van de (1990). Smart mechanisms for the visual evaluation and control of self-motion. In: *Perception and control of self-motion*, Eds.R.Warren, A.H.Wertheim. Lawrence Erlbaum Ass., Hillsdale, New Jersey. Chapter 14, 357-398.
- Grind W.A. van de (1995). De stoffelijke oorsprong van de geest. *Amsterdamse Boekengids* 3, 20-26.
- Grind W.A. van de (1996a). Neuroreductie van mentale verschijnselen. *Berichten uit Psychopolis* 11 (1), 1-8.
- Grind W.A. van de (1996b). Lichaam, geest en bewustzijn in biologisch perspectief. In: *In grote lijnen. Thema's in de natuurwetenschappen*. Studium Generale reeks 9602, 67-92. Universiteit Utrecht.
- Grüsser O.-J., Landis T. (1991). Visual agnosias and other disturbances of visual perception and cognition. *Vision and visual dysfunction* Vol.12, MacMillan Press, London.
- Haber R.N., Hershenson M. (1980). *The psychology of visual perception*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Harvey P.H., Clutton-Brock T.H. (1983). The survival of the theory. *New Scientist* 5 May 1983, 313-315.
- Hauser M.D., Kralik J., Botto-Mahan C., Garrett M., Oser J. (1995). Self-recognition in primates: Phylogeny and the salience of species-typical features. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 92, 10811-10814.
- Hebb D.O. (1949). *The organization of behavior*, Wiley, New York.
- Heron W. (1957). The pathology of boredom. *Scientific American* 196, 52-56.
- Herrnstein R. (1984). Objects, categories, and discriminative stimuli. In: H.L.Roitblat et al (Eds). *Animal Cognition*, Erlbaum, Hillsdale NJ.
- Heydt R.von der, Peterhans (1989). Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. I. Lines of pattern discontinuity. *Journal of Neuroscience* 9, 1731-1748.

- Heyes C.M. (1994). Reflections on self-recognition in primates. *Animal Behaviour* 47, 909-919.
- Heyes C.M. (1995). Self-recognition in primates: further reflections create a hall of mirrors. *Animal Behaviour* 50, 1533-1542.
- Hinde R.A., Fisher J. (1951). Further observations on the opening of milk bottles by birds. *British Birds* 44, 393-396.
- Hoage R.J., Goldman L. (Eds.) (1986). *Animal intelligence. Insights into the animal mind*. The Smithsonian Institution Press, Washington D.C.
- Hogan N., Kay B.A., Fasse E.D., Mussa-Ivaldi F.A. (1990). Haptic illusions: experiments on human manipulation and perception of 'virtual objects'. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. Vol. LV - The Brain. Cold Spring Harbor Laboratory Press: 925-931.
- Hopfield J.J. (1996). Transforming neural computations and representing time. *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA* 93, 15440-15444.
- Hubel D.H. (1988). Eye, brain, and vision. *Scientific American Library* #22, W.H. Freeman and Co., New York.
- Hunter G.K. (1996). Is biology reducible to chemistry? *Perspectives in Biology and Medicine* 40 (1), 131-138.
- Johnston R.A. (1994). Female preference for symmetrical males as a by-product of selection for mate recognition. *Nature* 372, 10 Nov. '94, 172-175.
- Jürgens V. (1974). The hypothalamus and behavioral patterns. *Progress in Brain Research* 41, 445-464.
- Kandel E.R., Hawkins R.D. (1992). The biological basis of learning and individuality. *Scientific American* 267 (3), September, 52-60.
- Kanizsa G. (1979). Organization in vision. Praeger Publ., New York.
- Kawai M. (1956). Newly acquired precultural behavior of the natural troop of Japanese monkeys on Koshima islet. *Primates* 6, 1-30.
- Kinsbourne M. (1993). Integrated cortical field model of consciousness. In: *Experimental and theoretical studies of consciousness*. John Wiley & Sons, Chichester, 43-51.
- Kitchen A., Denton D., Brent L. (1996). Self-recognition and abstraction abilities in the common chimpanzee studied with distorting mirrors. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 93, 7405-7408.
- Koenderink (1984a). The concept of local sign. In: *Limits in perception*. Eds. A.J. van Doorn, W.A. van de Grind, J.J. Koenderink. VNU Science Press, Utrecht, 495-547.
- Koenderink (1984b). Simultaneous order in nervous nets from a functional standpoint. *Biological Cybernetics* 50, 35-41.
- Koenderink (1984c). Geometrical structures determined by the functional order in nervous nets. *Biological Cybernetics* 50, 43-50.
- Koenderink J.J. (1986). Optic flow. *Vision Research* 26 (1), 161-180.
- Koenderink J.J. (1990). The brain as a geometry engine. *Psychological Research* 52, 122-127.
- Koenderink J.J., Doorn A.J. van (1976). The singularities of the visual mapping. *Biological Cybernetics* 21, 51-59.
- Koenderink J.J., Doorn A.J. van (1978). How an ambulant observer can con-

- struct a model of the environment from the geometrical structure of the visual inflow. *Kybernetik* 1978. Eds. Hauske & Butenandt. Oldenbourg Verlag, Munchen. 224-247.
- Koenderink J.J., Doorn A.J.van (1979). The internal representation of solid shape with respect to vision. *Biological Cybernetics* 32, 211-216.
- Koenderink J.J., Doorn A.J.van (1982). The shape of smooth objects and the way contours end. *Perception* 11, 129-137.
- Koenderink J.J. (1993). What is a feature? *Journal of Intelligent Systems* 3 (1), 49-86.
- Kosslyn S.M., Thompson W.L., Kim U., Alpert N.M. (1995). Topographical representations of mental images in primary visual cortex. *Nature* 378, 496-498.
- Krol J.D., Grind W.A. van de (1980). The double-nail illusion: Experiments on binocular vision with nails, needles, and pins. *Perception* 9, 651-669.
- Lankheet M.J.M., Verstraten F.A.J. (1995). Attentional modulation of adaptation to two-component transparent motion. *Vision Research* 35 (10), 1401-1412.
- LeDoux J. (1996). *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*. Simon & Schuster.
- Lee D.N. (1974). Visual information during locomotion. In: *Perception. Essays in honor of J.J. Gibson*. Eds. R.B. MacLeod, H.L. Pickett. Cornell University Press, Ithaca, 250-267.
- Lettvin J.Y., Maturana H.R., McCulloch W.S., Pitts W.H. (1959). What the frog's eye tells the frog's brain. *Proceedings of the Institutes of Radio Engineers* 47, 1940-1951.
- Libet B. (1993). The neural time factor in conscious and unconscious events. In: *Experimental and theoretical studies of consciousness*. John Wiley & Sons, Chichester, 123-137.
- Livingstone M.S., Hubel D.H. (1988). Segregation of form, color, movement and depth: anatomy, physiology, and perception. *Science* 240, 740-749.
- Lokhorst G.J.C. (1986). Brein en bewustzijn. Geest-lichaam theorieën van moderne hersenonderzoekers (1956-1986). *Rotterdamse Filosofische studies* 5, Uitgeverij Eburon, Delft.
- MacKay D.M. (1966). Cerebral organization and the conscious control of action. In: *Pontificiae Academiae Scientiarum, Scripta Varia* 30, Vol. Semaine d'étude sur cerveau et expérience consciente, 627-663.
- MacKay D.M. (1978). Selves and brains. *Neuroscience* 3, 509-606.
- Mandler G., Shebo B.J. (1981). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology General* 111, 1-22.
- Maunsell J.H.R. (1995). The brain's visual world: Representation of visual targets in cerebral cortex. *Science* 270, 764-769.
- Mayr E. (1982). *The growth of biological thought*. Belknap Press, Cambridge Mass.
- McCulloch W.S. (1965). *Embodiments of mind*. The MIT Press, Cambridge Mass.
- McFarland D. (1985). *Animal behaviour*. Longman Scientific & Technical.
- McMahon T.A., Bonner J.T. (1987). De maat van het leven. Hoe de natuur haar eigen wetten gehoorzaamt. *Natuur & Techniek*, Maastricht.
- Metzger W. (1975). *Gesetze des Sehens*. Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a.M.

- Milner P. (1996). Neural representations: Some old problems revisited. *Journal of Cognitive Neuroscience* 8, 1, 69-77.
- Motter B.C. (1994a). Neural correlates of attentive selection for color or luminance in extrastriate area V4. *Journal of Neuroscience* 14, 2178-2189.
- Motter B.C. (1994b). Neural correlates of feature selective memory and pop-out in extrastriate area V4. *Journal of Neuroscience* 14, 2190-2199.
- Mountcastle V.B. (1976). The world around us: Neural command functions for selective attention. *Neuroscience Research Program Bulletin* Vol 14, Supplement.
- O'Keefe J., Nadel L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Clarendon Press, Oxford.
- Parkin A.J. (1996). Human memory: The hippocampus is the key. *Current Biology* 6 (12), 1583-1585.
- Penrose R. (1989). *The emperor's new mind*. Oxford University Press, Oxford UK.
- Pepperberg I.M. (1991). A communicative approach to animal cognition: A study of conceptual abilities of an African grey parrot. In: *Cognitive ethology. The minds of other animals*, 153-186. Ed. C.A.Ristau. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, Hillsdale, New Jersey.
- Pfungst O. (1965). *Clever Hans: The horse of Mr. von Osten*. Holt, New York.
- Plate L., Sewertzoff A.N. (1931). Beobachtungen an Lumpi, dem klugen Hund von Weimar. *Zoologischer Anzeiger* Bd. 95, Hft 9/10, 250-254.
- Popper K.R. (1959). *The logic of scientific discovery*. Hutchinson & Co. Ltd.
- Popper K.R. Eccles J.C. (1977). *The self and its brain*. Springer International, Berlin.
- Rasmussen J.L., Rajecki D.W., Craft H.D. (1993). Humans' perceptions of animal mentality: ascriptions of thinking. *Journal of Comparative Psychology* 107 (3), 283-290.
- Ratliff F. (1965). *Mach bands: Quantitative studies on neural networks in the retina*. Holden-Day, Inc., San Francisco.
- Rey G. (1997). *Contemporary philosophy of mind. A contentiously classical approach*. Blackwell Publishers.
- Rock I. (1987). Beeld en verbeelding. Tussen kijken en zien. *Natuur en Techniek*, Maastricht en Brussel. (Oorspronkelijke titel Perception, 1984).
- Rohen J.W. (1975). *Funktionelle Anatomie des Nervensystems*. F.K. Schattauer Verlag, Stuttgart.
- Rolls E.T. (1994). A theory of emotion and consciousness, and its application to understanding the neural basis of emotion. Ch.72, pp. 1091-1106, In: M.S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences*. MIT Press, Cambridge Mass.
- Rosenthal R. (1911, 1965). *Clever Hans* [translated by C.L.Rahn, Edited by R. Rosenthal], Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Roth G., Wullimann M.F. (1996). Evolution der Nervensysteme und der Sinnesorgane. pp.1-31 In: *Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition*. Eds. J.Dudel, R.Menzel, R.F.Schmidt. Springer Verlag, Berlin.
- Rubin E. (1921). *Visuell wahrgenommene Figuren*. Gyldendals, Copenhagen.
- Rue L.L. (1964). *The world of the beaver*. Lippincott, Philadelphia.
- Runeson S. (1977). On the possibility of 'smart' perceptual mechanisms. *Scandinavian Journal of Psychology* 18, 172-179.

- Russell B. (1946, 1957). *History of western philosophy*. George Allen and Unwin Ltd, London.
- Sacks O. (1995). *Een antropoloog op Mars. Zeven paradoxale verhalen*. Meulenhof/Kritak, Amsterdam.
- Salmon W.C. (1973). Confirmation. *Scientific American*, May 1973, 75-83.
- Salzman C.D., Britten K.H., Newsome W.T. (1990). Cortical microstimulation influences perceptual judgments of motion direction. *Nature* 346, 174-177.
- Searle J. (1987). Minds and brains without programs. In: *Mindwaves*. Eds. C. Blakemore & S. Greenfield, Basil Blackwell, Oxford, 209-233.
- Shadlen M.N., Newsome W.C. (1996). Motion perception: Seeing and deciding. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93, 628-633.
- Shannon C.E., Weaver W. (1963). *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois Press, Urbana.
- Shatz C.J. (1992). The developing brain. *Scientific American* 267 (3), September, 34-41.
- Shen Y., Specht S.M., de Saint Ghislain I., Li R. (1994). The hippocampus: A biological model for studying learning and memory. *Progress in Neurobiology* 44, 485-496.
- Singer W. (1993). Synchronization of cortical activity and its putative role in information processing. *Annual Review of Physiology* 55, 349-374.
- Squire L.R., Zola S.M. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93, 13515-13522.
- Sternberg R.J. (1985). Human intelligence: The model is the message. *Science* 230, 1111-1118.
- Stoerig P. (1996). Varieties of vision: from blind responses to conscious recognition. *TINS* 19 (9), 401-406.
- Stoerig P., Cowey A. (1995). Visual perception and phenomenal consciousness. *Behavioural Brain Research* 71, 147-156.
- Swaddle J.P., Cuthill I.C. (1994). Female zebra finches prefer males with symmetric chest plumage. *Proceedings of the Royal Society of London Series B* 258 (1353), 267-271.
- Todt D. (1975). Social learning of vocal patterns and modes of their applications in Grey parrots. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 39, 178-188.
- Treisman A. (1996). The binding problem. *Current Biology* 6, 171-178.
- Treue S., Maunsell J.H.R. (1996) Attentional modulation of visual motion processing in cortical areas MIT and MST. *Nature* 382, 539-541.
- Turner R.S. (1994). *In the eye's mind. Vision and the Helmholtz-Hering controversy*. Princeton University Press, Princeton New Jersey.
- Tye M. (1991) *The imagery debate*. MIT Press, Cambridge Mass. USA
- Van Essen D.C., Anderson C.H., Felleman D.J. (1992). Information processing in the primate visual system: An integrated systems perspective. *Science* 255, 419-423.
- Verstraten F.A.J., Fredericksen R.E., Grind W.A. van de (1995). Het bewegingsnaeffect: een nieuwe kijk op een oud fenomeen. *Nederlands Tijdschrift voor de Psychologie* 50, 213-222.

- Vogel G. (1997). Scientists probe feelings behind decision-making. *Science* 275, 1269.
- Vroon P. (1989). *Tranen van de krokodil. Over de te snelle evolutie van onze hersenen*. Ambo, Baarn.
- Walker S. (1983). *Animal thought*. Routledge & Kegan Paul, London.
- Waterman T.H. (1989). *Animal navigation*. Scientific American Library, W.H.Freeman and Cy., New York.
- Weiskrantz L. (1996). Blindsight revisited. *Current Biology* 6, 215-220.
- Weizenbaum J. (1976). *Computer power and human reason*. W.H.Freeman and Cy., San Francisco.
- Went F.W. (1968). The size of man. *American Scientist* 56 (4), 400-413.
- Wickelgren I. (1997). Getting a grasp on working memory. *Science* 275, 1580-1582.
- Wilson L. (1968). *My beaver colony*. Doubleday, Garden City, New York.
- Wilson L. (1971). Observations and experiments on the ethology of the European beaver (*Castor fiber* L.), a study in the development of phylogenetically adapted behaviour in a highly specialised mammal. *Viltrevy, Swedish Wildlife* 8, 117-266.
- Wong-Riley (1979). Changes in the visual system of monocularly sutured or enucleated cats demonstrable with cytochrome oxidase histochemistry. *Brain Research* 171, 11-28.
- Young J.Z. (1978). *Programs of the brain*. Oxford University Press, Oxford UK.
- Zeki S. (1993). *A vision of the brain*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Ziman J. (1978). *Reliable knowledge*. Cambridge University Press, Cambridge UK.

Index

- 2D-graaf 149
A(cces)-bewustzijn 256
Aandacht 20, 305
 visuele 20
Aangeboren denkproces
 108
 idee 107
 leervermogen 31
Aanleg 35
Aantalbegrip 157
Aanvoelen 22
Aanwijsgedrag 97
Aanwijzing 110
Aanzicht 148
 canoniek 149
Aap Helen 288
Absolute drempelmeting 98
Abstraheren 131
Accellereren 52
Achromatisch contrast 226
Actie-perceptie-lus 259
Actiepatroon
 vast 16, 41
Actiepotentiaal 55, 95
Actieprogramma
 vast 40
Actieve waarneming 123
Activatie
 diffuse 253
Activiteit
 doelgerichte 16
 neuronaal 44
 sensorimotor 53
Activiteitsgolf
 ritmische 233
Activiteitspatroon 176
 corticaal 177
Adaptatie 96
 -raster 263
Adaptieve hersenactiviteit
 16, 57
Adaptiviteit 22
Afasie 214, 218
Affordance 138
Afschuiving ('shear') 171
Afsplitsingspunt 205
Afstammingslijn 205
Aftastapparaat 182
 -beweging 257
 -mechanisme 283
Aggregatie 116
Agnosie 218
 apperceptieve visuele 289
 associatieve 289
 simultaan- 235
Algebra van Boole 42
Algemene denkwetten 75
Algoritmische 43
Allometrie 208
Amacriene cel 174
Amandelkern (amygdala)
 271, 306
Amfetamine 273
Amnesie
 anterograde 306
Amygdala 271, 306
Analogie 6
 in denken en voelen 6
 in gedrag 6
Analogiepostulaat 6, 56, 64
antropomorf 6
 intermenselijk 6
 interspecies 104
 mens-dier 7
 mens-machine 7
Analogieredenatie 5, 242
Analysator
 sensorische 29
Analytisch oordeel 117
Andel, P. van 73
Anecdотische aanpak 9
Animisme 86
Animist 86
Anomale contour 125
Antagonisme
 centrum-omgeving 167,
 174
Anticipatie 22
Anticiperen 28
Antidualist 191
Antireductionist 85
Antropomorf analogiepos-
tulaat 6
Antropomorfe evolutie-
schaal 205
Arak, A. 128
Area 214
 4 261
 5 217
 7 217
 17 216
 18 216
 19 216
 39 211
 42 214
 44 214
 V4 297
Argument of design 76
Aristoteles 86
Armprojectieneuron 219
Armstrong, D.M. 182, 283
Array
 optic 136
Artefact 128
Arzt, V. 9, 250
Ascii-code 42
Associatie 13, 37, 55, 108
 intersensorische 109
 -keten 26
Associatief geheugen 110
Associatiegebied 216
 -keten 26
 -theorie 110
Astereognosie 217
Astrologie 77
Attentie 20, 284
 -focus 298
 - gradiënt 298
 - onderzoek 296
 - venster 235
 visuele 258
Attneave, F. 124
Auditieve cortex
 primaire 216

- Automatische handeling 283
 Autonome reactie 32
 Autonomie 49, 57, 165, 245
 Axiomastelsel 77
 Axon 56, 175

 Baars, B.J. 283, 284
 Baddeley, A. 305
 Baken 164
 Balk tussen hersenhelften 215
 Barbituraten 273
 Bear, M.F. 307
 Bedevaart 81
 Bedrijfssysteem (operating system) 277, 282, 291, 304
 Bedrog, 23
 Beelddenken (imagery) 17, 234
 Beeldgenerator 142
 Beeldinversie -probleem 174
 Beeldsequentie 139
 Beeldspraak foutieve 78 misleidende 82
 Begrijpen 62
 Behaviorisme 32, 194
 Bekrachtiger 29 negatieve 27, 30 positieve 27, 30
 Bekrachtiging 27 negatieve 31 positieve 30 schema 33
 Beloningssysteem A10-groep 273 neuronaal 128
 Benzodiazepine 273
 Berggeit 120
 Berkeley, G. 108, 119, 167, 196
 Bermond, B. 248, 254, 267, 271
 Beschrijfbaar 64
 Bever 23, 25
 Beweging gemeenschappelijke 170 naeffect 170 schijnbare 170
 Bewegingsblindheid 289 -detector 170 -informatie 230 -naeffect 170, 223, 301 -parallax 142, 226
 -zien 223
 Bewijzen 77
 Bewust denken 18, 20 handelen 20
 Bewust proces localiseerbaar 286 modulair 286
 Bewust waarnemen 258
 Bewuste automaat de mens als 239
 Bewustzijn 238 A(cces)-bewustzijn 256 autonome agenten 285 criteria voor 20 E(rvarings)-bewustzijn 257 menselijk 247 multiple drafts model 285 P(henomenal)-bewustzijn 256 representationeel 256 T(oegang)-bewustzijn 257 visueel 262
 Bewustzijnsdeeltje 242 -fysici 242 -inhoud 284
 Bidden 81
 Bijgeloof 55, 64
 Bijverschijnsel 239
 Bijlarten 20
 Binair getal 82
 Bindingsprobleem 178, 233
 Binoculair zien 264
 Binoculaire rivaliteit 262 stimulatie 225
 Bio-informatie 185
 Biologie evolutionaire 93
 Bipedale voortbeweging 53
 Bipolaire cel 174
 Birmelin, I. 9, 250
 Bischoff, T. 208
 Bistabiele figuur 124
 Black box 72
 Blackmore, J. 197
 Blakemore, C. 240
 Blindheid bewegings- 289 kleuren- 288
 Blindzien 254, 287
 Blob 224
 Block, N. 247, 248, 254, 255
 Boden, M.A. 135
 Bohr, N. 186, 199, 241
 Bonner, J.T. 208, 243
 Boodschap 115
 Boodschapper 274
 Bottom-up 121, 212 methode 177
 Bouman, M.A. 100
 Bouwplan 86 samenhang met schaal 243
 Bovennatuurlijke krachten 86
 Boyle, R. 107
 Boysen, S.T. 158
 Brein 180
 Breland, K. 36
 Breland-Bailey, M. 36
 Britten, K.H. 230
 Broca gebied van (area 44) 214
 Broca, P. 207
 Brodman, K. 211, 214, 221
 Brouwer, L.E.J. 158
 Bruikbaar 77
 Bruikbare kennis 62
 Buitenaardse wil 188
 Bundel moleculen 192
 Bundelingsprobleem 178
 Bunge, M. 190

 C-vezel 195
 Calibratie postnatale 45
 Calvin, W.H. 229, 242
 Camouflagedoorbreking 127
 Campbell, D.T. 88
 Canon (tekenschema) 132
 Canoniek aanzicht 149
 Capaciteitsbeperking 283
 Cartesiaanse dualist 186
 Catastrofe 280 visuele 148
 Categorieënverwarrende vraag 184
 Categorische representatie 130
 Categoriseren 116, 159
 Causale effectiviteit 188 koppeling 50 relatie 83 samenhang 42, 55, 67
 Causaliteit 74, 108, 188
 Cel
 Aan-centrum 174 amacriene 174 bipolaire 174 ganglion- 174 monoculaire 264

- oriëntatieselectieve 225
- Uit-centrum 174
- Celgemeenschap 233
- Cell assembly 260
- Centraal programma 38
- Centrale verwerkingseenheid 82
- Cerebellum 307
- CGL 236
- Chemisch aanspreekbaar 273
- Chemische taal 90
- Chiasma 286
- Chimpansee 22, 278
- Chimpens 196
- Christelijke ideaal 92
- Churchland, P.M. 190, 202
- Churchland, P.S. 6
- Classificatie
 - probleem 289
- Classificatiemeting
 - tweewaardige 98
- Clavan, Dr. 77
- Cocaine 273
- Cognitie 3, 238
- Cognitief ondoordringbaar 54
- Cognitief proces 2
- Cognitieve factoren 270
 - functie 135
 - kaart 33, 164
 - middelen 45
 - propositie 129
 - vaardigheid 248
- Cognitio 212
- Coherente beweging 127
 - oscillatie 233
- Coherentie 54
- Coïncidentie 67
 - detectie 55, 307, 309
 - principe 54
- Coïncideren 54
- Colby, C.L. 309
- Colliculus superior (cs) 222, 295
- Collineariteit 227
- Coma 253
- Commandoneuron 169
- Communicatie 22, 23
 - taalvrije 248
- Communicatievermogen 252
- Comparator 285
- Competitieve kritiek 62, 68
- Complementariteitstheorie 186, 241
- Complex moleculair 85
- Complexe handeling 19
 - organisatie 85
- Complexiteit
 - van een object 151
- Compressiegolf 192
- Computationale
 - neurowetenschap 82
 - psychologie 82
- Computer 81
 - animatie 142
 - beeldpresentatie 141
 - programma 43
- Concept
 - macroscopisch 84
 - analyse 73, 79
- Conditioneren 246
 - klassiek 28
- Conditionering
 - klassieke 306
 - operante 32, 33
- Connor, C.E. 297
- Consensus
 - principe 63
- Consolidatie 307
- Constructie uit ervaring 203
- Constructief empirisme 202
- Constructivistisch empirisme 203
- Contactinstabiliteit bij robots 53
- Continue angst 80
- Continuïteit
 - evolutionair 1, 16, 56
- Contralateraal 217
 - contralaterale oog 222
 - contralaterale syndroom 217
- Contrast 122
 - achromatisch 226
 - illusie 122, 175
 - signaal 174
 - taal 167
 - tint- 226
 - versterking 122
 - zien 168
- Conventie 43
- Convergente evolutie 204
- Convolutie 176, 210
- Copernicus 79, 107
- Corpus callosum (balk) 215, 224
- Corpus geniculatum laterale (CGL) 175, 221, 287
- Correlatiestructuur 236
- Cortex 113, 175, 236
 - corticale 'schets' 169
 - inferotemporale 271
 - orbitofrontale 271
 - pariëtale 217, 295
 - prefrontaal- 305
 - prefrontale 261, 304
 - premotor- 261
 - primaire motor- 261
 - subcorticale kern 310
 - temporaal- 305
 - visuele 262
- Cortexgebied 113
 - visueel 221
- Corticale 'schets' 169
 - kaart 235
- Cowey, A. 264
- Creatie van leven 77
- Creationist 76
- Creativiteit 48, 255
- Crick, F. 70, 237, 261, 263
- Criterium
 - taxonomisch 38
- Cue 110
- Culturele overdracht 23
- Cultuurpessimist 87
 - symbool 155
- Curio, E. 39
- Cuthill, I.C. 128
- Cytoarchitectonische kenmerken 214
- Cytochroom oxidase kleuring 224
- Da Vinci, L. 212
- Damasio, A. 304
- Dansen 19
- Darmen 274
- Darwin, C. 3, 239
- Davis, H. 157
- Dawkins, M.S. 9, 247
- Dead reckoning 163
- Decompositieprobleem 214
- Definitie 73
- Deformatie 146, 147
 - component 171
- Degenaar, M. 119, 173
- Degeneratie
 - postnatale 119
- Della Sala, S. 305
- Demarcatielijn 92
- Dementie 308
- Denkcategory 184
- Denken 3, 8, 16, 308
 - beeld- 17
 - bewust 18, 20
 - ethologische criteria voor 22
 - magisch 66
 - niet-bewust 19

- subjectieve 63
- taal- 17
- teleologisch 74
- zuiver 107
- Denkgereedschap 77
 - inhoud 256
- Denkproces 117
 - natuurlijke schaal 16
- Denksubstantie 188
 - vermogen 7, 15
- Denkwetten
 - algemene 75
- Dennett, D. 245, 247, 285
 - Multiple Drafts Theory 248
- Depolarisatie
 - postsynaptische 56
 - presynaptische 56
- Depolariseren 54, 55
- Deprivatie
 - sensorische 260
 - studie 119
- Descartes, R. 3, 108, 181
- Detectie
 - van gemeenschappelijke beweging ('common fate') 170
- Detector 98
 - bewegings- 170
 - 'bug'- 168
 - grootmoeder- 169
 - ideale 98
 - lijn- 169
 - patroonherkennings- 169
 - rand- 169
 - vlieg- 169
- Determinisme 89
- Deterministisch 202
- DeValois, K.K. 169
- DeValois, R.L. 169
- Diamond, M.C. 211
- Diepte-interpretatie 290
- Diepteordening 126, 145
- Dier 1
 - Dier-habitat interactie 7
- Dierenleedlobby 248
- Diersoortonafhankelijk 17, 156
- Difference of Gaussians (DOG) 176
- Diffuse activatie 253
- Direct realisme 152, 171, 200
- Direct waarnemen 156
- Directe-perceptietheorie 121, 152, 171, 260
- Discrepantie bij theorie-
 - evolutie 67
- Disocclusie 154
- Dispariteitsinformatie 290
- Dispositie 35
- Distale stimulus 110
- Doe-lus 259
- Doelen van dieren
 - afgeleide 18
 - hoofd- 18
- Doelgerichtheid 50
 - doelgericht gedrag 18
 - doelgerichte activiteit 16
 - het begrip doelgericht 96
- Doelstelling 90
- DOG-functie 176
- Dolfijn 303
- Domeingebondenheid 48
- Doolhofleren 213
- Doorn, A.J. van 136, 146, 148, 151, 153, 158, 171
- Dopamine 273
- Draft 285
- Drempelmeting
 - absolute 98
 - verschil- 98
- Driedimensionale (3D-)
 - structuur 141
- Driehoek 122
- Driehoeksverhouding
 - als motivatie voor gedrag 251
- Driesch, H. 86
- Drift 33
- Dualisme
 - eigenschaps- 183
 - informatie-materie 184
 - interactionistisch 181
 - niet-mystiek 184
 - volks- 189
- Dualist 102
 - anti- 191
 - Cartesiaanse 186
- Duhamel, J.-R. 309
- Duif 159
 - Duim in oppositie 53
- Dürer, Albrecht 132, 133
 - kinderkopjes 132
- Dwardsdispariteit 167
- Dynamisch patroon 90
- E-bewuste sensatie 265
- E(rvarings)-bewustzijn 257
 - interruptiefunctie van 268
- Eccles, J.C. 88, 181, 237
- Echolocatie 238, 252
- Ecologische fysica 58, 135
- Ecovoedsel 80
- Edelman, G.M. 237
- Eekhoorn 164
- Effectiviteit
 - causale 188
- Egobeweging
 - exploratieve 141
- Egyptische voorstellingen 130
- Ehrensteinillusie 125
- Eigenschap
 - emergente 190
- Eigenschapsdualisme 183
 - pluralist 189
- Eindiging ('spine' of 'cusp') 147
- Einstein, A. 202, 211
- Electroencefalogram (EEG) 213
- Elementarisme 109, 121
- Eliminatie-reductionisme 102
 - fysicalisme 194
- Emergente eigenschap 190
- Emergentie 90, 122
- Emergentisme 190
- Emmeche, C. 185
- Emotie 3, 238, 303
 - E-bewust deel 268
 - negatieve 267
 - niet-bewust deel 267
 - positieve 267
 - T-bewust deel 268
- Emotionele lading 258
- Empirisch adequaat 203
- Empirisme 58
 - constructief 202
 - constructivistisch 203
 - klassiek 108
- End-stopped-cel 225
- Energetisch-materieel
 - proces 88
- Enquist, M. 128
- Entelechie 86
- Entiteit 74
 - fysisch-chemische 102
 - mentale 102
- Epifenomeen 239
 - neutraal 240
- Epifenomenalisme 190
 - omgekeerd 190
- Epigenese 70
- Epigenetisch proces 54
- Epilepsie 254
 - epilepticus 255
 - epileptische foci 229
- Epistemologie 4, 62
- Equal-time rechtzaak 76

- Equiluminantie 226
 Equivalentieklasse 116, 130
 perceptuele 155
 Ervaring
 hedonische 128
 met cognitieve inhoud 268
 specifieke 5
 subjectieve 5
 Ervaringskennis 7, 117
 Essentie 131, 132
 Establishment 79
 Esthetisch gevoel 127
 Ethologie 22, 37, 96
 ethologische criteria 22
 Euclides
 meetkunde van 120, 165
 Evenwichtsorgaan 276
 Evidentie 66
 Evolutie
 convergente 204
 Evolutietheorie 193, 239, 280
 Evolutionair bioloog 76
 Evolutionaire biologie 93
 continuïteit 1, 16, 56
 innovatie 247
 Evolutionist 76
 Excitatie 30
 excitatieve invloed 175
 Expansie 171
 -detector ('looming'-detector) 171
 Expansiesnelheid
 retinale 171
 Expliciet beschrijfbaar 65
 Exploratie 37
 -beweging 144
 exploratieve egobeweging 141
 Exploreren 22, 35, 136
 systematisch 28
 tactiel 217
 Externe programmeur 184
 waarnemer 18, 49

 Faciliteren 166
 Factor
 verborgen 98
 Falsificatie 65
 Feature Integration Theory (FIT) 235
 Fechner, G.T. 188
 Feiten 78
 Fenomenologische natuurkunde 200
 Fiets 42, 91
 Fietsen 19, 257
 Film 142
 Filterlaag
 front-end 176
 Fisher, J. 23
 Fitness 96
 Fixeren 297
 Flexibiliteit 255
 Flow
 optic 136
 Foneem 216
 Fonologische lus 284, 293
 Formatie
 reticulaire 253
 Fouriercomponent 122, 169
 Foutieve beeldspraak 78
 Fovea 139, 175, 309
 Fraassen, B.C. van 202
 Frenoloog 212
 Friedman-Hill, S.R. 235
 Front-end systeem 112
 Frontaalkwab 215, 261
 Frontoparallele vlak 145
 Fruitvlieg 307
 Functie 90
 cognitieve 135
 -localisatie 58
 onbelichaamd 196
 zingevende 116
 Functionalisme 195, 196
 Functionalist 194, 195
 Functioneel herstel 119
 verband 88
 Functionele module 214
 Fundamenteel onderzoek 72, 73
 Futuyama, D. 76
 Fylogenese
 van het zenuwstelsel 205
 Fylogenetisch 4, 42, 269
 gradueel ontwikkeld 280
 Fylogenie 4
 Fysica
 ecologische 58, 135, 310
 Fysicalisme 181, 241
 Fysicist 84, 187
 Fysico-chemisch proces 95
 Fysiologische factoren 270
 Fysisch concept 181
 proces 194
 realisme 182
 Fysisch-chemisch proces 84
 Fysisch-chemische entiteit 102

 Fysische randvoorwaarden 184, 196
 wetmatigheden 182, 184

 Galenus, Claudius 212
 Galileo Galilei 94, 107
 Gallup, G.G. 278
 Ganglion
 basaal 261
 -cel 174
 globus pallidus 261
 striatum 261
 substantia nigra 261
 Garcia, J. 31
 Gauss, K.F. 206, 210
 Gebarentaal 250
 bij dolfinen 252
 Gebedsgenezers 80
 Gebruiksdoel 91
 -waarde 138
 Gedachtenexperiment 65, 196
 Gedrag
 doelgericht 18
 instrumentachtig 98
 intentioneel 184
 natuurlijk 34, 56
 visueel geleid 275, 288
 wangedrag 34
 zelfherkennings- 279
 zelfreferentie- 279
 zelfverplaatsend 49
 zelfverzorgend 49
 Gedragskenmerk
 meetbaar 103
 Gedragspatroon
 stereotiep 38
 Gedragsprogramma 37, 96
 -tendentie 103
 Gedragsvariatie
 spontane 35
 Gedragsveld 217
 -verschil 90
 Gegevensopslag
 gedistribueerde 308
 Geest bestek 163
 Geheugen 307
 associatief 110
 -cel 306
 declaratieve 306
 episodisch 271
 herkennings- 294
 -mechanisme 293
 niet-declaratieve 306
 positie- 294
 -proces 269, 308
 -spoor 56

- sporen 271
- stoornis 308
- synaps- 307
- Geit 13
- Gelijke vorm 126
- Geloof 76, 83
- Geluid 192
- Gemeenschappelijk lot 127
- Gemeenschappelijke beweging 170
- Gemoedstoestand 103
- Geneeskunde 80
- Geneswetenschap 80
- Generalisatie 30
- Genotscomponent 128
- Geografische kennis 164
- Geometrie 146
 - differentiaal- 146
- Geometrisch probleem 308
- Geometrische basisrelatie 132
 - transformatie 309
- Georganiseerd proces 96
 - scepticisme 62
- Gereedschapsgebruik 23
- Gesloten systeem 78
- Gestalt
 - psychologie 213
 - theorie 121
 - traditie 168
- Gestalt-wet
 - van de figuurcomplete-
ring 126
 - van de goede voortzetting
126
- Gestressed 81
- Geulincx, A. 188
- Geurvlag 165
- Gevoelens opkroppen 81
- Gevoelswaarde
 - van gebeurtenissen 267
- Gevolgtrekking
 - onbewuste 109
- Gewaarwording 109
 - elementaire 108
- Gewoonte 33, 307
- Gewrichtsrotatieneuron 219
- Gezichtsblindheid 169, 289
- Gezichtsdetector 231
- Gezichtsscherpte 179
- Gezichtsveld 179
- Gibson, J.J. 112, 123, 138, 140, 152, 158, 171, 275
- Glanspunt 148
- Glaserfeld, E. von 156
- Gliacel 211
 - gliacel/zenuwcel-verhou-
ding 211
- Globale werkruimte 284
 - model 284
- Globalist 212
- Glynn, I.M. 239
- Gnostisch neuron 168, 169
- Gnostische-neuronentheo-
rie 169
- Goddelijke inspiratie 132
- Gogh, Vincent van 128
- Goldman-Rakic, P.S. 295
- Golledge, H.D.R. 233
- Gombrich, E.H. 129, 130, 133
- Gonaden 274
- Gorilla 279
- Goudvis 13
- Gould, C.G. 23, 35, 251
- Gould, J.L. 23, 35, 251
- Gould, S.J. 46, 206, 278
- Graaf 148
 - 2D- 149
- Gradualisme 280
- Graduele lichtovergang 175
- Gratiolet, L.P. 207
- Gray, J.A. 284
- Griffin, D.R. 19
- Grind, W.A. van de 77, 90, 137, 166, 171, 237, 286
- Groeperingsmechanisme 126
- Grootmoederdetector 138
- Grüsser, O.-J. 173, 212, 218, 289, 291
- Habitat 56
 - factor 90
 - koppeling tussen dier en
304
- Hallucinatie 107, 261
- Handelen
 - bewust 20
- Handeling
 - automatische 283
 - complexe 19
 - onnatuurlijke 28
- Haptische systeem 113
- Hauser, M.D. 279
- Hawkins, R.D. 292
- Hebb, D.O. 55, 260
- Hedonisch systeem 129
- Hedonische aandrijving
 - ervaring 128
 - fitness verhogende 128
- Hegel, G.W.F. 78
- Hellingdefinitie 146
- Hellingenvectorveld 146
- Helmholtz, H. von 109, 118
- Hemianopie 287
- Heraclitus 258
- Hering, E. 118
- Herinnering
 - motorische 119
- Herinneringsbeeld 229
- Herintredende gegevens 234
- Heroïne 273
- Heron, W. 260
- Herrnstein, R. 159
- Hersenactiviteit
 - adaptieve 16, 57
- Hersengebied 100
- Hersengewicht
 - gemiddelde 207
- Hersenlesie 213
- Hersenmassa 206, 244
 - relatieve 208
 - van misdadigers 208
- Hersenmetrist 207
- Hersenonderzoek 58
 - visueel 310
- Hersenoperatie 229
- Hersenprogramma 44, 52, 83, 268, 281, 304
 - initieel 54
 - voor zwemmen 52
- Hersenschakeling 80
- Hersenschors 113, 175
 - pariëtale 217
- Hersenstam 253
 - toestand 260
- Heyes, C.M. 278, 279
- Heymans, G. 194
- Hiëroglief 130
- Hinde, R.A. 23
- Hint-stimulus 294
- Hippocampus 56, 274, 292, 306
 - plakje 307
- Hodgson, Shadworth 239
- Hogan, N. 53
- Hogere-orde variabele 135, 136
- Holisme 86
 - super- 87
- Holist 187
- Homeopathie 77
- Homeostase 45, 49, 50, 80
 - homeostatisch systeem
271
 - in de hersenen 80

- Homeostatische aspecten 270
- Homiothermie 208
- Homunculus 110, 200, 232
-probleem 121, 200, 232
- Honnecourt, Villard de 133
- Hoofddoel
van organisme 49
van dier 18
- Hooker, C.A. 202
- Hopfield, J.J. 310
- Hormoon 80
-systeem 271
- Houdingsreflex 276
- Hubel, D.H. 168, 221, 224
- Hull, C.L. 32
- Hume 108, 117
- Humphrey, N.K. 288
- Hunter, G.K. 93
- Huxley, T.H. 190, 239
- Huygens, C. 107, 186
- Hyperpolariseren 55
- Hypothalamus 44, 271, 273
- Hypothese
koppel- 64
- Hypothetische constructie 73
- Ideae innatae 107
- Idealisatie 94
- Idee 116, 197
angeboren 107
- Identiteitstheorie 183, 194
teken-teken 194
type-type 194
- Iets uit niets 181
- Ik-gevoel 274
-kennis 275
- Illusie 107, 110
- Imitatie
van soortgenoten 37
- Implementatie 196
- Imprinting 38
- Improviseren 34
- Indirecte-perceptietheorie 110
- Inferotemporale cortex (IT) 271
- Informatie 115, 184
bio- 93
-drager 92
metrische 145
-proces 80
technische 93
-theorie 81
- Informatieve invariant 135
- Informatieverwerking
in de hersenen 81
terminologie 82
- Inhibitie 30
laterale 177
- Inhibitieve invloed 175
- Initieel hersenprogramma 54
- Inprenten 38
- Instelpunt 50
van regelsysteem 44
- Instinctief 38
- Instructie 37
- Instrumentachtig gedrag 98
- Integriteit lichamelijke 50
- Intelligentie 7, 45, 47, 49, 180, 206, 238, 308
flexibele aspecten van 46
gekrystalliseerd vermogen 46
kunstmatige 2
lichamelijke 46, 50, 135
machine- 48
natuurlijke 2, 3
-test 46
- Intentie 184
- Intentioneel gedrag 184
- Interactie
dier-habitat 7
- Interactieve computergrafica (virtual reality) 137
- Interactionistisch dualisme 181
- Intern proces 38
- Intern projectiescherm 173
- Intern scherm 121
- Interne representatie 44
toestand 98
- Interrupt 240, 277
- Interruptfunctie 270, 283
van E-bewustzijn 268
- Intersensorische associatie 109
- Interspecies analogiepostulaat 104
- Interveniërende variabele 34, 38
- Introspectie 5, 117
-argument 191
- Introspectief 21
- Ondoordringbaar 54
- Intuïtie 304
- Invariant 153
informatieve 135
van de optische stroom 136
van hogere orde 123
- Invariant verband 13
- Invariante natuurwet 89
- Invariantie 13
eeuwige 91
in datastromen 123
informatief 15
irrelevant 14
relevant 14
- Invoelen 22
- Involprogramma 38, 39
- Inzicht 8, 25, 26
ruimtelijk 118
- Ipsilateraal oog 222
- Iriskrijker 80
- Irreducibel 191
- Irreducibiliteit 191
- Isolatie van hoofdzaken 94
- Jaloezie
als motivatie voor gedrag 251
- James, W. 190, 239, 249, 267
- James-Lange theorie van emoties 190
- Johnston, R.A. 128
- Jürgens, V. 273
- Kaakloze vis 205
- Kaartachtige representatie 235
- Kaartlezen 218
- Kandel, E.R. 292
- Kanizsa, G. 126, 127
- Kanizsa-figuren 125
- Kant, I. 117, 165
- Karma 81
- Kat 192
- Kawai, M. 23
- Kegel
gegeneraliseerde 146
- Kenmerk
optisch 140
- Kennis 64
a posteriori 117
a priori 117, 165
angeboren 111
meetkundige 165
natuurkundige 135
persoonlijke 64
publieke 62
wetenschappelijke 62, 64
zelfverworven 23
- Kennismolecuul 117
- Kennisrepresentatie 269
- Kepler, J. 173
- Keppler 107
- Ketenreflex 34

- Keuzevrijheid 49
 Kijken
 monoculair 142
 Kijkpunt 136
 Kijkrichtinglijn 146
 Kikker 168
 Kinsbourne, M. 285
 Kitchen, A. 276
 Klassiek conditioneren 28
 Kleurcontrastgevoelige cellen 225
 Kleurenblindheid
 corticale 288
 Kleurinformatie 225, 297
 Klinker 216
 Knobbelkaart 212
 Koch, C. 261, 263
 Koenderink, J.J. 136, 146, 148, 151, 153, 158, 171, 236, 309
 Koershouden 164
 Kolomvormig cluster 230
 Kompas 162
 -richting 162
 Koppelhypothese 64, 176, 269
 individueel specifiek 103
 soortspecifiek 103
 Koppeling
 causale 50
 dier-habitat 304
 Kosslyn, S.M. 234
 Krachtenvrijheid 94
 Krall, K. 10
 Krallse paarden 10
 Kritiek
 competitieve 62, 68
 Kritische massa 244
 Krol, J.D. 166
 Kruisen 52
 Kubus 149
 Kuiken 120
 Kunstmatige intelligentie 2
 prikkel 28
 Kwaliteit van waarnemen 8
 Kwantummechanica 203, 241
 -theorie 90, 182
 -zwaartekracht 242
 Landis, T. 173, 212, 218, 289, 291
 Landkaart 71
 Langdurig lijden 249
 Langetermijngeheugen (LTG)
 declaratief 292
 nondeclaratief 292
 Langetermijnpotentiatie 56
 Lankheit, M.J.M. 301
 Latent leren 35
 LeDoux, J. 304
 Lee, D.N. 171
 Leerdispositie
 soortspecifieke 35
 Leermechanisme
 synaptisch 260
 Leermethoden 26
 -processen 26
 Leervermogen
 aangeboren 31
 soortspecifiek 12
 Leeuw 133
 Leeuwenhoek, A. van 107
 Leibniz, G.W. 108, 188
 Leren 22, 308
 coïncidentiedetectie 55
 exploratie 37
 instrumenteel 26
 latent 35
 leermethoden 26
 leerprocessen 26
 one-trial-learning 37
 postnataal 45
 spelen 37
 trial-and-error 27
 Lesie 217
 Lettvin, J.Y. 168
 Levenskracht 85
 -verschijnsel 181
 -wetenschappen 84
 Liaison brain 181
 Libet, B. 293
 Lichaam-geest probleem 179
 Lichaamsinformatie
 kaart van 275
 Lichamelijk proces 180
 Lichamelijke integriteit 50
 Lichamelijke intelligentie 46, 135
 coïncidentieprincipe 54
 gedistribueerde 52
 Licht
 complementair karakter 186
 trillingsverschijnsel of deeltjesverschijnsel 186
 Licht- en donkeradaptatie 223
 Lichtenergie 122
 -gradient 165
 -intensiteitswaarde 121
 -patroon 176
 -sigitaal 174
 Lichtovergang
 graduele 175
 Lijndetector 169
 -ëindiging 125
 Limbisch systeem 129, 271
 septum 272
 LIP 309
 Livingstone, M.S. 221, 224
 Lobus frontalis 215
 occipitalis 215
 parietalis 215
 temporalis 215
 Locaalteken 235
 -informatie 236
 -probleem 235
 Localiseerbaarheid 286
 Localist 212
 Locke, J. 30, 108, 119, 196
 Locomotie 49
 Logische verwerking 108
 Logothetis, N.K. 262
 Lokhorst, G.J.C. 187
 Long-term depression (LTD)
 307
 potentiation (LTP) 307
 Loodsen 162, 163
 Lorber, J. 210
 Lord Kelvin 71
 Lorenz, K. 38
 Lotze, H. 118
 Luchtfoto 160
 -trilling 192
 Lucretius 107
 Lumpi
 slimme 10
 M(agno)-cel 221
 Maatschappelijke relevantie van wetenschappelijk onderzoek 272
 Mach, E. 175
 Mach-banden 175
 Machine-intelligentie 48
 Machinezien 111
 Machswet 209
 MacKay, D.M. 71, 183, 186
 MacLeod, D. 263
 Macromoleculair programma 54
 Macroscopisch concept 84
 Macroscopische structuur 88
 Magisch denken 66
 Magneetveld 165
 Magnocel 265
 Magnostimulus 265

- Makaan-aapje 23, 24, 261
 Malebranche, N. de 188
 Mandler, G. 156
 Manipulatieneuron 219
 Manipuleren
 van modellen 305
 Manoeuvreren 52
 Manuele responsie 219
 Massa 89
 kritische 244
 Materialisme 180
 Materialist 84
 Materie-energie 181
 Materieveld 181
 Mathematisatie 94
 Maturana, H.R. 168
 Maunsell, J.H.R. 298, 299,
 301
 Maxwell-vergelijking 90
 Mayr, E. 93
 McCulloch, W.S. 168, 185
 McFarland, D. 278
 McMahan, T.A. 208, 243
 Mechanisme
 slim 123, 162, 171
 Mechanistische denker 72
 Meetgegevens 89
 Meetkunde
 Euclidische 165
 Meetsysteem 121
 Melanine 286
 Membran 55
 postsynaptische 55
 -receptor 206
 Memen 247
 Memoria 212
 Mens 1
 denken en doen van 161
 Mentaal proces 2, 95, 179,
 194
 processen, 180
 Mentale entiteit 102
 toestand 100
 Mentalisme 241
 Mentalistische term 4
 Metafoor 70
 Metafysica 74
 Metatheorie 182
 Meting
 van de oogbeweging 297
 Metrische informatie 145
 Metzger, W. 127
 Micro-electrode 294
 Microscopisch proces 88
 Microstimulatie 230
 Middel tegen angst 62
 Midden-langetermijngje-
 heugen (MTG) 292
 Midsaggitale vlak 165
 Mier 161
 Mill, J.S. 108, 116
 Milner, P. 260
 MIP 309
 Misleidende beeldspraak 82
 Mitochondrion-enzym
 kleuring 224
 Mobbing call 39
 Modaliteit 109
 Model 71
 neuroreductionistisch 99
 Module
 functionele 214
 open 181
 Moeder natuur 79
 Moederdiscipline 92
 Mogelijke schets (draft) 285
 Mogelijkheden
 natuurlijke 79
 Molecuul
 complex 85
 Molyneux, W.
 probleem van 119
 Monisme 193
 neutraal 190, 193
 niet-materialistisch 183
 psychisch 193
 psychofisch 193
 Monitor
 van activiteiten 20
 Monocausale verklaring 193
 Monoculaire kijken 142
 Monoculaire cel 264
 representatie 264
 stimulatie 225
 Moreel principe 247
 Morfine 273
 Morgan's canon 22
 Motorcortex
 primaire 261
 Motorisch actieprogramma
 261
 Motorische herinnering 119
 Motorium 197
 Motorkaart 295
 activiteitsfocus 295
 geactiveerde kaartpositie
 295
 Motorprogramma 253
 leren van 29
 Motter, B.C. 299
 Mountcastle, V.B. 219
 Mozaïekstructuur 162
 MRI-scan 263
 Mug 79
 Müller, J. 118
 Multiple Drafts Theory 248
 Musicus 192
 Muzikant 93
 Mycoplasma 161
 Mystiek inzicht 87
 Na-apen 37
 Nabijheid 126
 Nadel, L. 121
 Naïef realisme 181
 Narcose 253
 van een kakkerlak 253
 Nativisme 58, 117
 Natuurconstante 89
 Natuurkunde 84
 fenomenologische 200
 Natuurlijk gedrag 34
 Natuurlijke intelligentie 2,
 3
 mogelijkheden 79
 schaal 16
 selectie 249
 Natuurwet
 invariante 89
 Natuurwetenschap 75
 Navigeren 162
 kompas- 162
 loodsen 163
 met gegist bestek 162,
 163
 Navigerende uitloper 54
 Necker-kubus 124
 Negatieve bekrachtiger 30
 Netvlies 173
 -afbeelding 173
 nasale deel 179
 temporele deel 179
 Neuro-endocrien proces
 180
 Neuroarchitectuur 211
 Neuro-endocriene regulatie
 271
 Neurologie 169
 Neuron 55, 206
 armprojectie- 219
 commando- 169
 gewichtsrotatie- 219
 gnostisch 169
 manipulatie- 219
 spierbewegings- 219
 Neuraal proces 95
 substraat 182
 symbool 156
 Neuronale activiteit 44
 plexus 259
 Neuronenverband 44

- Neuropeptiden 273
- Neuroreductie 58, 84, 95
mogelijkheden van 221
- Neuroreductionisme
pragmatisch 101
- Neuroreductionistisch model 99
- Neurotransmitter 95, 206
dopamine 273, 295
norepinefrine 295
- Neurowetenschap
cognitieve 296, 310
computationele 82
theoretische 310
- Neushoorn 79
- Neutraal monisme 190, 193
- Newsome, W.T. 230, 264
- Newton, Sir I. 94, 107, 186
- Niet-bewust denken 19
- Niet-bewuste processen 257
- Niet-deterministisch 89
inherent 89
- Niet-materialistisch monisme 183
- Nieuwsgierigheid 38, 73
- Nobelprijswinnaar 237
- Nominalisten 131
- Nonreductionisme 85, 90
- Nonreductionist 85
- Noordse stern 162
- Nottebohm, F. 216
- Nuboor, J.W.F. 160
- Nucleus
accessorische optische (AON) 286
suprachiasmaticus 286
van de tractus opticus (NTO) 286
- Nucleus accumbens 273
- O'Keefe, J. 121
- Object
als idee 197
ruimtelijk 140
- Object-versus-achtergrond 289
- Objectdetector 230
-permanentie 247
-sjabloon 149
-symbool 235
-waarneming 109
-zien 289
- Observeren
verandering door 182
- Occam, W. 77
Occam's razor 77
- scalpel van 77
- Occasionalist 188
- Occipitaalkwab 215, 216
- Occlusie 125, 147, 228
-anomalie 143
dis- 154
-informatie 140
proces van occlusie en dis-occlusie 155
- Ockham, W. van 77
- Oerkracht 187
- Ojemann, G.H. 229
- Olifant 208
-hersenen 238
- Onachtzaamheid
visuele 220
- Onbewuste gevolgtrekking 109
- Onderzoek
fundamenteel 72, 73
toegepast 72
visueel 310
- Ondoordringbaar
cognitief 257
introspectief 257
- One-trial-learning 37
- Onfalsifieerbaar 199
- Onstoffelijke geest 189
- Ontbinding van de persoonlijkheid 261
- Ontogenese 54, 165
- Ontogenetisch 4, 269
- Ontogenie 4, 17, 42
- Ontologie 102
- Ontologische compleetheid 195
reductie 102
- Ontspannen 81
- Ontwerper
ondoordringbaar 76
postulaat van 76
- Oogafstand 165
- Oogdominantie 264
-kolom 264
- Oogfixatietaak 218
- Oogmeridiaan 179
- Oorafstand 165
- Oordeel
analytisch 117
synthetisch 117
- Oorzakelijkheid 108
- Oosterse wijsheid 87
- Open modules 181
- Operante conditionering 33
- Operationaliseerbaar 100
- Operationaliseren 75
- Opiaten
heroïne 273
morfine 273
- Optic array 136
flow 136
- Optie
van het organisme 268
- Optimaal systeem 79
- Optisch kenmerk 140
raster 136
- Optische stroom 136
invarianten van 136
-veld 171
- Optische zenuw 286
- Orang-oetan 279
- Ordeningsprincipe 117
- Organisatie 85, 86
complexe 85
- Organisme 84
- Oriëntatieselectief 225
- Oscillatie
coherente 233
- Osten, W. von 8
- Overlevingskans 240, 267
-waarde 1, 180, 249
- Overspannen zijn 81
- P(arvo)-cel 221
- P(henomenal)-bewustzijn 256
- Padintegratie 163
- Panpsychisme 190, 268
- Panta rhei (alles stroomt) 258
-model 259
- Papegai Alex 250
- Papegai Silver 251
- Papoea 210
- Parallax
bewegings- 226
- Parallele verwerking 45
- Parallelverwerking 139
- Paramecium 161
- Parapsychologie 77, 191
- Pariëtaalkwab 215
-lesie 220
- Pariëtale stroom 234
- Parkin, A.J. 306
- Parmenides 107
- Particularia 131
- Partnerkeuze 127
- Parvoel 265
- Patiënt G.Y. 265
- Patiënt H.M. 292, 306
- Patroon 81, 115
- Patroonherkenning 167
sensorische 134
- Pearce, C.S. 185

- Penrose, R. 242
 Pepperberg, I.M. 250
 Peptide 80
 Percept
 primair 170
 Perceptie 108, 112
 -atoom 116
 impliciete 287
 -molecuul 168
 -studie 96
 -systeem 112
 Perceptietheorie 121
 computationele 121
 directe- 121
 indirecte- 110
 Persoonlijke kennis 64
 Perspectiefregels 132
 Pérusse, R. 157
 PET-scan 263
 Pfungst, O. 9
 Pianospelen 19
 Pijn 256
 Pijn lijden 303
 Pijnappelklier 181
 Pijnervaring 249
 -gedragingen 249
 -systeem 249
 Pijnzin 240
 mensen zonder 267
 Pimpelmees 23
 Pitts, W.H. 168
 Plaatje
 bij dieren 158
 plaatjes zien
 plat 145
 Plaatjesachtige datastructuur 234
 Plan voor actie 42
 Plan-lus 259
 Plannen 49
 plasticiteit
 postnatale 275
 Plate, L. 10
 Plato 107, 131
 Platte projectie 141
 Platter, F. 173
 Plevier 17
 Plexus
 neuonaal 259
 Pneuma 212
 Poikilothermie 208
 Politiek pamflet 80
 Poortschakeling 253
 Popper, K.R. 65, 68, 88, 181, 237
 Pornoliteratuur 80
 Positieaanwijzing 164
 Positieve bekrachtiger 29
 Postnataal 55
 leren 45
 Postnatale degeneratie 119
 kalibratie 45
 kennisbron 308
 Postsynaptische depolarisatie 56
 membraan 55
 Postulaat
 scheppings- 76
 van een ontwerper 76
 Potentiaal
 actie- 95
 rustmembraan- 95
 visuele 148, 151
 Potentieel geluid 192
 Pragmatisch neuroreduc-tionisme 101
 Prefrontaalcortex 305
 Prefrontale cortex 261
 Pregnantieprincipe 126
 Premotorcortex 261
 Prestatie 46
 Presynaptische depolarisatie 56
 Pretectum (PT) 286
 Primair percept 170
 Primaire waarnemings-kwaliteiten
 beweging 197
 uitgebreidheid 197
 vastheid 197
 Probleem van Molyneux 119
 Proces
 cognitief 2
 energetisch-materieel 88
 epigenetisch 54
 fysico-chemisch 95
 fysisch 194
 fysisch-chemisch 84
 georganiseerd 96
 intern 38
 lichamenlijk 180
 mentaal 2, 4, 95, 179, 180, 194
 microscopisch 88
 neuro-endocrien 180
 neuonaal 95
 systeemintern 49
 zelforganiserend 79
 Programma
 centraal 38
 computer- 43
 gedrags- 96
 hersen- 83
 kruissnelheids- 83
 macromoleculair 54
 rem- 83
 sensorimotor 54
 start- 117
 versnellings- 83
 Projectie
 -methode 141
 platte 141
 Projectiescherm
 intern 173
 Propositie
 cognitieve 129
 Proprioceptoren 276
 Prosopagnosie 169, 289
 Proteïnesynthese 54
 Proximale stimulus 110
 Psychisch monisme 193
 Psychisch verschijnsel 4
 Psychofisch monisme 193
 Psychofysica 58, 95
 Psychologie 195
 computationele 82
 Psychotherapeut 80
 Publicatiedwang 63
 Publieke kennis 62
 Puzzlekooi 26
 Qualia 191, 256
 kleur- 289
 Rand ('edge') 147
 Randdetector 169
 Random-puntjesstereogram 290
 Randvoorwaarden
 fysische 184, 196
 Rasmussen, J.L. 246
 Raster
 optisch 136
 tintgemoduleerd 226
 Ratio 107
 Rationalisme 107, 117
 Rationeel gedrag 255
 Ratliff, F. 175
 Raw feels 267
 Reactie
 autonome 32
 Realisme 202
 direct 152, 171, 200
 fysisch 182
 naïef 107
 Receptief veld 167, 221
 centrumgebied 174
 omgevingsgebied 174
 Receptor
 -laag 112

- molecuul 55
- signaal 174
- Rede 107
- Reductie
 - in principe 88
 - ontologische 102
 - van biologie 84
- Reductio ad absurdum 87
- Reductionisme 84, 183
 - eliminatie- 102
 - klassiek 89
 - methodologisch 180
- Reductionist 84, 180
 - anti- 85
 - non- 85
- Redundantie 149
- Reflectie 63
- Reflex 275
 - extinctie van 30
 - keten- 34
 - oogknip- 30, 286
 - pupil- 286
- Regel van Cope 243
- Regellus 44
 - door de omgeving 51
- Regelmechanisme 44
- Regelproces
 - lichamelijk 50
- Regeneratie 119
- Reïncarnatie 81
- Reinforcement 27
- Rekenkunde 155
- Relatieve hersenmassa 208
- Relativiteitstheorie 70
- Relevante invariantie 14
- Reliëf 145
- Religie 75
- Renaissance 132
- Representatie
 - categorische 130
 - interne 44
 - monoculair 264
 - natuurgetrouwe 131
 - symbolische 44
 - visuele 130, 132
- Reproduceerbaar succes 47
- Res cogitans 181
- Res extensa 181
- Resolutie 179, 263
- Respons 97
- Responsie
 - sterkte 298
- Resumakaak 230, 261
- Reticulaire formatie 253
- Retina 177
- Retinale expansiesnelheid 171
- Retino-corticale projectie 221
- Rey, G. 35
- Rhinoceros 133
- Richtinglijn
 - visuele 136
- Ritmische activiteitsgolf 233
- Ritueel 17
- Rivaliserende stimulus 262
- Rivaliteit
 - binoculaire 262
- Robotgedrag 254
- Rock, I. 111
- Rohen, J.W. 215
- Rolls, E.T. 270
- Romanes, G. 9
- Rood-ervaring 256
- Roosterstructuur 242
- Rosenthal, R. 9
- Rotatie 171
- Roth, G. 206
- Routinehandeling 16
- Rubin, E. 124
- Rue, L.L. 23
- Ruimte- en tijdskenis 162
- Ruimtebeleving 161
- Ruimtekenis 165
 - aangeboren 165
- Ruimtelijk inzicht 118, 164
 - object 140
- Ruimtelijke waarneming 162
- Ruimtepartitie 154
- Ruimtezien 119
 - tweeogig 167
- Ruis 15, 115
- Runeson, S. 171
- Russell, B. 33, 199
- Rustmembraanpotentiaal 95
- Saccade 139
- Sacks, O. 288
- Salzman, C.D. 230, 264
- Samenhang
 - causale 42
- Samenwerking 23
- Scalpel van Occam 77, 187
- Scepticisme
 - georganiseerd 62
- Schaakbordpatroon 146
- Schaakspel 184
- Schaalafhankelijk 161
 - invariant 145
 - verschil 243
- Schakelalgebra 42
 - repertoire 309
 - schema 231
- Schalingswetmatigheid 209
- Schall, J.D. 262
- Scharrelkip 80
- Scheikunde 84
- Schema 42
- Schemata 123, 129
- Scheppingspostulaat 76
- Schijnbare beweging 170
- Schildpad 205
- Schizofrenie 295
- Schröder-trap 124
- Scoville, W.B. 292, 306
- Searle, J. 242
- Secundaire visuele cortex (V2)
 - dikke strepen 224
 - interstrepen 224
 - smalle strepen 224
- Segregatie
 - voorgond-achtergrond 123, 289
- Selectie 15
 - natuurlijke 249
 - persoonlijke 15
 - slimme 15
 - uit variatie 96
 - van hersenprogramma's 268
- Self-scanning 182
- Sensatie 108
- Sense data 109, 116
- Sensor 112
- Sensorimotor-activiteit 53
 - programma 54
- Sensorimotor-proces 134
- Sensorisch systeem 112
- Sensorische analisator 29
 - deprivatie 260
 - patroonherkenning 134
- Sensorium 197
- Septum 272
- Sequoia 161
- Sewertzoff, A.N. 10
- Shadlen, M.N. 264
- Shaping 34
- Shatz, C.J. 55
- Shebo, B.J. 156
- Shen, Y. 293
- Sheng He 263
- Signaal
 - contrast- 174
 - licht- 174
- Simulatieprogramma 72
- Simultaanagnosie 235
- Singer, Wolf 233
- Singulariteit 147
- Sjabloon 122
- Skinner, B.F. 33
- Slaap
 - diepe 253
 - droomloze 253
- Slaap-waakritmestoring 286

- Slim mechanisme 123, 162, 171
- Slimme Lumpi 10
- Snellius
wet van 135
- Sociale vaardigheden 277
- Socrates 107
- Sofistisch 192
- Software 82, 184
-metafoor 83
- Solipsisme 199
- Soortneutraal 239
- Soortneutrale definitie 3
- Soortspecifiek leervermogen 12
- Soortspecifieke leerdispositie 35
- Sound bites 78
- Spatieële positie 188
uitgebreidheid 188
- Spelen 22, 37
- Spelregels van de wetenschap 62
- Spiegeltest 21, 278
- Spierbewegingsneuron 219
- Spiersturing 180
- Spinoza, B. 108, 189, 193
- Spitsmuis 208
- Spitzka, E.A. 206
- Spontane activiteit 175
gedragsvariatie 35
- Spraakrepresentatie 216
- Sprenken 19
- Sprongbeweging 139
- Squire, L.R. 306
- Startprogramma 117
- Stekelvarken 133
- Stembandsysteem 53
- Stereo-agnosie 217
- Stereopercept 167
- Stereopsis 222
- Stereoscoop 262
- Stereotiep gedragspatroon 38
- Sternberg, R.J. 46
- Sterrenhemel 165
- Sterrenstof 84
- Stimulatie
binoculaire 225
monoculaire 225
- Stimulus 97
distale 110
'hint'- 294
magno- 265
proximale 110
rivaliserende 262
teken- 40
- Stimulus-respons
voorkeurverband 31
- Stimulus-substitutietheorie 29
- Stimulusfactoren 270
- Stoerig, P. 264, 286, 289, 290
- Stoom afblazen 81
- Stored-program principe 82
- Strategie 18
voor overleven 51
- Streefwaarde 50
- Striatum 295, 307
- Stroom
pariëtale 234
temporale 234
- Strottenhoofd 216
- Structuur 86
driedimensionale (3D-) 141
macroscopische 88
visuele 136
- Stumpf, E. 9
- Subcorticale kern 310
- Subjectief denken 63
- Subjectieve ervaring 103
- Submodule 308
- Substantia nigra 295
- Substantie 179
-dualisme 179
- Substraat
neuroonaal 182
- Sulcus centralis 216
- Superholisme 87
- Superlocalisme 232, 309
- Supervisor 197
- Swaddle, J.P. 128
- Symboliek
cultuurgebonden 139
- Symbolische representatie 44
- Symbool 44, 140
cultuur- 155
-manipulatie 51
neuroonaal 156
-proces 245
-systeem 77
-waarde 42
- Symmetrie 127
- Synaps 45, 55
gemarkeerde 307
-gewicht 260
-specifiek 307
- Synaptisch leermechanisme 260
- Synergie 52
- Synthese 30
- Synthetisch oordeel 117
- Systeem 86
-eigenschap 88
gesloten 78
hedonisch 129
optimaal 79
sensorisch 112
- Systeemintern proces 49
- Systematisch 65
- T(oegang)-bewustzijn 257
T-bewust kijken 258
visueel 257
- T-kruising 148
- Taal 238
chemische 90
wiskundige 90
- Taal leren 303
- Taalachtig vermogen 250
verschijnsel 250
- Taaldenken 17
- Taboe 86
- Tabula rasa 108
- Tactiel exploreren 217
systeem 113
- Talenknobbel 212
- Tamarin 279
- Tandarts 248
- Taststelsel 113
- Taxonomisch criterium 38
- Techniek 91
- Tectum opticum 168
- Tegmentum 273
- Tekenschema (canon) 132
-stimulus 40
- Telecommunicatie 81
- Teleologisch denken 74
- Temperatuur 84
- Temporaalcortex 305
-kwab 215, 230
- Temporale stroom 234
- Teruggemelde gegevens 234
- Terugkoppellus 232
- Textuur 145
-element 136
-vorming 146
- Thalamus 175, 253
- Theorema van Fourier 122
- Theorie 71
- Theorie van alles 187
- Theorie-evolutie 67
discrepancie bij 67
eisen aan 67
- Thèta-golf 233
- Thèta-ritme 233
- Tijd-tot-contact 171
- Tijdcompenseren 163
- Tijger 304
- Tintcontrast 226
- Tintgemoduleerd raster 226
- Todt, D. 251
- Toegepast onderzoek 72

- Toekomstbestendig 96
 Toename van bewustzijn
 fylogenetisch 269
 ontogenetisch 269
 Toepasbaarheid 73
 Toestand
 -afhankelijkheid 300
 mentale 100
 Toetsbaar 64, 65
 Toevalligheid 90
 Tolman, E.C. 33
 Top-down 212
 Topografische afbeelding
 222
 Trajectintegratie 163
 Trajectvector 163
 -som 163
 Transductor 112
 Transformatie
 globale 135
 -netwerk 309
 Transmitter 80
 -stof 55
 Treisman, A. 234
 Treue, S. 301
 Trial-and-error leren 27
 Trofische stof 54
 Turing, A. 7
 Turner, R.S. 118
 Tweeheid
 direct zien van 158
 Tweespijkerillusie 166
 Tweewaardige classificatie-
 meting 98

 Unicitéstheze 248
 Unieke vaardigheden 249
 gereedschappen maken
 249
 schrijven 249
 Universalia 131

 V1 287
 V1-lesie
 bilaterale 288
 V4-cel 299
 Vaardigheden
 sociale 277
 Vaardigheid 307
 Vadertje staat 79
 Variabele
 hogere-orde 135, 136
 interveniërende 34, 38
 Variantie 94
 Varken 34
 Vast actiepatroon 16, 41
 Vast actieprogramma 40

 Vector
 -som 301
 -sommodel 301
 Vectorveld 135
 hellingen- 146
 Veldpotentiaal 213
 Ventrikel 212
 Vergelijkingsstelsel 285
 Verificatie 66
 Verjaaggroep 39
 Vermogen
 cognitief 46
 gekrystalliseerd 46
 Verrassende voorspelling
 203
 Verschildrempelmeting 98
 Verslaafd 272
 Verstraten, F.A.J. 170, 301
 Vervorming 146
 Verwarring van categorieën
 43
 Verwondering 73
 Vesalius 212
 VIP 309
 Virtual reality 137, 159, 199
 Visueel bewustzijn 262
 cortexgebied 221
 detecteren 219
 onderzoek 310
 schetsblok 293
 volgen 219
 Visueel-ruimtelijk schets-
 boek 284
 Visuele aandacht 20
 attentie 258
 Visuele baan
 pariëtale 297
 temporale 297
 Visuele catastrofe 148
 Visuele cortex
 primaire 262
 striate 224
 Visuele kloof 120
 kunst 127
 onachtzaamheid 220
 Visuele potentiaal 148
 van een tomaat 151
 Visuele representatie 130,
 132
 richtinglijn 136
 structuur 136
 Visuomotor-concept 123
 Visuomotor-programma
 134
 Vitalisme 85
 Vleermuis 192
 Vliegendetector 138

 Vliesimulator 144
 Voedselgeneralist 210
 -specialist 210
 Vogel 164
 Vogel, G. 304
 Volksdualisme 189
 Volume-invariantie 157
 Voorgond-achtergrond
 segregatie 123
 Voorkantsysteem 113
 Voorkeur 35
 -verband 31
 Vooroordelen
 gemeenschappelijke 63
 Voorspellend denken 65
 Voorspellende waarde 31,
 78
 Voorspelling 78
 Voortdurende ruzie 80
 Voortplanting 50, 90
 Vorm-vorm interactie 93
 Vormaspect 139
 Vouw ('fold') 147
 Vrij verplaatsbaar program-
 ma 82
 Vrije verplaatsbaarheid 184
 Vroon, P. 271

 W(akker)C(oma)-bewust-
 zijn 253
 Waandenkbeeld 64
 -voorstelling 80, 261
 Waar 77, 202
 Waarde
 voorspellende 31, 78
 Waardenvrij 63
 Waardetoekenning 269,
 277, 304
 Waardevol 77
 Waarheid 64
 absolute 77
 Waarnemen 114
 bewust 258
 direct 156
 kwaliteit van 8
 Waarnemer
 externe 18, 49
 Waarneming 112, 180, 308
 actie 123
 elementaire 108
 multimodaal 109
 postnatale kennisbron
 308
 ruimtelijke 162
 Waarnemingskwaliteiten
 primaire 197
 secundaire 197

- Waarnemingsprobleem 107
 -punt 136
 -systeem 114
 Wagner, R. 211
 Wakkere toestand 254
 Walker, S. 205
 Walvis 161
 -hersenen 238
 Wangdrag 34
 Waterhoofd (hydrocephalus) 210
 Waterman, T.H. 162
 Watervallusie 301
 Watson, J.B. 32, 70
 Weegfunctie 176
 Weekdier 90, 192
 Weiskrantz, L. 265
 Weizenbaum, J. 66, 71
 Went, F.W. 161, 243
 de stelling van 243
 Werkelijkheid 197, 295
 Werkelijkheidsgebied 71
 Werkgeheugen 283
 Wernicke
 gebied van (area 42) 214
 Wet van het effect 28
 Wetenschap
 als sociaal proces 62
 Wetenschappelijk evolutie-
 proces 63
 Wetenschappelijke kennis
 62, 64
 spelregels voor 65
 waardenvrij 63
 Wetenschapsbedrijf 63
 -theorie 62
- Wetmatigheden
 fysische 182, 184
 Wickelgren, I. 305
 Wiesel, T.N. 168
 Wilde eend 38
 Willis 212
 Wilsson, L. 23
 Wiskundeknobbel 212
 Wiskundige taal 90
 Woestijnmier 163
 Woestijnomgeving 163
 Wonderdoener 80
 Wong-Riley, T.T. 224
 Worm 13
 Wullimann, M.F. 206
- IJkobject 145
 IJsvogel 135
 Yoga 81
 Young, J.Z. 41, 304
- Zangrepresentatie 216
 Zeeanemoon 13
 Zelfbeeld 21
 Zelfbewuste geest 182
 Zelfbewustzijn 21, 256, 275
 reflexief 277
 Zelfherkenningsgedrag 279
 Zelfkennis 21, 275
 impliciete 276
 -pakket 276
 Zelforganisatie 76, 275
 Zelforganiseren 54
 Zelforganiserend proces 79
 Zelfpreservatie 90
 -programmeren 54
 -referentiegedrag 279
 -structureren 54
 Zelfverworven kennis 23
 Zelfverzorgend gedrag 49
 Zenuw
 optische 286
 Zenuwstelsel
 bouwplan 206
 niet-bewuste processen
 257
 Zien
 actief 142
 aftastbewegingen 296
 binoculair 264
 fenomenaal 289
 fixatiepunt 296
 mentaal aftastraampje 296
 saccade 296
 Zijnsvraag 102
 Zijwaartse invloed 174
 Zilvermeeuw 96
 Ziman, J. 62
 Zin 113
 Zingevende functie 116
 Zintuigelijke meetwaarden
 109
 Zintuigstelsel 112, 121
 Zoekbeeld 30, 274
 Zoeklichthypothese 297
 Zola, S.M. 306
 Zombie 255
 Zuiver denken 107
 Zwaartekrachtveld 165
 Zwarte magie 86
 Zwarte-doodsbeschrijving
 72