

# De toekomstige eeuw der cognitieve neurowetenschap

Peter Hagoort\*

Ik verzoek u met mij mee te gaan naar het hoge noorden van ons land aan het begin van de vorige eeuw. Aldaar was in Groningen Gerard Heymans als hoogleraar filosofie en psychologie uitgegroeid tot 'de roem van de stad zijner inwoning' en tot een van de meest vooraanstaande geleerden van ons land.<sup>1</sup> Met de vestiging van het eerste psychologisch laboratorium hier te lande (1892) was Heymans in navolging van Wundt in Leipzig begonnen om bewustzijnservaringen langs experimentele weg te onderzoeken. Niet langer fungeerde het conceptuele denkraam van de filosofie als de belangrijkste leidraad voor de analyse van psychische verschijnselen. Daarvoor in de plaats kwam de aan de natuurwetenschappen ontleende experimentele methode, waarbij onder gecontroleerde omstandigheden gemeten en gekwantificeerd kon worden.

Voor de som van 280 mark schafte Heymans zich een Hippchronoscoop aan om nauwkeurig reactietijden te kunnen meten. Andere meetinstrumenten volgden hun weg naar huize Heymans, waarvoor door de architect Berlage een experimenteerkamer was ontworpen. Deze ontwikkeling markeerde een kantelpunt in de vestiging van de psychologie als een zelfstandige academische discipline aan de Nederlandse universiteiten. De

methodologie en het instrumentarium van de negentiende-eeuwse natuurwetenschappen vormden de inspiratiebron voor een nieuwe experimentele wetenschap van de menselijke natuur.

## De eeuw der psychologie

We zijn inmiddels aangeland in 1909. Heymans heeft in het zojuist herbouwde academiegebouw eigen laboratoriumruimte gekregen en een eigen collegezaal met 120 zitplaatsen om aan de grote belangstelling voor zijn colleges tegemoet te komen. Intussen bekleedde Heymans ook het rectoraat van de Groningse universiteit. Dit rectoraat droeg hij in 1909 over met een rede die grote aandacht trok in de landelijke pers, binnen een jaar tweemaal herdrukt moest worden en ook in Duitse en Franse vertalingen verscheen. De titel van deze rede was 'De toekomstige eeuw der psychologie'.<sup>2</sup>

In zijn rede schetst Heymans de negentiende eeuw als de eeuw van de natuurwetenschappen. De resultaten van natuurwetenschappelijk onderzoek hadden volgens Heymans in de loop van de negentiende eeuw een allesoverheersende plaats in het denken van de mensheid verworven. Daarnaast had de natuurwetenschappelijke techniek elektrische en stoomwerktuigen voortgebracht, kunstmest, narcose en nog vele andere zaken. Zodoende hadden de natuurwetenschappen de negentiende eeuw in de woorden van Heymans tot 'één langen Sinterklaasavond' gemaakt (p. 8). Maar, zo constateert hij, deze pakjesavond mocht dan wel het materiële welzijn hebben bevorderd, aan kennis en inzicht aangaande

2. Heymans, G. (1909). *De toekomstige eeuw der psychologie* (rede uitgesproken bij de overdracht van het rectoraat der Rijksuniversiteit te Groningen op 20 september 1909).

\* Rede uitgesproken op 12 mei 2000 bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar in de neuropsychologie aan de Faculteit Sociale Wetenschappen KUN. Correspondentieadres: F.C. Donderscentrum, Postbus 310, 6500 AH Nijmegen. E-mail: p.hagoort@mpi.nl

1. Met dank aan Douwe Draaisma voor het aangeleverde materiaal. Zie ook Draaisma, D. (red.) (1992). *Een laboratorium voor de ziel: Gerard Heymans en het begin van de experimentele psychologie*. Groningen: Historische Uitgeverij/Universiteitsmuseum; Draaisma, D. (2000). Gerard Heymans (1857/1930). *Ervarenheid te Groningen*. In J. Bank & M. van Buuren (red.), *Hoogtij der burgerlijke cultuur* (pp. 291-328). Den Haag: SDU.

de menselijke natuur had dit alles niets bijgedragen. Hier zag Heymans een grote taak weggelegd voor een op een natuurwetenschappelijke leest geschoeide psychologie. Deze zou in een toekomstige eeuw inzicht in en beheersing van de menselijke natuur bewerkstelligen. Ook al gaf Heymans in zijn rede niet aan wanneer de eeuw der psychologie zou aanbreken, hij moet toch een stille hoop gekoesterd hebben dat het zijn eeuw zou zijn waarin deze nieuwe experimentele wetenschap vaste grond onder de voeten kreeg. Aan het begin van de eenentwintigste eeuw kan daarom de vraag gesteld worden of de twintigste eeuw Heymans eeuw der psychologie geworden is.

In zeker opzicht is het antwoord op deze vraag bevestigend. Psychologie is in de vorige eeuw tot een gevestigde academische discipline uitgegroeid. Het aantal psychologen dat zijn brood verdient met het aanbrengen van zelfkennis en kennis van de ander is zeer aanzienlijk en zal ook in deze eeuw aanzienlijk blijven. Psychologische termen zijn onderdeel geworden van het alledaagse taalgebruik en een niet onaanzienlijk deel van het wetenschappelijk gedachtegoed in de psychologie is onderdeel geworden van het menselijk zelfbeeld.

In het vervolg wil ik het echter niet met u hebben over de maatschappelijke rol van de psychologie, maar wél over de wetenschappelijke toekomst ervan.

Psychologie is de wetenschap van de geest. Nu heeft geest in het Nederlands velerlei bijklanken, dus laat ik wat preciezer zijn. Een centrale vraag in de psychologie is hoe het complexe samenstel van cognitieve en emotionele vaardigheden waarover wij beschikken is opgebouwd.

Als ik Peter Struyckens puntenwolk op een postzegel van tachtig cent op uw netvlies projecteer, bent u in staat deze visuele informatie als een gezicht te zien, bovendien daarin het gezicht te herkennen van onze vorstin, de naam die bij het gezicht hoort uit het geheugen op te halen, de gevoelens die ze bij u oproept in woorden aan mij mee te delen, enzovoort.

Waarneming, geheugen, aandacht, taal, het plannen en uitvoeren van beweging, emotie, bewustzijn, het zijn even zovele woorden voor uiterst complexe processen die zich bij voortdurend in onze hersenen afspelen. Het totaal en samenspel van al deze processen is wat wij onder geest verstaan.

Via vaak ingenieuze experimenten is in het psychologisch laboratorium inzicht verkregen in de wijze waarop deze processen verlopen. Zo kregen we in de laatste decennia een steeds nauwkeuriger beeld over hoe u in de luchtrillingen die ik tijdens deze rede produceer klanken en woorden herkent en die tot een betekenisvolle in-

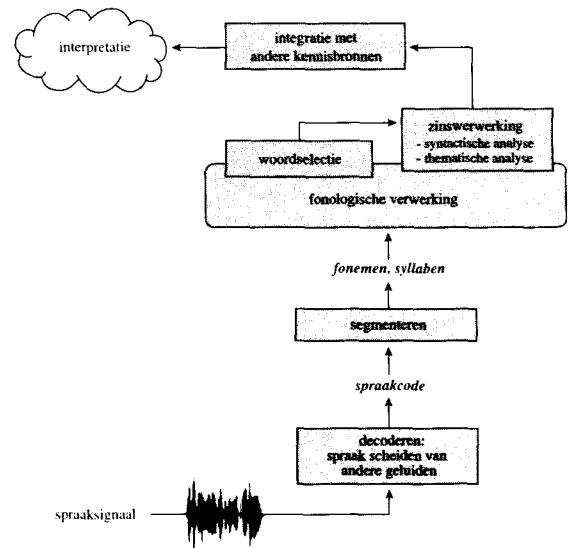
terpretatie samensmeedt.

De hele cascade van processen die daarbij een rol speelt, laat zich samenvatten in de cognitieve architectuur van taalverstaan (zie figuur 1). Soortgelijke blauwdrukken zijn te geven voor visuele waarneming, het ophalen van informatie uit het geheugen, het sturen van aandacht, enzovoort.

Met de komst van de computer ontstond de mogelijkheid de genoemde cognitieve functies te simuleren. Het grote voordeel van computermodellen is dat ze de ontwerper dwingen heel expliciet te zijn over de wijze waarop de daarin opgeslagen informatie is gerepresenteerd en wordt verwerkt. Vage concepten leiden nu eenmaal niet tot een werkend computermodel. Een computationeel expliciete theorie over cognitie ontmaskert de ontbrekende elementen die zich in een louter verbale theorie gemakkelijk aan de waarneming onttrekken.

Tevens vormen werkende computermodellen voor patroonherkenning, redeneren, taalproductie, enzovoort, veelal een nuttige heuristiek voor onderzoek naar menselijke cognitie. Als de ingenieur een oplossing voor een bepaald probleem bedacht heeft kan het de moeite waard zijn om na te gaan of moeder Natuur niet 'per ongeluk' van dezelfde truc gebruik gemaakt heeft.

Dit laatste is echter geenszins gegarandeerd. De menselijke geest is niet op de tekentafel van een meesterontwerper tot stand gekomen, maar in een evolutionair selectieproces, waarvan een opeenstapeling van niet-opti-



Figuur 1. De cognitieve architectuur van taalverstaan. Daarin worden de processen gespecificeerd die zich in het hoofd van de luisteraar afspelen wanneer deze uit de luchtrillingen die de spreker produceert de daarin vervatte boodschap achterhaalt.

male oplossingen voor lokale overlevingsproblemen de uitkomst is. Daarmee zijn we aanbeland bij de neuropsychologie.

De grondgedachte van de neuropsychologie is dat de menselijke geest niet in de vrije ruimte zweeft, maar vast verankerd is in de hersenen. Dit is kort en bondig samengevat in het materialistisch adagium van Donders' vriend en tijdgenoot Jacob Moleschott (1822-1893): 'Zonder fosfor geen gedachten.'

In de context van de neuropsychologie laat dit zich vertalen in: zonder onze hersenen geen geheugen, taal, perceptie, emotie, bewustzijn; en al evenmin geloof, hoop en liefde. Het zijn de hersenen (zie figuur 2) die in een lang proces van evolutionaire ontwikkeling hun huidige vorm hebben gekregen en daarmee de mogelijkheden-voorwaarden voor de verschillende aspecten van menselijke cognitie realiseren. De neuropsychologie onderzoekt menselijke cognitie in relatie tot de evolutionair

bepaalde organisatieprincipes van het brein. Daarbij wordt onder andere gepoogd na te gaan hoe de componenten van de cognitieve architectuur in de hersenen zijn verwezenlijkt. De cognitieve architectuur wordt vastgeknoopt aan de neurale architectuur. In tegenstelling tot delen van de kunstmatige intelligentie is in de neuropsychologie daarmee het ontwerp dat uitkomst is van de evolutionaire geschiedenis het uitgangspunt van onderzoek. Waartoe leidt deze grondgedachte in de praktijk van het neuropsychologisch onderzoek? Dit laat zich illustreren aan de gevolgen van het ongeluk waarvan in 1848 de 24-jarige spoorwegaarbeider Phineas Gage het slachtoffer werd.<sup>3</sup> Tot het werk van Gage behoorde het tot ontploffing brengen van rotsblokken om het terrein gereed te maken voor het aanleggen van een spoorlijn. Tijdens het aanstampen van het explosieve poeder met een ijzeren staaf ontstond een explosie waarbij de staaf de frontalkwab van Gage doorboorde. Het resultaat was een beschadiging van zijn prefrontale hersenschors.

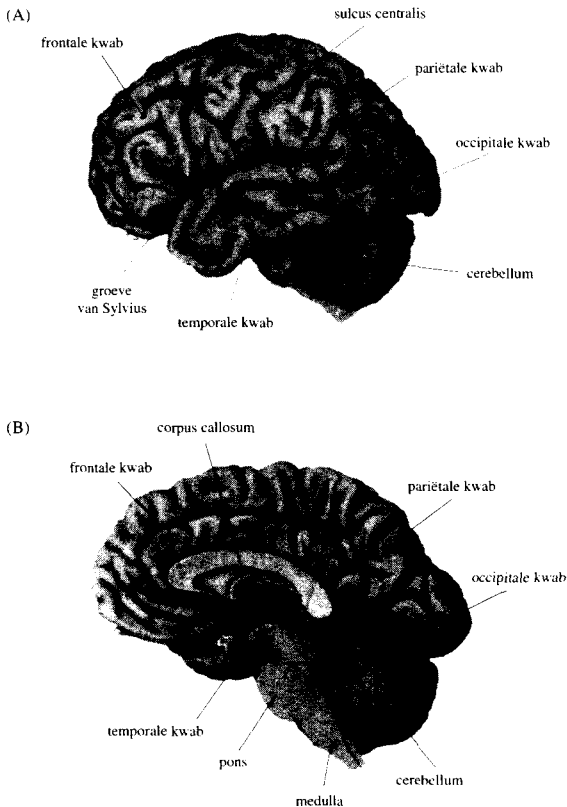
Gage leefde na het ongeluk nog dertien jaar, maar vertoonde een aantal opvallende gedragsveranderingen, waaronder een verminderd vermogen om zijn gedrag te plannen en zich aan sociale conventies te houden. Op basis van de gedragsveranderingen ten gevolge van het ongeluk kon worden afgeleid bij welke functies het beschadigde hersengebied voorheen betrokken was.

Het voorbeeld van Phineas Gage is exemplarisch voor de werkwijze van de klassieke neuropsychologie. Experimenten van de natuur in de vorm van een hersenbeschadiging vormen daarbij het uitgangspunt. Op basis van de daarmee samenhangende uitvalsverschijnselen wordt de rol van het beschadigde gebied in het intacte brein gereconstrueerd.

Deze werkwijze kent een aantal inherente beperkingen. Experimenten van de natuur in de vorm van hersenbeschadigingen zijn niet herhaalbaar en al evenmin onder experimentele controle te brengen, twee cruciale ingrediënten van een op een natuurwetenschappelijke leest geschoeide psychologie. Wat de natuur ons aanreikt in de vorm van patiënten met een hersenaandoening is van geval tot geval verschillend en laat geen ruimte voor sturing door de onderzoeker. De klassieke neuropsycholoog is een detective die uit de aangeleverde bewijsstukken aard en omvang van het neurale misdrijf op het spoor tracht te komen. Liever echter zou hij een experimentator zijn die zelf van het begin af aan bij het plot betrokken is.

Hoewel in het licht van deze beperkingen het onder-

3. Zie voor een uitvoerige bespreking van het 'geval Gage' onder andere Damasio, A.R. (1994). *Descartes' error: emotion, reason, and the human brain*. New York: Grosset/Putnam.



Figuur 2. De hersenen in beeld: (a) de locatie van de vier hersenkwabben, het cerebellum en de twee belangrijkste groeven op een zijaanzicht van de linker hersenhelft, (b) een mediaal aanzicht van de hersenen ter hoogte van het corpus callosum, de verbindingsbalk tussen de beide hersenhelften.

zoek naar de relatie tussen hersenen en cognitie gebaat bij mogelijkheden het gezonde brein aan het werk te kunnen zien tijdens bijvoorbeeld het herkennen van het gezicht van onze vorstin, en tijdens vele andere cognitieve processen. Het goede nieuws is dat met name in de laatste twee decennia de technologische mogelijkheden daartoe zich in een snel tempo hebben ontwikkeld. Voor het eerst in de geschiedenis van de psychologie is het daarmee mogelijk geworden de verankering van de geest in de menselijke hersenen op een experimenteel gecontroleerde en herhaalbare wijze te onderzoeken.

### De nieuwe uitdaging

Wij staan thans aan het begin van een nieuwe eeuw waarin de mogelijkheden om bij de mens de werking van het levende brein te meten en zichtbaar te maken groter zijn dan ooit tevoren en richtinggevend zullen blijken voor de verdere ontwikkeling van de psychologie. Theorieën over de neurale basis van menselijke cognitie en voortschrijdende mogelijkheden om het intacte levende brein te onderzoeken zullen in toenemende mate worden betrokken bij het beantwoorden van klassieke vragen in de psychologie. Nu reeds zijn de contouren zichtbaar van een vakgebied waarin experimenteel psychologen, cognitieve neuropsychologen, neurologen, neurobiologen, biofysici en mathematisch geschoolde onderzoekers eendrachtig werken aan de beantwoording van onderzoeksvragen op het terrein van perceptie, geheugen, taal, aandacht, enzovoort.

Dit interdisciplinaire vakgebied is tijdens een taxirit in New York door George Miller en Mike Gazzaniga cognitieve neurowetenschap gedoopt. De neuropsychologie nieuwe stijl vormt daarvan een integraal onderdeel. Heymans toekomstige eeuw der psychologie zal daarmee in een toekomstige eeuw der cognitieve neurowetenschap worden opgenomen.

Alvorens de contouren daarvan te schetsen, wil ik u echter een blik gunnen in de keuken van de cognitieve neurowetenschapper van vandaag. Als ik daarbij in het vervolg over cognitie spreek, dan gelieve u dat op te vatten in de brede zin van het woord, dat wil zeggen inclusief sensorische en motorische processen, en eveneens inclusief emotie.

### Cognitieve neurowetenschap in beeld

#### VISUELE WAARNEMING

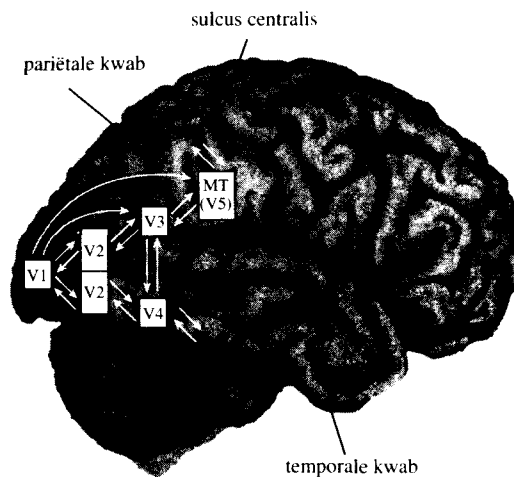
Stelt u zich het beeld voor van Marco Pantani op de flanken van de Alpe d'Huez. Wat wij waarnemen herkennen

wij als de kleine wielrenner met de grote oren die zich op een veelkleurige racefiets bergopwaarts beweegt. Het nodige is inmiddels bekend over wat zich tijdens dit waarnemingsproces in de hersenen afspeelt.

De visuele informatie wordt vanaf het netvlies via het corpus geniculatum laterale doorgeschakeld naar de visuele schors achter in het hoofd. Vandaar wordt de visuele informatie langs parallelle routes verder verwerkt. De zogenaamde ventrale route stelt ons in staat de identiteit van vormen en objecten vast te stellen. De dorsale route codeert voor beweging en de ruimtelijke oriëntatie van het waargenomene. Daarbij valt Marco Pantani tijdens het waarnemingsproces in eerste instantie uiteen in kleur, vorm en beweging die op nog niet geheel begrepen wijze tot een geïntegreerd percept worden samengevoegd.

Er zijn dus in het visuele systeem van onze hersenen verschillende gebieden met een zekere functionele specialisatie (zie figuur 3). Het gebied dat aangeduid wordt als V4 is cruciaal voor de waarneming van kleur, het meer dorsaal gelegen MT (V5) is van belang voor de waarneming van beweging.

In de neuropsychologie is reeds lang bekend dat een hersenbeschadiging selectief aspecten van de waarneming kan uitschakelen. Zo zijn er patiënten die geen kleur meer kunnen waarnemen en de wereld alleen in grijsstij-



Figuur 3. Verwerking van visuele informatie in de hersenen verloopt langs gedeeltelijk gescheiden wegen. Vanaf de primaire visuele schors (V1) wordt de informatie enerzijds verder verwerkt in de ventrale route die naar het onderste gedeelte van de temporale kwab leidt. Daarin bevindt zich onder andere het gebied voor kleurwaarneming (V4). De ventrale route stelt ons in staat objecten te herkennen. De dorsale route loopt vanaf de primaire visuele schors naar de pariëtale kwab. In deze route bevindt zich onder andere het gebied dat een centrale rol speelt bij de waarneming van beweging (MT, ook wel V5 genoemd).

ten zien, een verschijnsel dat als cerebrale achromotopsie bekend staat. Andere patiënten nemen geen beweging meer waar. Voor dergelijke patiënten is de wereld een serie 'snapshots', met alle bijkomende problemen van dien. Neem bijvoorbeeld de 43-jarige vrouw die aan akinetopsie lijdt ten gevolge van een hersenbeschadiging in de temporopariëtale gebieden van beide hersenhelften.<sup>4</sup> Als gevolg van haar onvermogen beweging te zien, heeft zij grote moeite met het oversteken van de straat. Hoewel ze de auto's zonder problemen kan identificeren, is ze niet in staat de verplaatsing en snelheid van de auto's adequaat waar te nemen. Het ene moment is de auto ver weg, het volgende moment is hij dichtbij, zonder dat zij verplaatsing van de auto heeft waargenomen. Bij het inschenken van thee of koffie lijkt de vloeistof bevroren als een gletsjer, en weet ze niet wanneer ze moet stoppen met inschenken, omdat ze het niveau in het kopje niet ziet stijgen.

Hoewel uit neuropsychologische gevalbeschrijvingen en uit onderzoek bij apen bekend was dat aspecten van de visuele wereld langs gescheiden wegen in ons brein worden verwerkt, is het pas met de komst van recente hersenscantechnieken mogelijk geworden dit hele netwerk van visuele gebieden in het menselijk brein aan nader onderzoek te onderwerpen.

Eén manier om hersenactiviteit zichtbaar te maken is via het meten van de lokale doorbloedingspatronen van het brein. functionele magnetische-resonantie-imaging (fMRI) en positronemissietomografie (PET) zijn de meest geavanceerde technieken om dat te doen. De achterliggende gedachte bij het gebruik van deze technieken is dat het lokale doorbloedingspatroon in het brein gerelateerd is aan hersenactiviteit. Dit idee werd in 1890 voor het eerst gelanceerd door de Engelse fysiologen Roy en Sherrington. Roy en Sherrington veronderstelden dat de bloedtoevoer naar een bepaald hersengebied toeneemt bij verhoogde activiteit.

Bij PET wordt een zeer licht radioactieve stof in de bloedbaan ingebracht via een injectie in een ader van de arm. De hoeveelheid in het lichaam gedeponeerde radioactiviteit is hierbij erg laag; ter vergelijking, niet groter dan de hoeveelheid waaraan u blootstaat tijdens een transatlantische vlucht. Voor PET-metingen van hersenactiviteit wordt meestal gebruik gemaakt van een radioactieve isotoop van zuurstof. Dit zogenaamde zuurstof-15 ( $^{15}\text{O}$ ) heeft een halfwaardetijd van twee minuten en

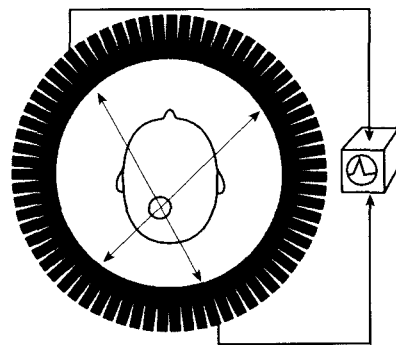
is in circa tien minuten geheel vervallen tot een niet-radioactieve vorm. Via de bloedbaan bereikt het zuurstof-15 de hersenen.

Zuurstof-15 is niet stabiel, hetgeen resulteert in een emissie van positief geladen positronen vanuit de kern. Op korte afstand van de kern botsen de positronen met negatief geladen elektronen. Daarbij wordt de massa van deze deeltjes omgezet in twee fotonen (gammastralen) die zich in een hoek van 180 graden ten opzichte van elkaar bewegen.

De PET-camera bestaat uit een aantal detectorringen. Elke keer nadat een botsend positron-elektronpaar is omgezet in twee fotonen, worden tegenover elkaar gelegen detectoren op hetzelfde moment door een foton aangeslagen (zie figuur 4). Op basis daarvan kan de locatie van de botsing worden bepaald. Bij een locale toename van de bloedtoevoer neemt het aantal ter plaatse uitgezonden positronen toe en daarmee het aantal botsingen dat wordt gedetecteerd. De PET-scanner registreert het aantal botsingen. Op basis daarvan worden de lokale doorbloedingspatronen van de hersenen in beeld gebracht. Veranderingen in de lokale doorbloeding die met cognitieve processen samenhangen, kunnen op deze wijze met een oplossend vermogen van 5 tot 10 mm worden vastgesteld.

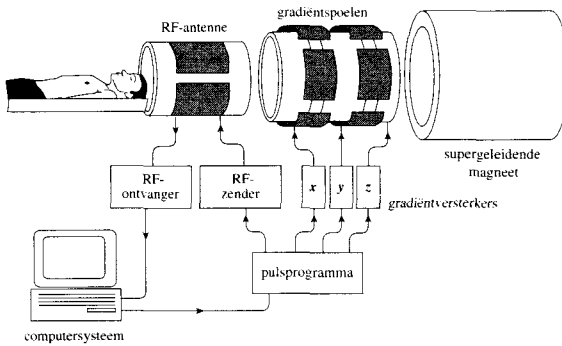
De MRI-scanner berust op de meest recente technieken om de hersenen in beeld te brengen. Een belangrijk verschil met de PET-scanner is dat we met een MRI-scanner niet alleen hersenactiviteit maar ook hersenstructuren zichtbaar kunnen maken.

Een MRI-scanner bestaat uit een grote supergeleidende magneet, een aantal kleinere magneten die aan de bin-



Figuur 4. Het principe van de PET-camera. Zichtbaar is een weergave van het hoofd van bovenaf gezien, omgeven door een ring van detectoren van de PET-camera. Fotonenparen verplaatsen zich vanuit een punt in de hersenen met de snelheid van het licht in tegenovergestelde richtingen en treffen gelijktijdig twee detectoren van de ring. Deze gebeurtenissen worden geregistreerd door met de detectoren verbonden coïncidentie-elektronica.

4. De gegevens van deze patiënt zijn gerapporteerd in Zihl, J., Cramon, D. von, & Mai, N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain*, 106, 313-340; zie ook Zeki, S. (1991). Cerebral akinetopsia (visual motion blindness): A review. *Brain*, 114, 811-824.



Figuur 5. De componenten van een MRI-scanner.

nenkant gemonteerd zijn ('gradiëntspoelen') en een reeks computers en versterkers (zie figuur 5). Het magneetveld in de buis is zeer sterk (doorgaans 1,5 tesla). Bij deze veldsterkte zal bijvoorbeeld een sleutelbos die bij de opening van de scannerbuis wordt losgelaten een meter verderop in de buis al een snelheid van zestig kilometer per uur bereikt hebben. Dit magneetveld is ook zo sterk dat de waterstofprotonen in het lichaam erop reageren. Zoals in alle atomen, draaien deze protonen om een eigen as. De richting van die as is doorgaans willekeurig, maar in de magneet legt een deel van de waterstofprotonen zijn as in de richting van de magneet.

Door energie toe te voegen aan de protonen in de vorm van radiogolven van een heel specifieke frequentie ('RF-puls') raakt de rotatieas even uit het lood. Zodra de RF-puls stopt, keren de protonen naar de uitgangsrichting terug en wordt de opgenomen energie weer uitgestraald als radiogolven in de gegeven frequentie. Deze straling wordt door een uiterst gevoelige ontvanger opgepikt. De protonen zijn bijzonder gevoelig voor de specifieke frequentie van de RF-puls. Deze frequentie hangt onder andere af van de exacte sterkte van het plaatselijke magneetveld.

De extra magneten binnen in de buis (de gradiëntspoelen) zorgen ervoor dat het magneetveld overal in het lichaam (c.q. brein) verschilt. De frequentie van het radiosignaal dat de protonen oppikken en na de RF-puls weer uitstralen, is daardoor afhankelijk van hun plaats in de ruimte. De frequentie van het signaal dat afgegeven wordt is zo naderhand nauwkeurig te herleiden tot de plaats waar de protonen zich bevinden. Behalve plaatsbepaling, kan ook de lokale signaalsterkte worden gemeten. De signaalsterkte hangt onder andere af van het type weefsel, en verschilt in het brein voor grijze stof, witte stof en hersenvocht.

Met de MRI-scanner kunnen niet alleen hersenstructuren zichtbaar gemaakt worden, maar is ook hersenactiviteit te meten. In dat geval spreken we van functionele MRI (fMRI). De eerste succesvolle toepassing van fMRI

bij de mens dateert van het begin van de jaren negentig in de vorige eeuw.

Bij functionele MRI maken we gebruik van het gedrag van hemoglobine in het magneetveld. Hemoglobine is de transporteur van zuurstof in het bloed en bevat onder andere ijzer. De ijzerkern heeft vrijwel geen effect op het magneetveld als er zuurstof aan het hemoglobine is gebonden. Echter, wanneer de zuurstof is afgestaan verstoort het ijzer het veld zodanig dat het MR-signaal op die plaats zwakker is. De meest gebruikte fMRI-techniek (BOLD) berust op de verandering in de sterkte van het MR-signaal ten gevolge van een verandering in de zuurstofconcentratie in het bloed. De mate van zuurstofverzadiging van het bloed verandert bij toegenomen hersenactiviteit. Het resulterende effect op de sterkte van het MR-signaal stelt ons in staat de plaats te bepalen waar in het brein activiteitstoename heeft plaatsgevonden. Daarbij kan een nog beter oplosend vermogen bereikt worden dan met PET. Naast informatie over de locus van hersenactiviteit verschaft fMRI ons informatie over het tijdsverloop van de bijbehorende haemodynamische respons.

Met behulp van PET en fMRI kan worden zichtbaar gemaakt dat een statisch patroon van punten de primaire visuele schors en aangrenzende cortex activeert (V1 en V2). Op het moment dat de punten gaan bewegen wordt een ander gebied actief, gelegen in het middelste gedeelte van de temporaalkwab. Dit gebied (MT/V5) speelt een cruciale rol bij het waarnemen van beweging. Zouden de punten zich groeperen tot het gezicht van Beatrix, dan nemen we hersenactiviteit waar in de onderste winding van de temporaalkwab. Dit gebied speelt een belangrijke rol bij het herkennen van gezichten.

Mede dankzij technieken als PET en fMRI ontstaat een steeds gedetailleerder beeld van het netwerk van hersengebieden dat in het humane brein bij visuele waarneming betrokken is. Elk van de gebieden in dit netwerk heeft een zekere specialisatie. De verschillende aspecten van de visuele wereld worden langs verschillende routes door het brein geleid.

In ons bewustzijn zien wij een wielrenner op een veelkleurige racefiets die zich in volle vaart van de berghelling stort. Dit is de uitkomst van een orkestratie van gedistribueerde hersenactiviteit die deze geïntegreerde waarneming construeert uit het samenraapsel van vorm, kleur en beweging.

TAAL

De voorbeelden die ik tot nu toe gegeven heb waren alle afkomstig uit het domein van de visuele waarneming.

Mijn eigen onderzoeksterrein betreft een andere kernfunctie in het spectrum van menselijke cognitie, en dat is taal. In vergelijking met onze kennis over het visuele systeem, is wat we weten over de neurale organisatie van het menselijk taalvermogen beperkt. Een van de redenen is dat we voor taal niet over een diemodel beschikken. Geen andere soort dan *homo sapiens* heeft in de loop van de evolutionaire geschiedenis een communicatiesysteem ontwikkeld waarin een eindig aantal symbolen en combinatieprincipes een oneindige variatie aan uitingen mogelijk maakt. Als het over het menselijk taalvermogen gaat, schieten we om die reden niet veel op met diere modellen, en zijn we in nog sterkere mate dan voor andere cognitieve functies aangewezen op de recente mogelijkheden het menselijk brein in werking te onderzoeken.

Over de cognitieve architectuur van taalvermogens zoals spreken en luisteren is inmiddels wel het nodige bekend. Zo weten we dat de woorden van het Nederlands uit circa 35 verschillende klanken zijn opgebouwd en dat u als spreker van het Nederlands informatie over ten minste veertigduizend Nederlandse woorden in het geheugen hebt opgeslagen.

Hoe vanuit die 35 klanken zo'n omvangrijk repertoire aan woorden kan worden opgebouwd laat zich illustreren aan het gedicht 'Gedacht' van Gerrit Kouwenaar (*Data, decors*, 1971), waarin op briljante wijze gespeeld wordt met het gegeven dat minimale klankverschillen tot woorden met geheel andere betekenissen leiden.

#### *Gedacht*

Je hand is bijna je hond  
je huid is bijna je huis  
je vorm is bijna je worm  
je gedicht is bijna wat je gedacht had.

Behalve klankinformatie ligt in het geheugen ook kennis opgeslagen over de betekenis van woorden en over hun syntactische eigenschappen. Zo weten we dat koe een zelfstandig naamwoord is. Daarom kunnen we wel zeggen: 'De koe loopt', maar niet: 'De loop koet.' Bij spreken en luisteren wordt al deze informatie in een fractie van een seconde uit het geheugen opgehaald. De snelheid waarmee wij kunnen spreken en luisteren is ronduit verbazingwekkend.

Zonder problemen volgen wij op een doorsnee zondagavond in de uitzending van *Studio Sport* het commentaar bij de paardenkoers van de maand. De verslaggever laat zich daarin door de paarden regelmatig opjagen tot een spreektempo van circa vier woorden per seconde. Om zijn commentaar te begrijpen moeten de kijkers uit hun

omvangrijke mentale woordenbestand de juiste woorden inclusief hun syntactische en semantische kenmerken ophalen. De verslaggever zelf moet bij het spreken met dezelfde snelheid de juiste woorden selecteren, maar ook nog eens de grote hoeveelheid spieren aansturen, zo'n honderd in getal, die bij het articuleren van woorden en zinnen betrokken zijn. Ook bij een doorsnee-spreektempo van twee woorden per seconde blijft dit een verbazingwekkende prestatie.

Dankzij het registreren van de elektrische activiteit van de hersenen hebben we een vrij precies beeld gekregen van het tijdsverloop van het spreekproces. Ik zal dit illustreren aan een voor deze universiteit passend voorbeeld, ontleend aan mijn enige publicatie die door het Vaticaan is uitgegeven.<sup>5</sup>

Stelt u zich voor dat u na het verlaten van deze aula buitengekomen ineens Karol Wojtyla op de campus ontwaart. Een zeer voor de hand liggende reactie is dat u uw metgezel daarvan opmerkzaam maakt door uit te roepen: 'De paus.'

Een enigszins gesimplificeerde versie van het cognitieve architectuurmodel van Roelofs en Levelt specificceert de ophaalprocessen die zich afspelen tussen het herkennen van Karol Wojtyla en het articuleren van het woord 'paus' (zie figuur 6).<sup>6</sup> Op basis van de visuele informatie herkent u Wojtyla, hetgeen aanleiding is tot het activeren van het concept 'paus'. Dit concept bevindt zich in een netwerk van andere concepten die tezamen uw kennis over de paus in het lange-termijngeheugen representeren.

Op basis van het activeren van dit concept wordt in een eerste stap de syntactische informatie opgehaald. Deze zogeheten lemma-informatie vertelt u onder andere dat 'paus' een zelfstandig naamwoord is en geen werkwoord. Vervolgens worden de daarbij horende klanken uit het geheugen opgediept, het klankpatroon samengesteld en de articulatieorganen aangestuurd.

Op basis van elektrofysiologische metingen weten we inmiddels dat circa 40 milliseconden (dat is 1/25 seconde) na het ophalen van de syntactische informatie, de beginklank van 'paus' uit het geheugen wordt opgehaald.

5. Hagoort, P. (1999). The uniquely human capacity for language communication: From pope to [po:p] in half a second. In R.J. Russell, N. Murphy, Th.C. Meyering & M.C. Arbib (Eds.), *Neuroscience and the person* (pp. 45-56). Vaticaanstad: Vatican Observatory Publications/Berkeley, CA: Center for Theology and the Natural Sciences.

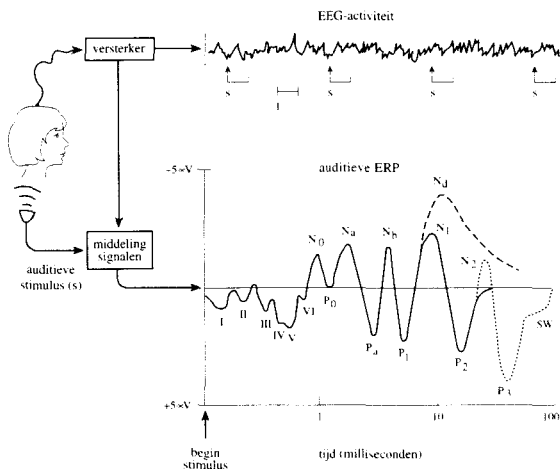
6. Zie voor een uitvoeriger bespreking van dit taalproductiemodel Levelt, W.J.M. (1999). Producing spoken language: A blueprint of the speaker. In C.M. Brown & P. Hagoort (Eds.), *The neurocognition of language* (pp. 83-122). Oxford: Oxford University Press; Levelt, W.J.M., Roelofs, A., & Meyer, A.S. (1999). A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Science*, 22, 1-38.

voorzetsels zijn elementen die het syntactisch cement vormen tussen de inhoudswoorden van de zin. Taalkundigen maken onderscheid tussen inhoudswoorden en functiewoorden. Inhoudswoorden reiken de cruciale betekenisrediënten van de zin aan, functiewoorden spelen een belangrijke rol bij het aanbrengen van de structurele relaties tussen de inhoudswoorden.

Een van de vragen die wij ons stelden was of wij hersenactiviteit konden registreren die laat zien dat, en op welk moment onze hersenen onderscheid maken tussen deze twee typen woorden. Dit deden we door het meten van het EEG.

Ik verwees eerder naar resultaten die gebaseerd waren op het registreren van de elektrische activiteit van het brein. Alvorens te laten zien hoe we langs deze weg voor taal relevante hersenactiviteit kunnen meten, moet ik iets meer over deze methode vertellen.

Informatieoverdracht in het centrale zenuwstelsel vindt onder andere plaats door middel van elektrische activiteit van de zenuwcellen (neuronen). Hans Berger (1873-1941) publiceerde in 1929 een methode om deze elektrische hersenactiviteit bij mensen te registreren met behulp van op de schedel bevestigde elektrodes. Het resulterende EEG (elektro-encefalogram) heeft sindsdien een belangrijke rol gespeeld in de klinische diagnostiek bij patiënten met hersenaandoeningen.



Figuur 8. Geïdealiseerd golfpatroon van de reeks ERP-componenten die zichtbaar worden wanneer het EEG gemiddeld wordt in relatie tot de herhaalde aanbiedingen van een korte auditive stimulus. Op de logaritmische tijdsas zijn achtereenvolgens zichtbaar de vroege hersenstampotentialen (golven I-VI), de zogenaamde midden-latentiecomponenten (No, Po, Na, Pa, Nb), de exogene componenten (P1, N1, P2), en de endogene, cognitieve ERP-componenten (Nd, N2, P3). De componenten met een negatieve polariteit zijn omhoog geplot, de componenten met een positieve polariteit hebben een naar beneden gerichte piek.

Het klinische EEG geeft een globaal beeld van de elektrische activiteit van de hersenen onder bepaalde algemene condities van het organisme, zoals slapen of waken. Het is echter ook mogelijk het EEG te registreren in afhankelijkheid van cognitieve processen.

Indien men het EEG registreert bij iemand die naar een bepaalde stimulus luistert of kijkt en dit EEG daarna middeld over een aantal aanbiedingen van de stimulus, dan zien we een identificeerbaar patroon van negatieve en positieve pieken in het EEG-signaal ontstaan (zie figuur 8). Deze pieken zijn de zogenaamde ERP-componenten, waarbij ERP staat voor 'event-related potential'. Deze ERP's geven onder andere informatie over de aard van bepaalde cognitieve processen, zoals het voorbereiden van een beweging, het registreren van een onverwachte gebeurtenis, enzovoort.<sup>9</sup>

Tegenwoordig worden ERP's veelal gemeten met behulp van een groot aantal elektrodes die in een bepaalde ruimtelijke configuratie op de hoofdhuid zijn bevestigd. Op basis van dergelijke registraties kan een beeld worden verkregen van de in de tijd en over de schedel fluctuerende patronen van potentiaalveranderingen.

In ons onderzoek registreerden wij het EEG over een groot aantal elektrodes terwijl de deelnemers een simpel verhaaltje over de wederwaardigheden van een fles te lezen kregen. Het verhaaltje ging als volgt:

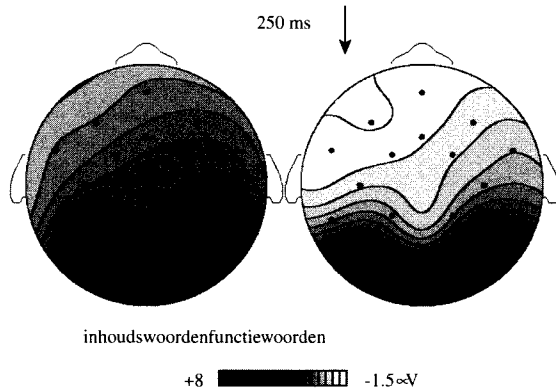
### *Het leven van de fles*

Honderd jaar geleden was een fles ook al een gewoon en dagelijks voorwerp. Toch voelde de fles van ons verhaal zich bijzonder, want zij was een wijnfles. Trots keek zij naar de andere producten van de glasfabriek. Dat waren jampotjes en schalen en glazen. Zij was blij dat zij niet zo was, want wijn is toch heel anders dan jam.

Voor uw gemak heb ik hier een aantal functiewoorden onderstreept, en een aantal inhoudswoorden vet gedrukt. De deelnemers aan het onderzoek zagen echter alle woorden een voor een in witte letters op de monitor verschijnen. Na afloop van de registratie berekenden wij afzonderlijke gemiddelden voor de stukjes EEG die samenhangen met het lezen van inhoudswoorden en voor

9. Voor een uitvoeriger bespreking van de ERP-methode zie Hagoort, P., & Brown, C.M. (1993). Hersenpotentialen als maat voor het menselijk taalvermogen. *Stem-, Spraak- en Taalpathologie*, 2, 213-235; voor een bespreking van deze methode, alsmede voor een uitvoeriger bespreking van PET en fMRI zie Hagoort, P., & Ramsey, N.F. (in druk). De gereedschapskist van de cognitieve neurowetenschap. In F. Verstraten & F. Wijnen (red.). *Het brein in kaart*. Lisse: Swets & Zeitlinger.





Figuur 9. De verdeling van elektrische hersenactiviteit over de schedel voor inhoudswoorden (links) en functiewoorden (rechts) op 250 milliseconden nadat de woorden op het scherm verschenen. Voor de functiewoorden is op dit tijdstip een ERP-component met een negatieve polariteit zichtbaar over het linker frontale gedeelte van de schedel.

de stukjes EEG die verband hielden met het lezen van de functiewoorden.

Figuur 9 laat de topografische kaarten van de potentiaalverdeling over de schedel zien voor beide typen woorden, op 250 milliseconden (dat is  $\frac{1}{4}$  seconde) nadat de betreffende woorden op het scherm verschenen waren. En zoals u kunt zien maakt het brein al binnen een kwartseconde onderscheid tussen inhoudswoorden en functiewoorden. Voor de functiewoorden is op dat moment een negatieve ERP-component zichtbaar over het linker frontale deel van de schedel die we niet zien voor de inhoudswoorden.<sup>10</sup>

Laten we hetzelfde verhaaltje lezen aan afasiepatiënten met een syntactische stoornis ('agrammatische patiënten'), dan blijkt dat in het brein van deze patiënten het onderscheid tussen inhouds- en functiewoorden niet gemaakt wordt op het tijdstip waarop dit voor een efficiënt taalverwerkingsproces kennelijk nodig is. De topografische kaarten voor beide woordsoorten verschillen bij deze patiënten niet.<sup>11</sup>

Welke hersengebieden zijn van belang om het syntactisch cement in zinnen aan te brengen? Om dat te achterhalen deden we een PET-studie waarin deelnemers korte filmpjes te zien kregen. In deze filmpjes botsten simpele geometrische figuren tegen elkaar. In een zo'n filmpje bijvoorbeeld stootte het rode vierkant de groene

ellips weg. Deelnemers werd in één conditie van het experiment gevraagd deze visuele gebeurtenissen in een volledige, grammaticaal correcte zin te beschrijven ('Das rote Viereck stösst die grüne Ellipse weg'). In een andere conditie beschreven ze dezelfde situaties als een losse reeks van woorden zonder syntactisch cement ('Viereck rot, Ellipse grün, wegstossen'). Omdat we dit onderzoek in Duitsland deden met Duitse deelnemers, werden deze gevraagd de visuele gebeurtenissen in het Duits te beschrijven. De syntactische elementen in de zinsconditie zijn vet gedrukt. Dit zijn onder andere de naamvalsmarkeringen van de lidwoorden, de verbuigingsuitgangen van de adjectieven en de vervoeging van het werkwoord. Deze elementen brengen het syntactisch cement in de zinnen aan.

Als we de hersenactiviteit in die conditie vergelijken met die waarin dezelfde situaties als een reeks van losse woorden beschreven wordt, zien we toename van hersenactiviteit in de frontaalkwab van de linker hersenhelft, in een gebied dat grenst aan het gebied van Broca. Dit gedeelte van de cortex is dus kennelijk van groot belang voor het aanbrengen van syntactische structuur in uitingen die uit meer woorden bestaan.<sup>12</sup>

### De cognitief neurowetenschappelijke driehoek

Ik heb u enkele voorbeelden gegeven van onderzoek en onderzoekstechnieken in de cognitieve neurowetenschap. Na deze korte rondleiding in de keuken van dit wetenschapsgebied, wil ik aandacht besteden aan enkele vragen die gaande de excursie wellicht bij u zijn opgekomen.

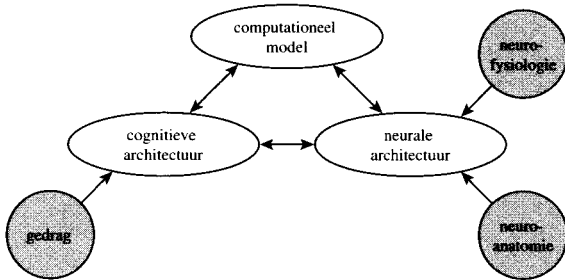
U heeft gezien dat we vandaag de dag de werking van de hersenen in beeld kunnen brengen op een wijze die tot voor kort ondenkbaar was. Maar wetenschap is meer dan het maken van mooie plaatjes. Cognitieve neurowetenschap mag en kan dan ook niet samenvallen met het creëren van hersenbeelden, hoe indrukwekkend die op zichzelf ook zijn. Een eis die aan theorieën en verklaringen in de cognitieve neurowetenschap gesteld moet worden is dat deze de organisatieprincipes van cognitie en de organisatieprincipes van het brein op een transparante manier op elkaar weten te betrekken. Hoe explicieter de organisatieprincipes op beide niveaus zich laten formuleren, des te preciezer zal de relatie tussen brein en cognitie gespecificeerd kunnen worden.

Dit brengt mij tot wat kan worden omschreven als de

10. Zie Brown, C.M., Hagoort, P., & Keurs, M. ter (1999). Electrophysiological signatures of visual lexical processing: Open- and closed-class words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 261-281.

11. Zie Keurs, M. ter, Brown, C.M., Hagoort, P., & Stegeman, D.F. (1999). Electrophysiological manifestations of open- and closed-class words in patients with Broca's aphasia with agrammatic comprehension. An event-related brain potential study. *Brain*, 122, 839-854.

12. Indefrey, P., Brown, C.M., Hellwig, F., Amunts, K., Herzog, H., Seitz, R.J., & Hagoort, P. (2000). *Computing the syntax of speech*. (Ter publicatie aangeboden.)



Figuur 10. De driehoek van de cognitieve neurowetenschap.

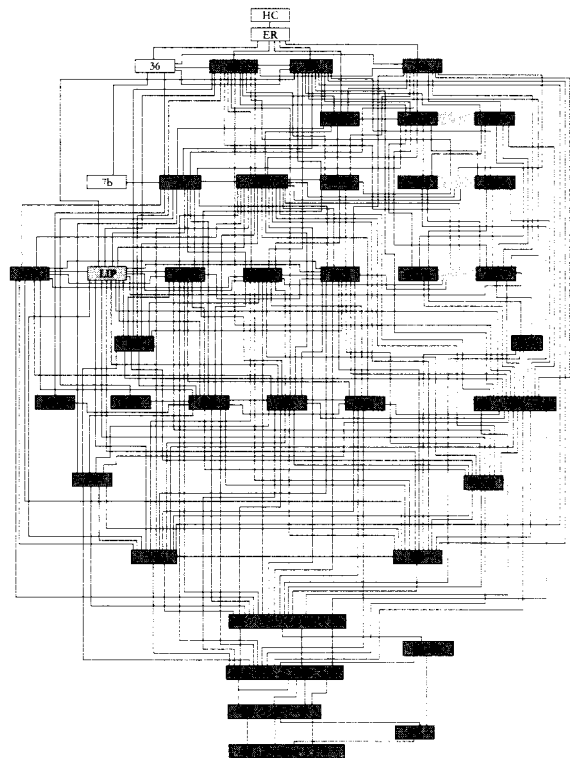
driehoek van de cognitieve neurowetenschap (zie figuur 10). Zonder expliciete analyse van cognitieve functies is onderzoek naar de onderliggende neurale architectuur gedoemd te mislukken. Tegelijkertijd leidt kennis over bouw en werking van de hersenen tot aanpassing en verfijning bij het specificeren van de cognitieve architectuur. Aangezien het hierbij om complexe systemen gaat, zullen computersimulaties nodig zijn om de consequenties van gepostuleerde werkingsmechanismen door te rekenen en voldoende exacte voorspellingen te genereren. Het op elkaar betrekken van deze drie niveaus van analyse vormt de kern van cognitieve neurowetenschap. Heymans experimentele benadering van psychische verschijnselen wordt op deze wijze aangevuld en opgenomen in het bredere kader dat een van Nederlands grootste geleerden reeds meer dan een eeuw geleden voor ogen stond.<sup>13</sup>

Ik doel hier op Franciscus Cornelis Donders (zie figuur 11), die in zijn beroemde artikel 'Over de snelheid van psychische processen' (1868) schreef dat het de taak was van de fysiologie om op basis van een analyse van de psychische verschijnselen 'door het experiment de onderscheiden psychische faculteiten zoo veel mogelijk te localiseeren, en vooral den aard der werking, die de psychische verschijnselen vergezelt, op het spoor te komen' (p. 117). 'De vraag, die de fysiologie zich heeft voor te leggen, is dan eenvoudig deze: wat geschiedt er in de hersenen, terwijl we gevoelen, denken en willen?' (p. 119).<sup>14</sup> Duidelijk is dat Donders zich hier manifesteert als een van de voorlopers van wat we vandaag onder cognitieve neurowetenschap verstaan.

Een andere vraag die wellicht bij sommigen van u is opgekomen, is welke lering uit onze kennis van het brein te trekken valt voor onze theorieën en modellen aangaan-



Figuur 11. Franciscus Cornelis Donders (1818-1889).



Figuur 12. Vertakkingsdiagram van de visuele hersengebieden. Dit diagram representeert de hersencentra die bij visuele waarneming betrokken zijn en hun onderling verbindingen.

de menselijke cognitie. Laat ik een drietal relevante principes van neurale organisatie noemen.

*a Massief parallelisme.* Alle gebieden van de cortex zenden output naar meer dan een gebied. Parallelisme is een kenmerk van alle corticale verbindingen. Het befaamde diagram van Felleman en van Essen

13. Voor een levensbeschrijving van Donders zie Fischer, F.P., & Doeschate, G. ten (1958). *Franciscus Cornelis Donders*. Assen: Van Gorcum.

14. Donders, F.C. (1868). Over de snelheid van psychische processen. *Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laboratorium der Utrechtse Hoogeschool*, 2, 92-120.

voor de verknopingen in het visuele systeem is daarvan een voorbeeld (zie figuur 12).<sup>15</sup> Vergelijkbare diagrammen gelden voor andere cognitieve systemen in het brein.

- b *Gedistribueerde lokalisatie van functies.* In tegenstelling tot wat de negentiende-eeuwse lokalisationisten dachten, is geen enkele cognitieve functie gekoppeld aan een specifiek gebied in de cortex. In alle gevallen gaat het om een netwerk van gebieden waarin de knopen een specialisatie voor een bepaald aspect van de betreffende functie belichamen. Deze specialisatie is eerder relatief dan absoluut. De neurale activiteit van het gehele netwerk, georkestreerd op basis van 're-entry' en synchroniciteit in het vuurpatroon van de neuronen, is het niveau waarop componenten van de cognitieve architectuur neuraal gerealiseerd worden.
- c *Relatieve functionele specialisatie.* Zoals we eerder gezien hebben spelen bepaalde gebieden in de cortex een cruciale rol voor een bepaalde functie zoals de waarneming van kleur, en geen rol bij andere functies. Er is dus sprake van functionele specialisatie in het brein. Deze is echter niet absoluut. V4 bijvoorbeeld is gespecialiseerd voor kleurwaarneming, maar daarnaast ook betrokken bij visuospatieële aandacht en vormcodering. Het gebied van Broca speelt een rol bij syntax, maar ook bij fonologische processen. Individuele corticale gebieden kunnen dynamisch worden ingeschakeld in meerdere functionele netwerken. Dit is wat Mesulam (1998) het principe van selectief gedistribueerde verwerking genoemd heeft: vele corticale gebieden fungeren als knoop in meer dan één functioneel netwerk.<sup>16</sup> 'Top-down'-verbindingen vanuit transmodale gebieden in de cortex zouden een rol kunnen spelen bij het selecteren van een bepaalde corticale knoop ten dienste van het ene of het andere netwerk.

Het zijn dit soort organisatieprincipes van neurale activiteit die van belang zijn voor en beperkingen opleggen aan specificaties van de cognitieve architectuur en aan computationele modellen voor taal, geheugen, waarneming, enzovoort.

Strikt seriële verwerkingsmodellen in de psychologie staan op gespannen voet met het massale parallelisme

15. Felleman, D.J. & Essen, D.C. van (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1, 1-47.

16. Mesulam, M.-M. (1998). From sensation to cognition. *Brain*, 121, 1013-1052. Zie ook Mesulam, M.-M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language and memory. *Annals of Neurology*, 28, 597-613.

waarvan in het brein sprake is. Bepaalde klassen van connectionistische modellen doen onvoldoende recht aan de functionele specialisatie in de cortex.

Het incorporeren van neurobiologische kennis in theorieën over waarneming, taal, geheugen, emotie zal naar mijn overtuiging een belangrijke bijdrage leveren aan een dieper inzicht in menselijke cognitie.

Het gaat hierbij echter niet om een eenrichtingsverkeer. In de neurobiologie ontbreekt het veelal aan voldoende uitgewerkte ideeën over de complexe representatieve structuren die in het spatiotemporele vuurpatroon van groepen corticale neuronen liggen besloten. Om die reden heeft de neurobiologie specificaties van de cognitieve architectuur nodig om op vruchtbare wijze het onderzoek naar de daarmee samenhangende neurale architectuur te kunnen verrichten.

We zijn thans aangeland in een fase waarin hersenonderzoekers en onderzoekers naar cognitie voldoende vooruitgang hebben geboekt om elkaars kennis zinvol in het eigen onderzoek in te vlechten. Op den duur zal dit leiden tot een steeds grotere verwevenheid van de betrokken vakgebieden en een steeds verdergaande co-evolutie of zelfs integratie van theorieën op het gebied van hersenen en cognitie.

Tenslotte kan men zich afvragen of mijn inschatting dat wij afstevenen op een toekomstige eeuw der cognitieve neurowetenschap niet illusoir is in het licht van gevestigde academische belangen en tradities, en het daarmee gepaard gaande verzet tegen verandering. Ten aanzien van deze kwestie ben ik allerminst pessimistisch. Niet-tegenstaande de vele psychologische, sociologische en contingent-historische (tezamen externe) factoren die het wetenschapsbedrijf beïnvloeden, wordt in de wetenschap de koers uiteindelijk toch in sterke mate bepaald door de interne kennisdynamiek. Zoals in het verleden nieuwe wetenschapsgebieden ontstonden uit het samengaan van andere wetenschapsgebieden, een bekend voorbeeld is het samengaan van de Mendeliaanse klassieke genetica en de Darwiniaanse evolutietheorie in de moderne synthese<sup>17</sup>, zo zien we thans een zelfde beweging richting cognitieve neurowetenschap. Het is als met de drijvende eilanden in het meer van Titicaca. De interne kennisdynamiek fungeert als de onderstroom die de eilanden van psychologie, neurobiologie, biofysica en informatica naar elkaar toe drijft, grensoverschrijdingen mogelijk maakt en de federatie van de cognitieve neurowetenschap vorm geeft.

17. Voor andere voorbeelden van co-evolutie van wetenschapsgebieden zie met name hfst. 9 in Churchland, P.S. (1986). *Neurophilosophy: Toward a unified science of the mind-brain*. Cambridge, MA: MIT Press.

Het decennium van het brein is in de Verenigde Staten net afgelopen. In Duitsland is het decennium van het menselijk brein onlangs begonnen. Wetenschappelijk en maatschappelijk leeft de verwachting dat doorbraken in onze kennis over hersenen en geest aanstaande zijn. Of en wanneer deze verwachting zal worden ingelost is uiteindelijk niet voorspelbaar. Wat beleidsmakers en politici maar al te vaak vergeten is dat beleid gebaseerd is op de kennis van vandaag, maar dat het in de wetenschap gaat om de kennis van morgen. Daarvoor geldt, zoals Popper heeft opgemerkt, dat we vandaag niet kunnen voorzien wat we pas morgen zullen weten.<sup>18</sup>

Ook al zijn garanties aangaande onze kennis van morgen niet te geven, desalniettemin trekt de cognitieve neurowetenschap dankzij nieuwe mogelijkheden het menselijk brein in werking te onderzoeken steeds meer onderzoekers en talentvolle studenten aan. Om die reden is er dan ook alle aanleiding om bij de 'weddenschap van het weten' hierop in te zetten, en de grenzen van onze kennis van hersenen en cognitie verder te verleggen. Het is buitengewoon verheugend dat dit besef aan deze universiteit bij velen leeft en er een breed draagvlak is voor de verdere uitbouw van de cognitieve neurowetenschap in Nijmegen.

### De Gagarin van onze tijd

In de afgelopen drie kwartier produceerden mijn hersenen circa achtduizend woorden. Circa honderd spieren zijn daarbij actief geweest om die uit te spreken. Als het goed is, heeft u tijdens de afgelopen drie kwartier moeiteloos duizenden woorden herkend op basis van de luchttrillingen die ik voortbracht. Uw hersenen zijn daarbij voortdurend actief geweest. Een heel netwerk van gebieden in uw brein heeft deze geluidstrillingen waargenomen, de woordklanken herkend, deze informatie doorgeschakeld naar de hersengebieden waar de betekenis van woorden wordt gereconstrueerd, die woordbetekenissen geïntegreerd met de visuele informatie in de getoonde lichtbeelden en gecombineerd met kennis die in het lange-termijngeheugen bewaard wordt. Dit alles voltrekt zich grotendeels buiten ons bewustzijn om en in fracties van seconden.

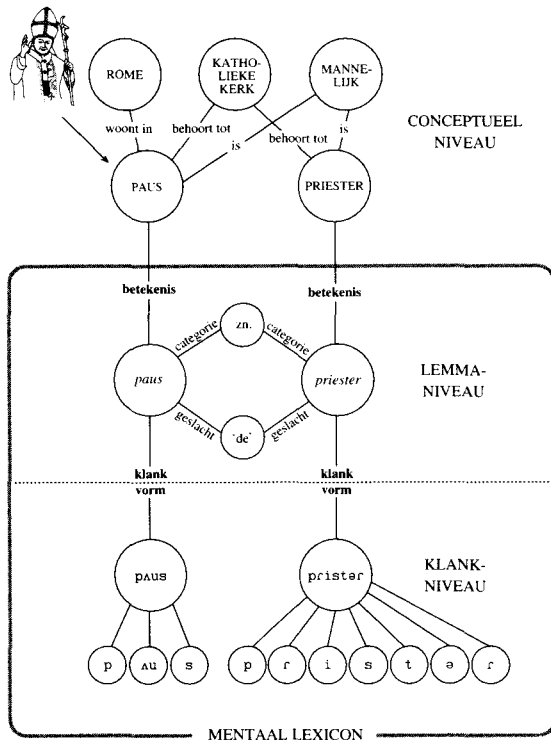
Het hele complex van al deze mentale processen wordt mogelijk gemaakt door een microkosmos van meer dan honderd miljard zenuwcellen met een veelvoud daarvan aan verbindingen. Deze microkosmos, veilig opgeslagen achter het benig omhulsel van ons schedeldak, is

niet groter dan een halve voetbal. Weinig is fascinerender dan de ontdekkingsreizen door deze microkosmos, op zoek naar de fundamenten van wat ons in staat stelt te zijn wie we zijn: het vermogen om te herinneren, onze gedachten in woorden uit te drukken, emoties te voelen, handelend in de wereld te staan. De cognitieve neurowetenschapper is de Gagarin van de eenentwintigste eeuw, de ruimte reiziger in de microkosmos van ons brein.<sup>19</sup>

18. Popper, K.R. (1957). *The poverty of historicism*. Londen: Routledge & Kegan Paul.

19. René de Bruin, Inge Doehring, en Frauke Hellwig dank ik voor hun bijdrage aan het uitwerken en drukklaar maken van de figuren. De gesproken versie van deze rede met de daarbij horende illustraties kan worden nagelezen op de website van het F.C. Donderscentrum: [www.mpi.nl/donders](http://www.mpi.nl/donders).

VisueleForm



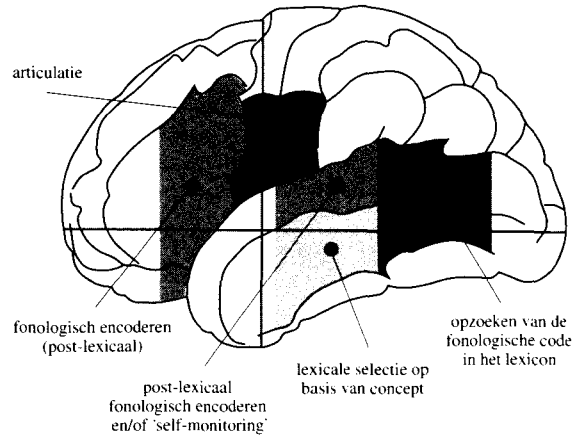
Figuur 6. De cognitieve architectuur voor het ophalen van de woordinformatie behorend bij het woord 'paus'.

Tevens hebben we gevonden dat het klankpatroon van een woord niet in een keer in zijn geheel wordt opgehaald, maar van links naar rechts. Daarbij duurt het iets minder dan 80 milliseconden om de overige klanken van 'paus' op te halen nadat de p-klank beschikbaar gekomen is.<sup>7</sup>

Op basis van dit soort registraties van hersenactiviteit, waarover ik zo dadelijk nog iets meer zal vertellen, is de temporele dynamiek van de processen die aan spreken ten grondslag liggen nauwkeurig in kaart gebracht. Tevens maken deze resultaten duidelijk dat woorden

7. Voor een gedetailleerde bespreking van deze resultaten zie Hagoort, P., & Turenout, M. van (1997). The electrophysiology of speaking: Possibilities of event-related potential research on speech production. In W. Hulstijn, H.F.M. Peters & P.H.H.M. Van Lieshout (red.), *Speech production: Motor control, brain research and fluency disorders* (pp. 351-361). Amsterdam: Elsevier Science; Turenout, M. van, Hagoort, P., & Brown, C.M. (1997). Electrophysiological evidence on the time course of semantic and phonological processes in speech production. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 787-806; Turenout, M. van, Hagoort, P., & Brown, C.M. (1998). Brain activity during speaking: From syntax to phonology in 40 milliseconds. *Science*, 280, 257-274.

niet als kant en klare pakketjes in ons brein liggen opgeslagen. Uit een analyse van een groot aantal PET- en fMRI-studies naar het ophalen van woordinformatie blijkt dat een heel netwerk van hersengebieden in de linker hersenhelft daarbij betrokken is. Al deze gebieden worden op een neurale georkestreerde wijze in het spreekproces ingeschakeld (zie figuur 7).<sup>8</sup>



Figuur 7. Een schematische weergave van de gebieden in de linker hersenhelft die bij het spreken van een woord betrokken zijn (met dank aan Peter Indefrey).

Tot zover heb ik het gehad over het spreken van losse woorden. Echter, doorgaans lezen of spreken we geen losse woorden, maar uitingen bestaande uit een hele reeks woorden. Hoe die woorden met elkaar samenhangen wordt onder meer bepaald door de grammaticale kennis die in ons brein ligt opgeslagen.

Een voorbeeld uit de categorie 'man bijt hond'. In talen zoals het Duits bepaalt onder andere de naamvalsmarkering van het lidwoord of een zelfstandig naamwoord onderwerp dan wel lijdend voorwerp van de zin is. 'Der Hund hat den Bundeskanzler gebissen' en 'Den Hund hat der Bundeskanzler gebissen' bevatten beide dezelfde inhoudswoorden (hond, bondskanselier, bijten) en ook nog eens in dezelfde volgorde. Toch is de betekenis van deze zinnen verschillend. In het eerste geval gaat het om de hond die de bondskanselier bijt, in het tweede geval is sprake van het 'man bijt hond'-scenario. Alleen het laatste geval zou zonder enige twijfel de kolommen van *Bild* halen.

Het verschil tussen beide zinnen zit hem in de lidwoorden. Lidwoorden, voegwoorden zoals want en maar, en

8. Zie ook Indefrey, P., & Levelt, W.J.M. (2000). The neural correlates of language production. In M. Gazzaniga (red.), *The new cognitive neurosciences* (pp. 845-865). Cambridge, MA: MIT Press.