

Henk Barendregt

Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica
Radboud Universiteit Nijmegen
henk@cs.ru.nl

In Memoriam Nicolaas Govert de Bruijn (1918–2012)

Het bewustzijnsmodel

In de jaren negentig schreef Dick de Bruijn een aantal artikelen over het menselijk bewustzijn. Henk Barendregt, hoogleraar grondslagen van de wiskunde en informatica aan de Radboud Universiteit Nijmegen, beschrijft het model dat De Bruijn hiervoor opstelde.

We presenteren een model van het menselijke bewustzijn opgesteld door N.G. de Bruijn in [4–6].

Voor een belangrijk deel behandelt het model het geheugen. Een *associatief geheugen* (AG) is een ‘systeem’ dat in staat is het volgende te doen. Stel twee elementen a, b uit een verzameling Σ van ‘signalen’ worden aan het systeem opeenvolgend gepresenteerd binnen een kort tijdsinterval. Dan ‘onthoudt’ het systeem dat a wordt gevolgd door b , en wel op de volgende wijze: indien het systeem later de vraag ‘ a ?’ krijgt toegevoegd, dan kan het antwoorden met ‘ b !’. Dit idee wordt ‘cued recall’ genoemd en werd al vroeg in de experimentele psychologie beschreven [8]. Indien de *capaciteit* van het systeem bij de eerste toediening van het paar $\langle a, b \rangle$ is overschreden, zal er bij latere navraag geen antwoord komen. Ook heeft het systeem een bepaalde (on)betrouwbaarheid: de kans dat een antwoord (on)juist is.

De kern van het model van De Bruijn bestaat uit een precieze beschrijving van hoe een groot aantal ($N = 10^{10}$) systemen van AG met beperkte capaciteit en betrouwbaarheid op eenvoudige manier te combineren is, zodat een nieuw systeem ontstaat met een grote capaciteit en een zeer grote betrouwbaarheid. Als hypothese wordt een mechanisme geponeerd waardoor het samengestelde geheugen versterkt kan worden door middel van oefenen.

Vanuit het samengestelde geheugen definiëert De Bruijn *bewustzijn* en *onderbewustzijn*. Dit heeft een aantal gevolgen voor de werking ervan. Een van die gevolgen is dat bewustzijn *kortstondig* is: de inhoud ervan verdwijnt snel. Om dit tegen te gaan heeft men het mechanisme van *concentratie* nodig.

Het geheugen model

De mogelijkheid om *cued recall* correct uit te voeren voor een groot aantal paren, kan gevoelig gezien worden als een nodige en voldoende voorwaarde voor een geheugen.

Gewenste eigenschappen

Stel we hebben een aantal ‘kleine’ eenheden van AG met beperkte capaciteit en betrouwbaarheid. Hoe kunnen deze samenwerken om te komen tot een ‘groot’ AG? Dit met een grote capaciteit en liefst ook nog snel, betrouwbaar, robuust en relatief (energie) zuinig. Om de capaciteit te vergroten met een factor k , zou je in eerste instantie kunnen denken aan een k -tal kleine geheugeneenheden. De paren worden opgeslagen in een eenheid, tot dat deze vol zit. Doorgaand vul je de volgende eenheid, enzovoorts. Dan ontstaat het probleem dat om informatie terug te vinden bekend moet zijn waar deze is opgeslagen. Maar een adresseringssysteem kost ook geheugen. Bovendien is deze oplossing niet robuust: indien de eenheid waarin $\langle a, b \rangle$ opgeslagen wordt defect raakt, dan is de informatie verloren.

Een ‘paradox’

Het model van De Bruijn is gebaseerd op een eenvoudig principe, dat hier weergegeven wordt als een bekende pseudo-paradox: *Wanneer een volwassen persoon met normale longinhoud heeft ingeademd, dan bevatten zijn of haar longen minstens één molecuul zuurstof, dat ooit door Archimedes is ingeademd.* De verklaring van deze ‘paradox’ is gelegen in het feit dat het getal van Avogadro (10^{23} , de grootteorde van het aantal moleculen in een mol) groot is, zelfs ten opzichte van de verhouding van drie/zes liter (normale

longinhoud van een volwassen vrouw/man) lucht tot alle lucht op aarde.

Opbouw van een groot geheugen

Het model voor een groot geheugen bestaat uit een *operating system* dat de beschikking heeft over een groot aantal kleine geheugeneenheden, welke op de volgende manier samenwerken. De kleine geheugeneenheden worden gevraagd *at random* gedurende korte tijd op te letten (ze staan dan AAN) of er informatie dan wel een vraag langskomt. Voor het grootste deel van de tijd zijn ze in rust (UIT). Als typische getallen neemt De Bruijn: gemiddeld 0,5 seconde AAN op gemiddeld 4 uur UIT, een verhouding in de orde van 1 op de 10^4 . Tijdens de leerfase stuurt het *operating system* een paar $\langle a, b \rangle$ naar alle eenheden. Slechts het gedeelte dat AAN staat, slaat de informatie op. Op een later moment komt de vraag $a?$, welke eveneens naar alle eenheden wordt uitgezonden die dan AAN staan. Indien er $N = 10^{10}$ eenheden zijn, dan staan er op een willekeurig moment zo’n 10^6 eenheden AAN. Dat betekent dat er tijdens de vraag ongeveer 100 eenheden AAN staan die dat ook waren tijdens de leerfase van $\langle a, b \rangle$. (Argumentatie als bij de pseudo-paradox.) Uit de 100 antwoorden, mogelijk foutief, kan door meerderheid van stemmen het juiste antwoord geconcludeerd worden door het *operating system*. Hierbij moet dan wel aangenomen worden dat de mogelijke fouten niet systematisch zijn. De capaciteit van het aldus gevormde grote geheugen is in de orde van \sqrt{N} maal dat van de minimumcapaciteit van de kleine geheugens. Indien deze ieder een betrouwbaarheid hebben van 0,5, dan is de betrouwbaarheid van het grote geheugen $1 - e^{-20}$. Het grote AG is verder robuust, snel (indien er een snelle manier is om alle cellen te bereiken), en relatief energie-efficiënt. Wel moeten er ieder moment 10^6 cellen AAN staan, hetgeen verklaart waarom het brein toch veel energie verbruikt.

Dat ze niet alle 10^{10} AAN staan is de reden van de relatieve efficiëntie. Voor de afleidingen zie [6].

De kleine geheugeneenheden

De werking hiervan werd door De Bruijn als volgt voorgesteld. De informatiedragers $a, b, \dots \in \Sigma$ worden als kettingvormige moleculen A, B, \dots gerepresenteerd. Indien nu het paar $\langle a, b \rangle$ in de leerfase aangeboden wordt, dan worden de moleculen A gevolgd door B gevormd in de geheugeneenheid, die we als een cel kunnen voorstellen. Onmiddellijk daarna wordt door een enzym het molecuul $A * B$ gevormd, waarop de moleculen A en B verdwijnen. Wanneer later de vraag $a?$ gesteld wordt, dan ontstaat er een molecuul $A?$. Met behulp van een ander enzym wordt op dat moment een molecuul van de juiste vorm $A * B$ gezocht en daaruit wordt $B!$ geproduceerd, welke een codering is voor het antwoord $b!$. Op de aard van de informatiedragers en de vertaling naar moleculen gaat De Bruijn niet in.

Indien één neuron kan dienen als kleine geheugeneenheid, dan is er voor het grote geheugen in het menselijke brein plaats voor $N > 10^{10}$ eenheden. Omdat 'geheugeneenheid' een abstract begrip is, kan het wellicht ook geïnterpreteerd worden door een neuraal net. Hiervan is het aantal in het brein nog groter.

Operating system

De Bruijn had ook ideeën over de werking van het *operating system*. Hij stelde zich een dynamische boom van vertakkende neuronen voor, waarbij een neuron al dan niet contact maakt met een volgend neuron. De Bruijn stelde zich bewegende synapsen voor. In verband met de benodigde snelheid kan dit het beste voorgesteld worden door synapsen naar een tussenstation, waar de puls al dan niet doorgegeven wordt aan een volgend neuron. De neuronen welke op een gegeven moment met een centrale processor via deze vertakkingen in contact staan, kunnen dan gezien worden als die geheugeneenheden die op dat moment AAN staan, klaar voor opslag en terugvinden van informatie. De eenvoudige statistische analyse waarmee de capaciteit en betrouwbaarheid van het grote geheugen hierboven berekend was, zal moeten worden aangepast omdat de eenheden niet meer onafhankelijk zijn: de afstand tot de beginknoop van de boom speelt nu een rol. Dit zou kunnen bijdragen om een door De Bruijn in [7] zelf genoemd onrealistisch aspect van het model van het grote geheugen te ondervangen: in de

hersenen bestaan er gespecialiseerde gebieden voor bepaalde taken. Bovendien is het brein minder betrouwbaar dan $1 - e^{-20}$.

Geheugenversterking

Soms kan het geheugen niet terugvinden welke associatie er gemaakt was. Dat kan komen doordat de parameters van het model ongunstig zijn, zodat de eenheden die op een gegeven moment AAN staan het antwoord niet bezitten. Of doordat het boommodel een ongunstige werking heeft op de bereikbaarheid van de eenheden die het antwoord wel weten.

De volgende hypothese wordt daarom voorgesteld. Tijdens het terugvinden van informatie door de vraag $a?$ komt van sommige geheugeneenheden het antwoord $b!$. De *echohypothese* in [4–5] stelt dat het paar $\langle a, b \rangle$ dan nogmaals wordt uitgezonden, zodat meer eenheden de associatie kunnen onthouden. Op deze manier kan het grote geheugen leren informatie beter te onthouden door middel van *repeteren*.

Bewustzijn

Volgens het geheugenmodel is er op ieder moment t een verzameling $A(t)$ bestaande uit actieve geheugeneenheden. We kunnen het, deels in navolging van De Bruijn (hij gebruikt 'roaming random set'), de 'rondtrekkende geheugen-buffer' noemen. Het is niet zo dat er een vaste buffer is waarin informatie in en uit gaat. Steeds andere geheugeneenheden worden uitgekozen door een bewegend vizier, door De Bruijn vergeleken met een computer *window* gebruikt bij het schrijven en redigeren van een tekstbestand.

Input $a \in \Sigma$ komt in eerste instantie van de buitenwereld. Deze wordt later als vraag $a?$ aan het geheugen gesteld, en op moment t geeft het aanleiding tot de reactie $b!$ vanuit $A(t)$. Al deze $a?$ en $b!$ vormen de bouwstenen van bewuste ervaring. Niet alle informatie die uit de eenheden van $A(t)$ komen is echter bewust, De Bruijn noemt ze 'onderbewust'. Tegenwoordig gebruikt men de naam 'pre-conscious' [13]. Voor bewustzijn is meer nodig.

Reflectie

Deze signalen gebruikt in $A(t)$ zijn weer mogelijke input voor een volgende geheugenbuffer. Een signaal c kan beschouwd worden en dan ontstaat er een signaal ' c ', dat wil zeggen de waarneming van c . Door De Bruijn wordt dit 'thinking about c ' genoemd. Tegenwoordig gebruikt men de naam '*meta-awareness*' [14]. Deze vorm van hergebruik van informatie wordt 'reflectie' genoemd. Het voordeel

van reflectie is het volgende. Stel dat paren $\langle a_1, a_2 \rangle, \langle a_2, a_3 \rangle, \langle a_3, a_4 \rangle, \dots$ zijn opgeslagen. Het scenario $a_1 - a_2 - a_3 - a_4 - \dots$ zal dan afgespeeld kunnen worden. Heeft men de beschikking over *meta-awareness*, dan kan het genoemde scenario beschouwd worden, zonder dat het in werkelijkheid afgespeeld hoeft te worden ' a_1 '-' a_2 '-' a_3 '-' a_4 '- \dots : 'op papier' zou je als wiskundige kunnen zeggen. Definieer $R(t)$ als dat deel van $A(t)$ waarin reflectieve elementen ' a ' worden verwerkt. Dit gedeelte gaat over de informatie welke De Bruijn (de inhoud van) het *bewustzijn* noemt.

Denken

Voor het ontwikkelen van (wiskundig) denken is *rekenen* door het brein minder belangrijk dan *patroonherkenning*. Dat laatste is vergelijkbaar met het oplossen van een legpuzzel: je probeert wat, en als een aantal stukjes passen heb je een eilandje waarmee je verder kunt bouwen. In samenwerking met reflectie kunnen verschillende niveaus van abstractie ontstaan.

Persoonlijkheid

Het vreemde gevoel dat onze persoonlijkheid een toeschouwer is van het lichaamgeesttheater zou in verband kunnen staan met reflectie. Het solipsisme wordt door De Bruijn gezien als noch waar, noch onwaar, maar vooral als een steriele houding [5].

Het geheugenmodel is flexibel genoeg om meerdere *operating systems* toe te laten die alle gebruik kunnen maken van hetzelfde grote geheugen [5]. Hierbij kun je denken aan het verschijnsel 'meervoudige persoonlijkheid'. Daarbij kan het model de mogelijkheid van aanwezigheid of afwezigheid van gedeelde kennis van die persoonlijkheden op natuurlijke wijze verklaren.

The 'hard problem'

De houding van De Bruijn was bescheiden. Hij had niet de pretentie dat zijn model een oplossing geeft van het 'moeilijke' lichaamgeestprobleem [2], dat vraagt naar een verklaring van 'ervaring'. "Het lijkt erop dat geen enkele theorie deze moeilijkheid kan oplossen", aldus De Bruijn in [5].

Gevolgen

Een van de gevolgen van het model is dat het bewustzijn vluchtig is. De rondtrekkende geheugenbuffer bestaat slechts gedurende in de orde van één seconde. Na het verdwijnen van $A(t)$ en $R(t)$ komen er nieuwe versies. Wel kan men door herhaling de inhoud van be-

	van $C_1 - C_2$	via	naar C_2
De Bruijn	<i>subconsciousness</i>	R	<i>consciousness</i>
Edelman [9]	<i>consciousness</i>	R	<i>reflective consciousness</i>
Hobson [10]	<i>protoconsciousness</i>	R	<i>higher-order consciousness</i>
Dehaene [13]	<i>preconsciousness</i>	A	<i>consciousness</i>
Block [1]/ Lamme [11]	<i>phenomenal consciousness</i>	A	<i>access consciousness</i>

Tabel 1 Bewustzijnsmodellen en -terminologie. R: *reflection*, A: *attention*.

wustzijn vasthouden. Dat is het mechanisme van *concentratie* [5]. Of een bewust fenomeen verschijnt op grond van de buitenwereld of op grond van een fantasie of droom kan niet bepaald worden door het mechanisme, maar alleen door een aantal criteria van consistentie van de inhoud.

Vrije wil

Het standpunt van De Bruijn is dat mensen geen vrije wil hebben, maar wel de ervaring ervan. Hieruit volgt niet dat er al dan geen determinisme is op lagere niveaus. Het effect van een groot aantal deterministische deelprocessen kan gezien worden als *random* proces. Non-determinisme op kwantumniveau kan op het volgende niveau deterministisch lijken, op het volgende niveau weer *random*, een niveau hoger als volledig logisch en tenslotte op het hoogste niveau overkomen als een creatief proces met serendipiteit [5].

Andere modellen

Door De Bruijn worden andere modellen verwelkomd, met name om te zien waar ze elkaar tegenspreken en waar ze overeenkomen. Moderne theorieën over het bewustzijn hanteren alle, net als die van De Bruijn, twee lagen: $C_1 \supseteq C_2$. De laag C_1 kan als '*basisbewustzijn*' aangemerkt worden en het deel C_2 als een meer specifieke vorm van bewustzijn. In het model van De Bruijn zijn dat $A(t)$ en $R(t)$. Verder is er verschil in de naamge-

ving en de manier waarop de tweede laag bepaald wordt. We hanteren de Engelse namen om niet *nóg* meer verwarring te veroorzaken, zie Tabel 1. In alle modellen is er ook een begrip *onbewust* (*unconscious*). Impliciet in het model van De Bruijn, waar je dit begrip kunt definiëren als de toestand van alle kleine geheugeneenheden die uit staan, en expliciet in de andere modellen.

Het lijkt aantrekkelijk om het verschil tussen aandacht (*attention*) en reflectie (*reflection*) als volgt te duiden. Aandacht is een manier om uit C_1 een keuze te maken. Inderdaad, de drie genoemde auteurs welke aandacht hanteren als verschil tussen C_1 en C_2 spreken over *selective attention*. Deze manier hoeft niet bewust te zijn, ze kan zelfs geheel onbewust zijn. Het begrip '*reflectie*' (*reflection*) zou gezien kunnen worden als een bewuste variant van aandacht. Om dan niet in een oneindige *loop* te geraken kan men reflectie zien als selectieve aandacht welke volgens C_1 bewust is. Doorspelend met deze gedachte is '*mindfulness*' [12] wellicht selectieve aandacht welke bewust is volgens C_2 . Deze beschouwingen vallen buiten het bestek van dit artikel, maar laten wel zien dat het model van De Bruijn mee kan tellen in de hedendaagse discussies.

Rumoerige ontvangst van het model

Zijn eerste ideeën over de werking van het menselijke bewustzijn rapporteerde Dick de Bruijn in een voordracht op een vergade-

ring van de KNAW in 1974 over het onderwerp: 'Wiskundige modellen van het levende brein' [3]. Dat artikel bevatte nog niet het begrip 'rondtrekkende *random* buffer'. Tijdens de discussie kreeg hij de wind van voren: "Dit verhaal heeft niets met de hersenen te maken!", zo werd hem verweten. De titel van de voordracht was inderdaad niet gelukkig gekozen. Het waren ideeën over het menselijke bewustzijn, met name over het geheugen. In latere artikelen [4–7], pas na twintig jaar dus, werd de methodologie van een mathematisch model steeds meer expliciet gemaakt. "Omdat het lichaam-geestprobleem (hoe werkt het bewustzijn op grond van wat men over het lichaam weet?) niet is opgelost — noch door de (moleculaire) biologie, noch door de (cognitieve) psychologie en ook niet door de neurowetenschappen — valt deze vraag in een niemandsland. Hier kan een wiskundige bijdragen. Deze weet immers wat het betekent om een model te hebben: het houdt niet noodzakelijk de waarheid in, taal en metaal moeten uit elkaar gehouden worden. Door kennis van wiskundige redeneringen, van computerarchitectuur en waarschijnlijkheid kan men tot een bijdrage komen, ook al is het niemandsland een mijnenveld omdat de wiskundige te geringe kennis van genoemde andere disciplines kan hebben." Aldus De Bruijn in [7] (citaat niet letterlijk).

Uit het feit dat er vijf verschillende publicaties zijn over het bewustzijnsmodel, en uit persoonlijke gesprekken met Dick de Bruijn, werd duidelijk dat hij er belang aan hechtte dat men kennis zou nemen van het model.

Dankwoord

Ik dank Hans Maassen, Antonino Raffone en Marieke van Vugt voor nuttige informatie. Dit stuk is geschreven met ondersteuning van The Netherlands Institute for Advanced Study in the Humanities and Social Sciences (NIAS).

Referenties

- 1 N. Block, Consciousness, accessibility, and the mesh between psychology and neuroscience, *Behavioral and Brain Sciences*, 30(5-6):481–499, 2007. Discussion 499–548.
- 2 D. Chalmers, *The Conscious Mind*, Oxford University Press, 1996.
- 3 N.G. de Bruijn, Wiskundige modellen voor het levende brein, *Verslag van de Gewone Vergadering Afd. Natuurkunde*, 83:156–164, 1974.
- 4 N.G. de Bruijn, A model for information processing in human memory and consciousness, *Nieuw Archief Wiskunde*, 4(12):35–48, 1994.
- 5 N.G. de Bruijn, Can people think?, *Journal of Consciousness Studies*, 3:425–447, 1996.
- 6 N.G. de Bruijn, A model for associative memory, a basis for thinking and consciousness, In P. van Emde Boas J. Wiedermann and M. Nielsen, editors, *Automata, Languages and Programming*, Proceedings of the 26th International Colloquium, ICALP '99, Prague, volume 1644 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 74–89. Springer, 1999.
- 7 N.G. de Bruijn, A mathematical model for biological memory and consciousness, In Fairouz D. Kamareddine, editor, *Thirty Five Years of Automating Mathematics*, pages 9–23. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- 8 H. Ebbinghaus, *On memory: A contribution to experimental psychology*, Teachers College, Columbia University, New York, 1885/1913.
- 9 G.M. Edelman, *The Remembered Present: A Biological Theory of Consciousness*, Basic Books, New York, 1990.
- 10 J.A. Hobson, REM sleep and dreaming: towards a theory of protoconsciousness, *Nature Reviews Neuroscience*, 10(11):803–862, 2009.
- 11 V.A.F. Lamme, Why visual attention and awareness are different, *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1):12–18, 2003.
- 12 A. Raffone and N. Srinivasan. An adaptive workspace hypothesis about the neural correlates of consciousness: insights from neuroscience and meditation studies. In N. Srinivasan, editor, *Progress in Brain Research: Attention*, pages 161–180. Elsevier, 2009.
- 13 Dehaene S., Changeux J.P., Naccache L., Sackur J., and Sergent C, Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy, *Trends Cogn Sci.*, 10(5):204–211, 2006.
- 14 J.W. Schooler, Re-representing consciousness: Dissociations between consciousness and meta-consciousness, *Trends in Cognitive Science*, 6:339–344, 2002.