

## Samenvatting

Deze samenvatting, en ook grote delen van dit proefschrift, zijn geschreven met behulp van het programma 'Concentrate'<sup>1</sup>. Concentrate is geen normaal programma, het kan niet gebruikt worden om mee te chatten, te schrijven, of te internetten. Nee, Concentrate zorgt er juist voor dat er niet teveel dingen tegelijkertijd gedaan kunnen worden, het dwingt *monotasking* af. Want terwijl in onze samenleving *multitasken* langzamerhand tot de standaard wordt verheven – hoe vaak zie je wel geen bellende fietsers? – hebben wetenschappers juist laten zien dat mensen vaak minder goed presteren als ze meerdere dingen tegelijkertijd doen.

Dit proefschrift gaat over één van de oorzaken van multitaskingproblemen: een beperking in het verwerken van tussenresultaten (bijvoorbeeld ' $3x = 12$ ' wanneer ' $3x - 7 = 5$ ' opgelost moet worden). We laten zien dat als mensen een tussenresultaat voor meerdere taken tegelijkertijd moeten onthouden, hun prestatie op deze taken sterk vermindert. Volgens onze theorie worden de tussenresultaten namelijk opgeslagen in de zogeheten werkgeheugen-module in ons brein. Deze module kan echter maar één tussenresultaat tegelijkertijd opslaan, en fungeert dus als een beperkende factor in het multitasken wanneer mensen meerder tussenresultaten nodig hebben. Als dat het geval is moeten de tussenresultaten namelijk constant uitgewisseld worden tussen de werkgeheugen-module en het gewone geheugen. Deze uitwisseling kost tijd en kan soms misgaan, en leidt daarom tot een verminderde multitaskingprestatie.

In deze samenvatting zal ik proberen duidelijk te maken hoe we deze beperking in het verwerken van tussenresultaten (door ons de *problem state bottleneck* genoemd) onderzocht hebben, en wat de specifieke resultaten waren. Ik zal eerst de onderzoeksmethoden toelichten die we gebruikt hebben, gevolgd door de resultaten en onze uiteindelijke theorie.

## Onderzoeksmethoden

### Gedragsexperimenten

We hebben de *problem state bottleneck* met een aantal verschillende methoden onderzocht. Ten eerste hebben we gebruik gemaakt van gedragsexperimenten. In deze experimenten hebben we proefpersonen verschillende taken laten uitvoeren achter de computer, en gekeken hoe de eigenschappen van de taken hun prestaties beïnvloedden. Hierbij hebben we gekeken naar reactietijden en naar fouten die proefpersonen maken (bv. in Hoofdstuk 2), maar ook naar wat het effect van de taken was op de pupilgrootte van de proefpersonen (Hoofdstuk 3). Sinds de jaren zestig is het namelijk bekend dat de grootte van onze pupillen beïnvloed wordt door hoe moeilijk een taak voor ons is: hoe moeilijker de taak, hoe groter onze pupillen. Door het meten van pupilgrootte is het dus mogelijk om uit te vinden hoe moeilijk een taak is, zonder dat het de proefpersonen expliciet gevraagd hoeft te worden en zonder dat de taak onderbroken

<sup>1</sup> <http://getconcentrating.com/>

wordt. Naast deze standaard psychologische onderzoeksmethoden hebben we echter ook gebruik gemaakt van twee methoden die waarschijnlijk iets meer uitleg behoeven: cognitief modelleren en modelgebaseerde neurowetenschap.

## Cognitieve Modellen

Na het doen van een aantal gedragsexperimenten, is het relatief gemakkelijk om een theorie te bedenken die de resultaten verklaart. Stel dat proefpersonen altijd meer fouten maken als ze twee tussenresultaten moeten onthouden in plaats van één. Dat zou uitgelegd kunnen worden met een theorie die stelt dat we een werkgeheugen-module hebben die maar één enkel tussenresultaat tegelijkertijd kan opslaan. Maar wat betekent dat? Vergeten we het andere tussenresultaat dan? Als blijkt dat proefpersonen de taak in de helft van de gevallen nog wel goed doen, maar veel trager zijn dan in een situatie met maar één tussenresultaat, dan kan de theorie uitgebreid worden met het idee dat het tweede tussenresultaat opgeslagen wordt in ons normale geheugen. Omdat het ophalen uit ons normale geheugen meer tijd kost leidt dat tot tragere reacties, en soms zal een tussenresultaat vergeten worden. Maar... hoeveel tijd kost het dan om een tussenresultaat op te halen, en hoe vaak wordt het vergeten?

Zoals hopelijk duidelijk is geworden uit dit voorbeeld zijn verbale theorieën vaak niet precies genoeg beschreven om voor een goede uitleg te zorgen. Aan de ene kant is het vaak onduidelijk of een verbale theorie eigenlijk wel leidt tot de gevonden resultaten (wat betekent 'langzamer?'), en aan de andere kant kan een verbale theorie vaak op meerdere manieren geïnterpreteerd worden, en kan de theorie daarom niet goed getest worden in een experiment. Vanuit een behoefte aan meer precieze theorieën zijn psychologen daarom computationele cognitieve modellen gaan ontwikkelen. Een computationeel cognitief model is niets anders dan de implementatie van een psychologische theorie als een computerprogramma. Dit programma kan dan gebruikt worden om gedrag te simuleren. Aan de ene kant dwingt dit af dat alle details van een theorie expliciet gemaakt worden – anders werkt het programma simpelweg niet – en aan de andere kant maakt het precies duidelijk welke voorspellingen de theorie doet.

In dit proefschrift heb ik gebruik gemaakt van modellen die de complete taak kunnen uitvoeren. Dat wil zeggen dat het model dezelfde interface 'ziet' als de proefpersonen, en ook antwoord moet geven met behulp van een virtueel toetsenbord en een virtuele muis. Als het ware zijn deze modellen dus virtuele proefpersonen die één of meerdere taken kunnen uitvoeren. Dit betekent dat we direct de prestaties (bijvoorbeeld reactietijden en fouten) van onze modellen konden vergelijken met die van onze echte proefpersonen, en zo konden kijken waar onze theorie klopte en vooral waar de theorie nog verbeterd moest worden.

Hoewel een cognitief model al een stuk beter is dan een verbale theorie, bestaat er nog steeds het gevaar dat een model alleen maar werkt voor de taak waar het voor ontwikkeld is. Het kan bijvoorbeeld zijn dat het geheugen van een model allerlei eigenschappen wordt toegedicht die wel werken voor de huidige taak, maar niet voor andere taken. Om dit probleem te voorkomen zijn alle modellen in dit proefschrift geïmplementeerd in een cognitieve architectuur. Kortgezegd is een cognitieve

architectuur een verzameling cognitieve modellen die sterk op elkaar lijken, en gebruikt worden om data van meerdere verschillende taken te verklaren. Voor de specifieke taak waarin een onderzoeker geïnteresseerd is moeten dan nog wel de details van het model geïmplementeerd worden, maar daarbij kan gebruik gemaakt worden van (bijvoorbeeld) een geheugensysteem dat al gebruikt is om andere taken te verklaren. Hierdoor wordt voorkomen dat modellen alleen maar de resultaten van één specifieke experiment verklaren.

In dit proefschrift heb ik gebruik gemaakt van de cognitieve architectuur ACT-R, ontwikkeld door John Anderson. In het verleden is ACT-R gebruikt om taken te modelleren die variëren van simpele reactietijd-taken tot autorijden en luchtverkeersleiding. Voor het modelleren van onze experimenten hebben we bijvoorbeeld gebruik gemaakt van ACT-R's geheugen, maar ook van ACT-R's visuele en motorieke systeem. Wat wij specifiek hebben toegevoegd zijn de eigenschappen van de werkgeheugen-module, en hoe die een rol spelen in multitaskinggedrag en -problemen.

## Modelgebaseerde Neurowetenschap

Tot nu toe heb ik het alleen over gedrag (en pupilgrootte) gehad, maar dit gedrag komt natuurlijk voort uit onze hersenen. In Hoofdstuk 4 en 5 van dit proefschrift hebben we daarom gekeken naar waar de *problem state bottleneck* zich in het brein bevindt. Ook hierbij hebben we gebruik gemaakt van cognitieve modellen. In plaats van te kijken naar waar de hersenen actief zijn wanneer onze proefpersonen een experiment doen, zoals gebruikelijk is in de neurowetenschappen, hebben we in Hoofdstuk 4 gekeken naar hoe goed ons model hersenactivatie kan voorspellen. Op deze manier wilden we in meer detail beoordelen hoe goed of slecht het model is – als het naast reactietijden en fouten ook nog hersenactiviteit kan voorspellen, dan is het natuurlijk waarschijnlijker dat het een goede afspiegeling van de werkelijkheid is dan wanneer het ‘alleen maar’ reactietijden kan voorspellen.

In Hoofdstuk 5 hebben we daarnaast een nieuwe hersenanalysemethode toegepast: modelgebaseerde fMRI-analyse (fMRI is een techniek die laat zien welke delen van de hersenen actief zijn op een bepaald moment). Terwijl bij een standaard analyse gekeken wordt naar waar in het brein een experiment activatie veroorzaakt, wordt bij modelgebaseerde fMRI-analyse gekeken naar waar in het brein de onderdelen van een model zich bevinden. Dit klinkt ingewikkelder dan het is: de analyse vergelijkt simpelweg wanneer de onderdelen van een model actief zijn en wanneer de verschillende gebieden in de hersenen actief zijn. Als een specifiek onderdeel van een model en een hersengebied vaak tegelijkertijd actief zijn (vaker dan bij toeval het geval zou zijn), dan kan er geconcludeerd worden dat het betreffende hersengebied wellicht dit onderdeel van het model implementeert. Hierdoor is het mogelijk om heel precies de verschillende onderdelen van een model aan hersengebieden koppelen, preciezer dan over het algemeen mogelijk is met standaard analysemethoden. Wij hebben deze methode voor het eerst toegepast op een model dat geïmplementeerd is in een cognitieve architectuur. In de volgende sectie zullen we de resultaten hiervan

bespreken, nadat we de resultaten van de gedragsexperimenten en het modellerwerk besproken hebben.

## Resultaten

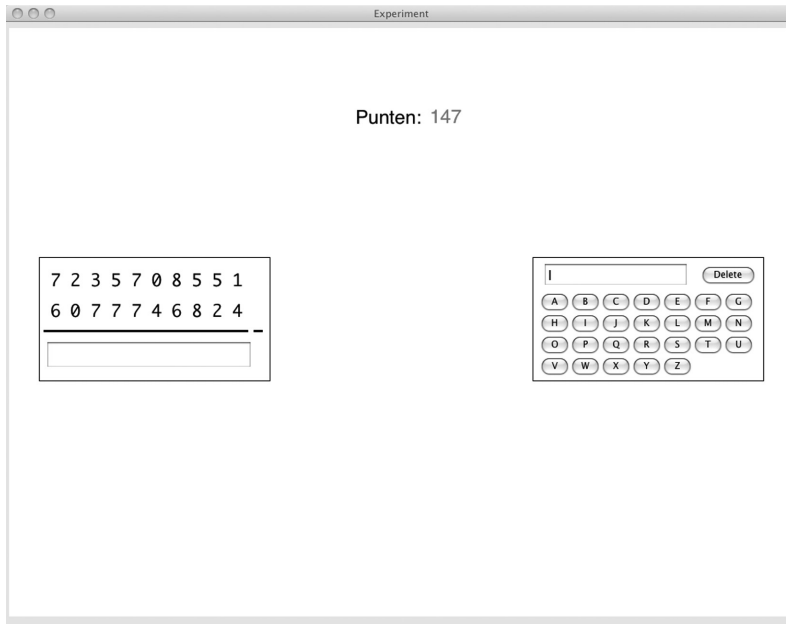
### Gedragsexperimenten en Model

#### *De Eerste Experimenten*

Het onderzoek in dit proefschrift begon met de gedragsexperimenten in Hoofdstuk 2. Naar aanleiding van een voorspelling die voortkwam uit de multitaskingtheorie *threaded cognition* van Dario Salvucci en Niels Taatgen, hebben we onderzocht of het tegelijkertijd bijhouden van meerdere tussenresultaten tot een verslechterde multitaskingprestatie leidt. Om dit te onderzoeken hebben we onze proefpersonen twee taken laten uitvoeren: het maken van kolomafreksommen en het invoeren van tekst (Figuur 8.1). Beide taken hadden twee condities: een makkelijke conditie waarin de proefpersonen geen tussenresultaat nodig hadden om de taak uit te voeren, en een moeilijke conditie waarin ze wel een tussenresultaat nodig hadden.

Voor de kolomafreksommen betekende dit dat er in de makkelijke conditie nooit geleend hoefde te worden, terwijl er in de moeilijke conditie in elke som van 10 kolommen 6 keer geleend moest worden. Figuur 8.1 laat de moeilijke conditie zien, voor de eerste kolom (1 – 4) moet er bijvoorbeeld direct al geleend worden. Het idee is dat de proefpersonen als tussenresultaat steeds moeten bijhouden of ze wel of niet geleend hebben in de voorgaande kolom. Voor het teksttaak, aan de rechterkant van Figuur 8.1, moesten de proefpersonen in de makkelijke taak steeds op de letter klikken die getoond werd in het venstertje boven de letter-knoppen (in dit geval een 'I'). Zodra ze op een letter klikten verscheen er een nieuwe letter. In de moeilijke variant werd er steeds een woord van 10 letters getoond dat de proefpersonen moesten invoeren. Zodra de proefpersonen op de eerste letter klikten, verdween het woord, en moest het verder uit het hoofd ingevoerd worden. In deze taak moesten de proefpersonen dus bijhouden welk woord ze aan het invoeren waren en bij welke letter ze waren (bijvoorbeeld 'fluisteren, 5<sup>de</sup> letter'). Het interessante aan dit experiment is dat de proefpersonen steeds na elke letter en elk cijfer tussen de taken moesten wisselen. Dit betekende dat als een taak moeilijk was, het tussenresultaat bijgehouden moest worden terwijl er een respons op de andere taak gegeven werd.

Het achterliggende idee van het experiment was dat proefpersonen alleen in de conditie wanneer beide taken moeilijk waren meer dan één tussenresultaat nodig hadden. Onze hypothese was dat het daarom in deze conditie veel slechter zou gaan dan in de andere condities. Dit is precies wat er uit het experiment kwam: terwijl proefpersonen natuurlijk trager reageerden en meer fouten maakten in de moeilijke condities, werden ze extra traag en maakten ze extra fouten wanneer beide taken moeilijk waren. Dus omdat de *andere* taak ook moeilijk was – omdat ze voor de andere taak ook een tussenresultaat bij moesten houden – werden de proefpersonen trager en gingen ze meer fouten maken (in beide taken).



Figuur 8.1 De interface van het experiment.

Hoe kunnen we dit verklaren? Zoals ik hierboven al kort beschreven heb gaan wij ervan uit dat mensen een werkgeheugen-module in hun hersenen hebben die maar één tussenresultaat tegelijkertijd kan bevatten. Zodra er een tweede tussenresultaat bij komt wordt het eerste tussenresultaat automatisch naar het normale geheugen verplaatst. Informatie ophalen uit het normale geheugen kost tijd en kan fout gaan, wat logischerwijs tot tragere reacties en fouten kan leiden. In de context van het experiment betekent dit dat proefpersonen zonder problemen de taken konden uitvoeren zolang geen of één van de twee taken moeilijk was: dan was er namelijk maar één tussenresultaat nodig (natuurlijk werden de proefpersonen al wel langzamer in de moeilijke taken omdat bijvoorbeeld de aftreksommen moeilijker werden). Alleen wanneer beide taken moeilijk waren moesten proefpersonen steeds tussenresultaten opslaan en weer ophalen uit hun geheugen, wat leidde tot de hogere reactietijden en meer fouten in deze conditie.

Dit idee hebben we geïmplementeerd als een cognitief model, dat vervolgens precies dezelfde taak moest uitvoeren als de proefpersonen. De specifieke reactietijden en fouten van het model hebben we vergeleken met de resultaten van de proefpersonen, en het bleek dat het model het patroon van de proefpersonen bijna perfect kon verklaren (zie ook de figuren in Hoofdstuk 2). Onze conclusie is daarom dat een werkgeheugen-module die maar één enkel tussenresultaat kan vasthouden een goede verklaring geeft voor de resultaten van het experiment.

Hoewel ons model liet zien dat dit een mogelijke verklaring was, zijn er natuurlijk ook andere manieren om de resultaten van het experiment uit te leggen. In twee andere experimenten in Hoofdstuk 2 hebben we twee andere verklaringen getest. In het eerste

experiment hebben we getest of de effecten misschien toe te schrijven waren aan het feit dat het vasthouden van informatie over het algemeen alle cognitieve processen vertraagt. Dus, in plaats van een werkgeheugen-module die maar één tussenresultaat kan vasthouden, kunnen er bij deze verklaring wel meerdere tussenresultaten worden bewaard, maar leidt dit tot een algehele vertraging van ons cognitieve systeem. Om dit te testen hebben we een vergelijkbaar experiment gedaan als het eerste experiment, maar nu moesten de proefpersonen steeds twee letters en twee cijfers achter elkaar invoeren voordat ze tussen de taken wisselden. Volgens onze verklaring zou er alleen een vertraging moeten optreden bij het eerste cijfer en de eerste letter, omdat dan de inhoud van de werkgeheugen-module gewisseld moest worden. Volgens de alternatieve verklaring zou de vertraging juist op beide stappen moeten optreden, omdat het cognitieve systeem algeheel vertraagd is. De resultaten waren eenduidig en in lijn met ons model: we zagen alleen een vertraging op het eerste cijfer en de eerste letter in een reeks van twee. In het derde experiment in Hoofdstuk 2 hebben we nog een tweede alternatieve verklaring getest – een beperking in ons taalsysteem – maar ook die verklaring bleek niet op te gaan.

Op basis van deze eerste set van drie experimenten concludeerden we daarom dat de meest plausibele verklaring voor onze resultaten een werkgeheugen-module is die maar één tussenresultaat tegelijkertijd kan vasthouden: de *problem state bottleneck*.

### *Pupilgrootte*

In Hoofdstuk 3 van dit proefschrift hebben we het bewijs voor een *problem state bottleneck* verder uitgebreid met nog een gedragsexperiment. In dit experiment moesten de proefpersonen wederom kolomaftreksommen oplossen en tekst invoeren, maar nu werd er op het scherm getoond of de proefpersonen net geleend hadden in één van de condities. Dit betekende dat in deze conditie het tussenresultaat op het scherm stond, en proefpersonen het dus niet hoefden te onthouden. Zoals verwacht presteerden de proefpersonen in deze conditie beter dan wanneer het tussenresultaat niet op het scherm stond.

Tijdens dit experiment hebben we ook de pupilgrootte van de proefpersonen gemeten, om te kijken of de conditie waarin beide taken moeilijk waren ook samenging met een toename in mentale belasting. Het bleek dat de pupilgrootte ten opzichte van de grootte vóór het experiment inderdaad het meest toenam in de conditie waarin beide taken moeilijk waren. Net als met de reactietijden en fouten, nam ook de pupilgrootte onevenredig veel toe in vergelijking tot de condities waarin maar één van de taken moeilijk was. Dit wijst erop dat de mentale belasting veruit het hoogst was als – volgens ons model – de tussenresultaten in de werkgeheugen-module verwisseld moesten worden.

### *Uitwisseling via het Geheugen*

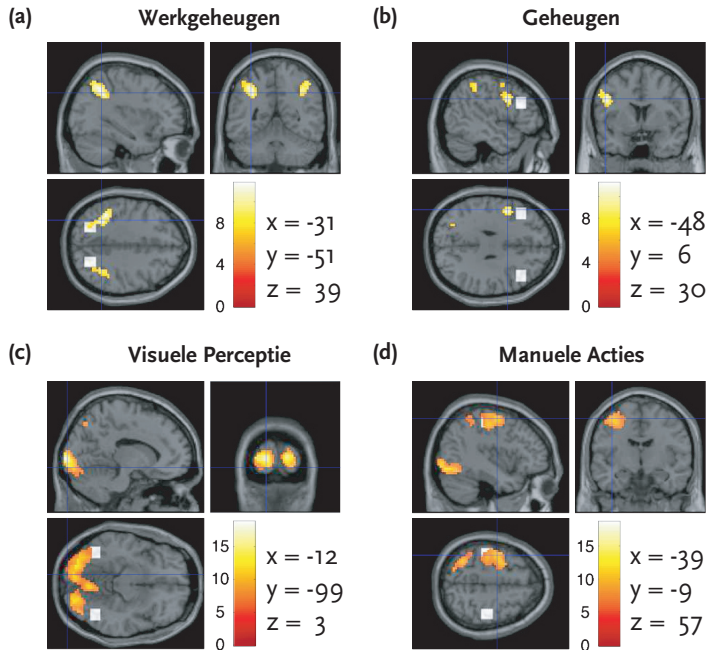
Volgens ons model worden tussenresultaten die niet in de werkgeheugen-module passen opgeslagen in het normale geheugen. Volgens de gangbare geheugentheorieën

in de psychologie verliest informatie in ons geheugen langzaam aan activiteit, en wordt het daarom steeds moeilijker om informatie op te halen die lang niet gebruikt is. Dat betekent voor onze theorie dat tussenresultaten die in het normale geheugen bewaard moeten worden langzamerhand steeds moeilijker zijn op te halen. We hebben dat getest in Hoofdstuk 6 met twee zogenaamde interruptie-experimenten. Interruptie-experimenten zijn bedacht om te kijken hoe mensen reageren op onderbrekingen van een taak. Het meest gebruikte voorbeeld hierbij is waarschijnlijk het schrijven van een lange email dat onderbroken wordt door een telefoontje. Na het beantwoorden van de telefoon kost het altijd weer even tijd om terug in het verhaal te komen. Interruptie-experimenten worden gebruikt om uit te vinden waarom dit het geval is.

Wij hebben twee experimenten gedaan waarin we respectievelijk de teksttaak en het maken van kolomaftreksommen onderbraken met een geheugentaak. Ook in deze experimenten hadden de taken weer een makkelijke en een moeilijke versie. De resultaten hiervan kwamen overeen met de andere experimenten: de proefpersonen waren het traagst en maakten de meeste fouten wanneer beide taken moeilijk waren. Interessanter echter was dat in dit experiment de onderbreking met de geheugentaak 4, 8, of 12 seconden kon duren. Geheugentheorieën in aanmerking genomen zou dat moeten betekenen dat proefpersonen de meeste moeite hadden om weer verder te gaan met de eerste taak na een onderbreking van 12 seconden, omdat dan de activiteit van het tussenresultaat in het normale geheugen het meeste was weggezakt. Volgens het model zou dit echter alleen het geval moeten zijn in de conditie waarin beide taken moeilijk waren, omdat alleen dan een tussenresultaat in het normale geheugen terecht kwam. De resultaten van de experimenten bevestigden deze voorspelling. Dit betekent dat tussenresultaten die niet in de werkgeheugen-module passen in ons normale geheugen worden opgeslagen. Het verklaart ook deels waarom interrupties van een taak vaak zo vervelend zijn. Neem het voorbeeld van het schrijven van een email dat onderbroken wordt door een telefoongesprek: na een telefoontje is de schrijver waarschijnlijk weer vergeten wat hij of zij op dat moment aan het schrijven was – het tussenresultaat – en moet dat weer opgehaald worden uit het geheugen (of opnieuw bedacht worden).

## Neuroresultaten

Omdat de gedragsexperimenten en ons model op een *problem state bottleneck* wezen, hebben we in Hoofdstuk 4 en 5 geprobeerd om de locatie hiervan in de hersenen te bepalen. In Hoofdstuk 4 hebben we gekeken hoe goed ons model voorspellingen kan maken van hersenactiviteit in een aantal vooraf gedefinieerde gebieden. Over het algemeen bleek dit verrassend goed te zijn, wat aangaf dat het model een plausibele afspiegeling is van wat er in ons brein gebeurt als we dit soort taken uitvoeren. Omdat niet alle onderdelen van het model goede voorspellingen maakten, hebben we daarna in Hoofdstuk 5 gekeken wat de meest waarschijnlijk gebieden zijn om aan de verschillende onderdelen van het model te koppelen. Hiervoor hebben we de modelgebaseerde fMRI-analyse techniek gebruikt die ik eerder kort heb geïntroduceerd.



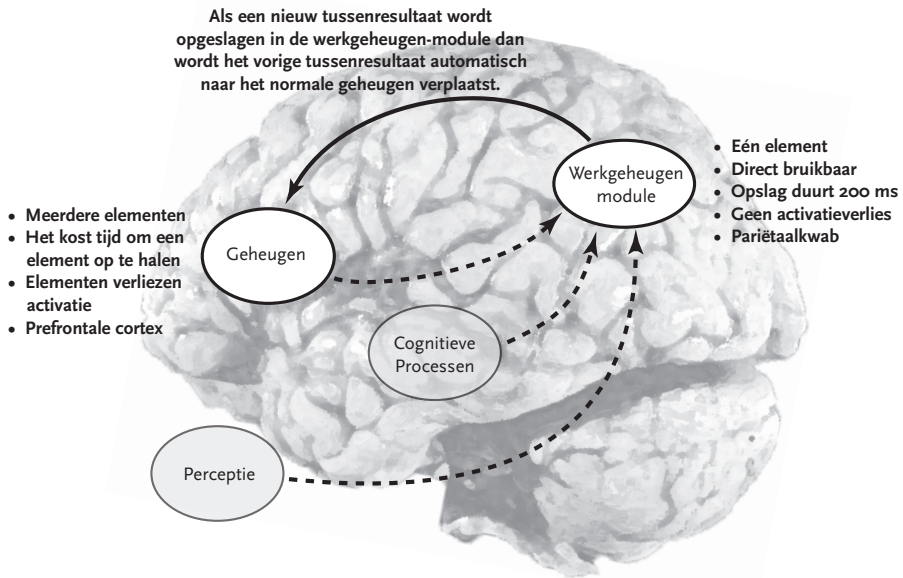
Figuur 8.2 Resultaten van de modelgebaseerde fMRI-analyse. De witte vierkantjes geven aan wat de vooraf gedefinieerde gebieden van de analyse in Hoofdstuk 4 zijn.

Modelgebaseerde fMRI-analyse laat zien wat de meest waarschijnlijke locatie van de verschillende onderdelen van een model is. In Figuur 8.2 staan de resultaten van de analyse: (a) laat de meest waarschijnlijke locatie van de werkgeheugen-module zien, (b) van het geheugen, (c) van de visuele perceptie – de ogen – van het model, en (d) van de manuele acties, dus van het gebruik van de muis en het toetsenbord van het model. Zoals verwacht bevond het meest waarschijnlijke gebied voor de visuele perceptie van het model zich helemaal aan de achterkant van ons brein, dit is namelijk het gebied dat standaard geassocieerd wordt met visuele perceptie. Ook de acties van het model werden gelokaliseerd op de verwachte locatie: de motor cortex, het gebied in de hersenen dat al onze bewegingen aanstuurt. De interessantere onderdelen van het model, de werkgeheugen-module en het geheugen bevonden zich volgens de analyse respectievelijk in de pariëtaalkwab en de prefrontale cortex. Ook dit is in overeenstemming met de literatuur.

## Conclusie: Werkgeheugen in Multitasking

Gebaseerd op alle experimenten in dit proefschrift hebben we in Hoofdstuk 6 onze uiteindelijke theorie gepresenteerd: Werkgeheugen in Multitasking. Figuur 8.3 laat een overzicht van deze theorie zien, met alle elementen die ik hierboven al kort





### Werkgeheugen in Multitasking

Figuur 8.3 De uiteindelijke theorie: Werkgeheugen in Multitasking.

besproken heb. Het belangrijkste element hierin is natuurlijk de werkgeheugen-module in de pariëtaalkwab, die informatie kan uitwisselen met het geheugen in de prefrontale cortex. Omdat de werkgeheugen-module maar één tussenresultaat tegelijkertijd kan opslaan, leidt het gebruik van meerdere tussenresultaten – wat vaak nodig is in een multitasking situatie – al snel tot behoorlijke multitaskinginterferentie. Dit is één van de redenen waarom multitasking niet altijd een goed idee is. In dit proefschrift hebben we daarvoor ondersteuning gevonden, niet alleen met gedragsexperimenten, maar ook met behulp van een cognitief model en neurowetenschappelijke experimenten.