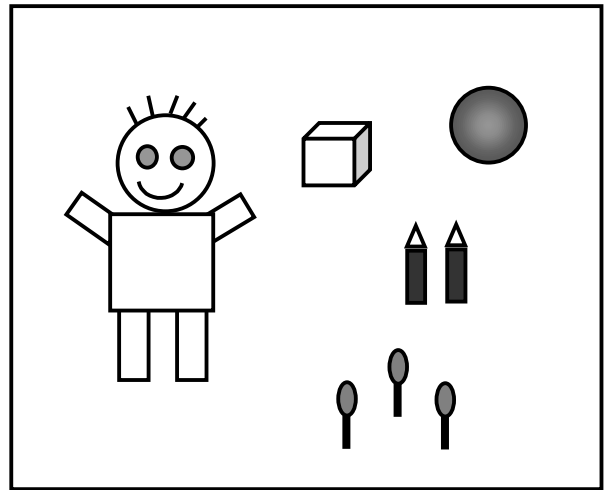
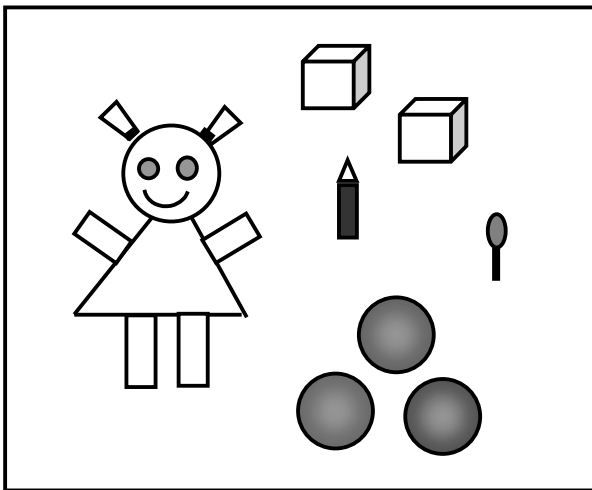


Cognitief modelleren met behulp van *representational redescription*

Afstudeerscriptie

Karin Zondervan
Studentnr.: 1015133
Periode: mei - november 2002



Begeleider: dr. Niels Taatgen (RuG)

Kunstmatige Intelligentie
Rijksuniversiteit Groningen

Cognitief modelleren met behulp van *representational redescription*

Afstudeerscriptie

Karin Zondervan
Studentnr.: 1015133
Periode: mei - november 2002

Begeleider: dr. Niels Taatgen (RuG)

**Kunstmatige Intelligentie
Rijksuniversiteit Groningen**

Inhoudsopgave

HOOFDSTUK 1: INLEIDING	9
1A: ONDERZOEKSVRAAG IN THEORETISCH KADER.....	11
1 MENSELIJKE INTELLIGENTIE	11
2 THEORETISCH KADER.....	11
2.1 De Representational Redescription theorie (RR)	11
2.2 De cognitieve architectuur ACT-R	12
3 PROBLEEMSTELLING	13
4 OPZET VAN DE SCRIPTIE	14
4.1 Literatuuronderzoek	14
4.2 Beschrijving eerste model.....	14
4.3 Beschrijving tweede model.....	14
4.4 Analyse van de modellen	14
4.5 Discussie en Conclusie	15
5 WETENSCHAPPELIJKE RELEVANTIE VOOR KI.....	15
HOOFDSTUK 2: LITERATUURONDERZOEK.....	17
2A: DE REPRESENTATIONAL REDESCRIPTION THEORIE.....	19
1 SAMENVATTING VAN DE THEORIE	19
1.1 Ontwikkeling stopt niet bij beheersing van de vaardigheid.....	19
1.2 Dankzij representational redescription halen we alles eruit wat erin zit	20
2 THEORETISCHE ACHTERGROND VAN DE RR-THEORIE	20
2.1 Modularisatie	20
2.2 Ontwikkeling op alle domeinen tegelijk of specifiek per domein.....	20
2.3 Nativisme verenigd met constructivisme.....	21
3 DE EXPERIMENTEN.....	21
3.1 Verschillende domeinen.....	21
3.2 Het aantonen van het E1-niveau	21
4 GEVOLGEN VOOR DE RR-MODELLEN	22
4.1 Eisen die de RR-theorie zelf stelt aan RR-modellen	22
4.2 Hoe zien de veranderende interne representaties er nu precies uit?.....	23
2B: GENERALISATIE DOOR SPECIALISATIE.....	24
1 ALGEMEEN IDEE.....	24
2 GENERALISATIE IN ACTIE IN HET VERLEDENTIJDENMODEL	24
3 OPMERKINGEN BIJ DE ANALOGIESTRATEGIE	25
4 ANDERE CONTEXTEN VOOR HET GENERALISATIE-DOOR-SPECIALISATIE-PRINCIPE	26
2C: SELECTIE VAN TWEE GESCHIKTE EXPERIMENTEN.....	28
1 SELECTIECRITERIA	28
2 LIJST VAN MOGELIJKE EXPERIMENTEN.....	28
3 DE UITEINDELIJKE KEUZE.....	32
3.1 De vergelijking	32
3.2 De winnaars.....	32
2D: COMPUTATIONELE MODELLEN VAN VERANDERING.....	35
1 INLEIDING	35
1.1 Connectionisme en symbolisme	35
1.2 Wat willen we weten van de modellen?	36
2 DE CONNECTIONISTISCHE MODELLEN	36
2.1 Het connectionistische model van de Balance Scale Task (BST)	36
2.2 De cascade-correlation modellen.....	38

3	SYMBOLISCHE EN HYBRIDE MODELLEN.....	39
3.1	Een meer gedetailleerde analyse van de representaties	39
3.4	Het ACT-R model van het leren van verleden tijden	42
4	GEVOLGEN VOOR DE TE ONTWIKKELEN COGNITIEVE MODELLEN	44
4.1	Sterke en zwakke kanten van de huidige modellen	45
4.2	Eisen aan nieuw te ontwikkelen modellen	46
HOOFDSTUK 3: BESCHRIJVING EERSTE MODEL		47
3A: VAN RR-THEORIE NAAR RR-MODEL.....		49
1	INLEIDING	49
2	ANALYSE VOORAF VAN HET DETERMINATORENMODEL	50
2.1	Architectuur en experiment	50
2.2	Simulatie en overgang	50
2.3	Aannames, startkennis en omgeving/input.....	50
2.4	Veranderende representaties	52
2.5	Indeling in periodes	53
2.6	Hoe het ontstaan van regels de overheersing van het telwoord kan verklaren	53
2.7	De functies van lidwoorden	54
2.8	Periode-overgangen en de functies van une en la	56
2.9	Hoe dragen zowel het begrijpen als het produceren bij tot leren?.....	57
2.10	Concrete plannen voor het model.....	58
3B: WERKING VAN HET DETERMINATORENMODEL.....		59
1	OPZET VAN HET MODEL	59
1.1	Welke onderdelen hebben de voorbeelden nodig?	59
1.2	Hoe zien voorbeelden eruit?.....	59
1.3	Het experiment en normale verwerking en productie in drie periodes.....	62
1.4	De (te ontdekken) productieregels.....	63
1.5	Het ontdekken van relevante dimensies in de context.....	65
1.6	Het analogieproces.....	65
1.7	De analogieregels.....	66
2	DE WERKING VAN HET MODEL	68
2.1	De analogieregels (in de begriprichting) in ACT-R termen	68
2.2	Hoe uit het analogieproces nieuwe regels ontstaan	70
2.3	Succesvolle en minder succesvolle regels in een situatie zonder feedback	70
2.4	Situatie A, B en C.....	72
2.5	Analogieën in de situaties A, B en C.....	73
2.6	De productieregels die ontstaan in situatie A, B en C.....	74
2.7	De resultaten van het model op het playrooms-experiment.....	80
2.8	Wat het model nog meer kan	80
HOOFDSTUK 4: BESCHRIJVING TWEEDE MODEL		83
4A: VERGELIJKING MET HET DETERMINATORENMODEL		85
1	HET BLOKKENEXPERIMENT	85
1.1	Opzet van het blokkenexperiment	85
1.2	Resultaten van het experiment.....	86
2	OVEREENKOMSTEN EN VERSCHILLEN MET HET PLAYROOMS-EXPERIMENT	86
2.1	Micro-ontwikkeling en macro-ontwikkeling	86
2.2	U-vorm in de resultaten.....	86
3	OVEREENKOMSTEN EN VERSCHILLEN MET DE BALANCE SCALE TASK.....	87
3.1	De Balance Scale Task	87
3.2	Overeenkomst: het ontdekken van relevante dimensies.....	87
4	WAT KUNNEN WE GEBUIKEN VAN HET DETERMINATORENMODEL?	87
4.1	De strategieën.....	87
4.2	Omhoog kruipen uit het dal	88
4.3	Theorieën-in-actie en theorieën-in-taal.....	89

4B: MOGELIJKE WERKING VAN HET BLOKKENMODEL	91
1 BOUWSTENEN	91
2 DE BEGINSITUATIE	91
3 DE DIMENSIES DIE ONTDEKT MOETEN WORDEN	92
4 DE ACHTERLIGGENDE ALGEMENE COGNITIEVE ONTWIKKELING.....	92
5 DE PRODUCTIEREGELS DIE KUNNEN ONTSTAAN	93
6 WE ZIJN ER BIJNA	94
HOOFDSTUK 5: ANALYSE VAN DE MODELLEN.....	95
5A: TERUG NAAR DE RR-THEORIE.....	97
1 VERTALING VAN DE RR-THEORIE NAAR ACT-R.....	97
1.1 Globale vertaling van de niveaus en de overgangsmechanismen.....	97
2 LEREN IN EEN U-VORM	97
2.1 Vergelijking tussen de RR-verklaring en de verklaring van het determinatorenmodel	97
2.2 Betekenissen van impliciet en expliciet.....	99
2.3 De ontbrekende schakel.....	99
HOOFDSTUK 6: DISCUSSIE EN CONCLUSIE.....	103
6A: DISCUSSIE EN CONCLUSIE	105
1 TERUG NAAR DE PROBLEEMSTELLING	105
1.1 Hypothesen en centrale vraagstelling checken	105
1.2 Analogie trekken als een simpele heuristiek.....	105
2 EEN GROTER KADER: SIMULATIEMODELLen VAN ONTWIKKELING	106
2.1 Ecologische rationaliteit.....	106
2.2 Een leidraad voor simulatiemodellen van ontwikkeling.....	107
3 DE MOGELIJKHEDEN VAN ACT-R.....	108
3.1 Eigenschappen uit de context waarnemen.....	108
3.2 Productieregels hebben een richting	109
3.3 De eerste voorbeelden	109
3.4 Vaste slotnamen.....	110
4 VERDER ONDERZOEK	110
4.1 De relatie tussen simulatiemodellen en empirisch onderzoek	110
4.2 Ecologische rationaliteit en cognitieve modellen.....	111
5 CONCLUSIE	112
6B: REFERENTIES	113

Hoofdstuk 1: Inleiding

H O O π D S T U K

1

Inleiding

1A: Onderzoeksvraag in theoretisch kader

1 Menselijke intelligentie

Mensen zijn intelligente wezens. Daar zal iedereen het mee eens zijn. Maar wat is intelligentie precies? Die vraag is veel moeilijker te beantwoorden. We beschikken over allerlei cognitieve vermogens die ons in staat stellen te communiceren en plannen te maken. Deze cognitieve vermogens zouden deels aangeboren kunnen zijn. In welke mate dat zo is, is nog steeds niet duidelijk. Het staat echter wel vast dat we in onze kindertijd nog een hele ontwikkeling doormaken, voordat we dezelfde capaciteiten hebben als volwassenen. Als we meer van deze ontwikkeling begrijpen, kunnen we ook meer inzicht krijgen in de cognitieve capaciteiten van de menselijke geest. De ontwikkeling van abstracte representaties staat centraal in dit afstudeeronderzoek. Annette Karmiloff-Smith (1992) heeft ontwikkelingspsychologisch onderzoek gedaan naar het leren van cognitieve vaardigheden. Het ging daarbij niet zozeer om het onder de knie krijgen van deze vaardigheden. Karmiloff-Smith keek verder en beschreef hoe uit de kennis over bepaalde vaardigheden nieuwe kennis wordt gehaald. Representaties van de opgeslagen kennis ondergaan veranderingen. Ze worden abstracter en toegankelijker. Uiteindelijk zijn de representaties modules geworden, die de persoon in staat stellen nieuwe verbanden te leggen en oude kennis op allerlei nieuwe manieren te benutten. Dit is een uniek aspect van de menselijke cognitie dat zeker nader onderzoek verdient. Dit afstudeeronderzoek is een stap in dit nadere onderzoek. Ook ik wil verder kijken, maar met name dieper graven. De beschrijving van Karmiloff-Smith is op een globaal niveau. Maar hoe zien die steeds abstracter wordende representaties in ons hoofd er nou precies uit? Om daar meer inzicht in te krijgen, heb ik een cognitief computermodel hiervan gemaakt. In de komende paragrafen vertel ik hoe ik dit heb aangepakt en wat de relevantie hiervan is voor Kunstmatige Intelligentie.

2 Theoretisch kader

De theorie die centraal staat in het afstudeeronderzoek is de *Representational Redescription* theorie van Annette Karmiloff-Smith. Het cognitieve model dat ik naar aanleiding van deze theorie heb gemaakt, is geïmplementeerd in de cognitieve architectuur ACT-R. Hieronder zal ik uitleg geven over deze twee theoretische kaders.

2.1 De *Representational Redescription* theorie (RR)

Er zijn al heel wat theorieën over het aanleren van vaardigheden. De meeste daarvan beschrijven het leerproces naar het einddoel, volledige beheersing van de vaardigheid (*behavioral mastery*). De RR-theorie stopt daar echter niet. De beheersing van de vaardigheid is namelijk niet het eindstadium van het leerproces. De ontwikkeling gaat daarna door. De concepten en procedures die nodig zijn voor het uitvoeren van de vaardigheid zijn namelijk nog maar impliciet aanwezig in het cognitieve systeem. De opgedane kennis en vaardigheden kunnen nog niet onder woorden gebracht worden en zijn ook nog niet beschikbaar voor een andere taak. Een dergelijk expliciet niveau van kennisrepresentatie ontstaat in de meeste domeinen echter wel. Hoe ziet de weg naar dit niveau eruit? Op deze vraag geeft de RR-theorie een antwoord. De theorie beschrijft de verschillende tussenniveaus en gaat met name in op de verandering van de interne representaties bij de niveau-overgangen. Karmiloff-Smith onderscheidt vier niveaus: Impliciet (I), Expliciet-1 (E1), Expliciet-2 (E2) en Expliciet-3 (E3).

Op het I-niveau zijn de representaties van een bepaalde procedure in het cognitieve systeem aanwezig, maar ze zijn niet bekend aan het systeem. Dit betekent dat de onderdelen van

de procedure niet los te koppelen zijn. Ook zijn ze nog niet beschikbaar voor andere componenten van het cognitieve systeem. De geleerde procedure kan snel en efficiënt uitgevoerd worden, maar is verder totaal niet flexibel. Op weg naar de niveaus E1, E2 en E3 veranderen de representaties van vorm. Ze worden steeds flexibeler. De E1-representaties zijn abstracties van de I-representaties. De onderdelen van de procedure zijn werkelijk los van elkaar komen te staan en kunnen gerelateerd worden aan andere herschreven representaties. De representaties zijn echter nog niet beschikbaar voor bewuste toegang. De persoon kan deze representaties daardoor nog niet onder woorden brengen. Het E2-niveau is een soort tussenniveau, waarbij de representaties wel bewust toegankelijk zijn, maar nog niet klaar voor een verbale omschrijving. Op het E3-niveau zijn de representaties het meest expliciet. De persoon kan ze geheel flexibel gebruiken in een systeem van aan elkaar gerelateerde representaties (bijvoorbeeld het systeem van de wiskunde) en weet de rol van de representaties in dit systeem ook te omschrijven.

De overgang van het ene naar het andere niveau is een proces dat niet van buitenaf gestuurd wordt. Iets van buitenaf kan wel invloed op de overgang hebben, maar het is niet noodzakelijk. Het cognitieve systeem gaat zelf over tot de herrepresentaties om zo het maximale uit de kennis te halen en de kennis zo efficiënt mogelijk te kunnen gebruiken. Hoe de representaties eruit zien op de verschillende niveaus, probeert Karmiloff-Smith door middel van experimenten te ontdekken (Karmiloff-Smith, 1979a en 1979b; Karmiloff-Smith, Grant, Sims, Jones, & Cuckle, 1996; Karmiloff-Smith & Inhelder, 1974/75). Ze slaagt er vaak in om – door middel van een slimme opzet – ook het E1-niveau zichtbaar te maken. Het verschil tussen het E2-niveau en het E3-niveau is in de experimenten minder relevant en minder makkelijk aan te tonen. Deze niveaus worden samengevoegd tot het E2/3-niveau. De experimenten beslaan allerlei verschillende domeinen binnen de cognitie. Hiermee toont Karmiloff-Smith aan dat *representational redescription* een algemeen cognitief verschijnsel is, dat echter wel in ieder microdomein op een andere manier en op een ander tijdstip plaatsvindt.

2.2 De cognitieve architectuur ACT-R

ACT-R is een architectuur waarin de menselijke cognitie kan worden gesimuleerd op de computer (Anderson & Lebiere, 1998). Het is als het ware een geraamte, waarin de bouwstenen van de menselijke cognitie al zijn ingebakken. Met deze bouwstenen kunnen simulatiemodellen worden gemaakt. Deze modellen zijn symbolisch van aard, maar ACT-R heeft wel een subsymbolisch niveau, dat veel invloed uitoefent op hoe de bouwstenen op het symbolische niveau gebruikt worden. Het symbolische niveau bestaat uit het declaratieve en het procedurele geheugen. Het procedurele geheugen krijgt vorm door middel van productieregels. In het declaratieve geheugen vind je doelen en chunks (brokjes kennis). Alle cognitieve stappen worden in ACT-R uitgevoerd aan de hand van doelen. Een doel dat bereikt is, wordt als chunk opgeslagen in het declaratieve geheugen. ACT-R modellen zijn dynamisch. Tijdens de simulatie van experimenten kunnen er nieuwe doelen, chunks en zelfs productieregels ontstaan en oude verdwijnen. In de nieuwste versie van ACT-R zijn de nieuw ontstane productieregels specialistischer dan die waar ze van afgeleid zijn (hun "ouders"). In de modellen van dit afstudeeronderzoek zullen die nieuwe productieregels juist algemener moeten zijn dan hun ouders. Het modelleren van experimenten van Annette Karmiloff-Smith is dus een goede manier om te kijken hoe generalisatie van productieregels gerealiseerd zou kunnen worden in ACT-R.

Het theoretische uitgangspunt wat betreft die generalisatie van productieregels zou ik *generalisatie-door-specialisatie* willen noemen. Het is gebaseerd op de manier waarop Taatgen en Anderson (2002) een model hebben gemaakt in ACT-R van het leren van verleden-tijdvormen. Kort gezegd komt het erop neer dat je generalisatie ziet als een vorm van specialisatie. Je specialiseert een zeer algemene productieregel of strategie aan de hand van een aantal specifieke voorbeelden en de productieregels die hierdoor ontstaan zijn specialisaties van de

algemene productieregel, maar tegelijkertijd zijn ze ook algemener dan de voorbeelden. Bij dit generalisatie-door-specialisatieproces spelen analogieën een belangrijke rol. In hoofdstuk 2B beschrijf ik uitgebreid hoe dit proces is gebruikt in het model van Taatgen en Anderson en hoe analogieën hierbij in beeld komen.

3 Probleemstelling

Menselijke cognitie onderscheidt zich van die van dieren door de flexibele manier waarop wij onze kennis kunnen gebruiken. Dieren handelen en communiceren vaak via vaste patronen. Ze hebben niet of nauwelijks kennis over hun eigen kennis. Mensen leren ook vaste patronen, maar laten het daar niet bij. De vaste patronen vormen een uitgangspunt voor het ontwikkelen van meer abstracte kennis. Door die overgang naar steeds abstractere kennis kunnen we nieuwe verbanden te leggen en nog meer doen met de kennis die we al hebben. We kunnen aangeleerde kennis en procedures generaliseren naar andere contexten. Bovendien kunnen we soms over onze eigen kennis redeneren. Het ontwikkelen van dit unieke aspect van de menselijk cognitie wordt beschreven door de RR-theorie. De experimenten die binnen dit theoretisch kader zijn uitgevoerd, maken het RR-proces zichtbaar.

Computers bezitten de hierboven beschreven competenties niet. We zijn echter wel in staat menselijk gedrag op de computer te simuleren. We kunnen dus ook RR-experimenten simuleren op de computer. Om deze simulatie tot het juiste resultaat te laten komen, moeten we een cognitief model in de computer stoppen, dat een mens simuleert. Dit cognitief model is een soort hypothese van wat zich nu precies in een menselijk hoofd afspeelt, bij het herrepresenteren. Als de computersimulatie de resultaten van de experimenten met proefpersonen kan herhalen, dan wordt deze hypothese sterker. Deze redenering leidt tot de volgende centrale vraagstelling van dit onderzoek:

Hoe ziet een cognitief model er precies uit dat in staat is een echte invulling te geven aan de representaties en de herschrijfmechanismen van de RR-theorie?

Een dergelijk cognitief model zou dan met behulp van die nadere invulling de resultaten van RR-experimenten moeten kunnen repliceren. Mijn hypothese is dat ACT-R een goede architectuur is om tot een cognitief model te komen van RR-experimenten. In een simulatiemodel in ACT-R kunnen nieuwe productieregels ontstaan, die tot een ander gedrag leiden. De levensloop van deze productieregels kan gebruikt worden om de ontwikkeling van herrepresentaties te simuleren. Over hoe deze nieuwe productieregels ontstaan, heb ik de volgende specifieke hypothese:

De productieregels die tot herrepresentatie leiden, ontstaan door middel van het generalisatie-door-specialisatie-mechanisme.

In hoofdstuk 5 van mijn onderzoek wil ik een terugkoppeling maken naar de RR-theorie zelf met de vraag: *Wat leren we van de ontwikkelde cognitieve modellen over de RR-theorie?* Mijn hypothese is de volgende:

De herrepresentatieprocessen in totaal verschillende cognitieve microdomeinen vertonen ook op het gedetailleerde niveau van een computationeel model grote overeenkomsten.

Deze uitkomst zou de RR-theorie versterken.

4 Opzet van de scriptie

Uit de inhoudsopgave blijkt dat deze scriptie uit de volgende hoofdstukken bestaat: *Inleiding*, *Literatuuronderzoek*, *Beschrijving eerste model*, *Beschrijving tweede model*, *Analyse van de modellen* en *Discussie en Conclusie*. Hieronder beschrijf ik wat er in de komende hoofdstukken aan bod komt.

4.1 Literatuuronderzoek

Het literatuuronderzoek bestaat uit de volgende vier componenten:

- *De Representational Redescription theorie*
- *Generalisatie-door-specialisatie*
- *Selectie van twee geschikte experimenten*
- *Computationale modellen van verandering*

De eerste twee onderdelen zijn bedoeld om meer inzicht te krijgen in de theorie. De hieruit gedestilleerde informatie, wordt vervolgens gebruikt om in *Selectie van twee geschikte RR-experimenten* uit de berg van RR-experimenten twee experimenten te kiezen, die het meest geschikt zijn om een cognitief model van te maken. Ik verklap hier alvast dat de gekozen experimenten het *playrooms-experiment* en het *blokkenexperiment* heten. In hoofdstuk 2C beschrijf ik wat deze twee experimenten precies inhouden. In hoofdstuk 2D: *Computationale modellen van verandering* bestudeer en beschrijf ik een aantal reeds bestaande cognitieve modellen, die als overeenkomst hebben dat ze allen cognitieve verandering simuleren.

4.2 Beschrijving eerste model

In dit hoofdstuk beschrijf ik het eerste model, met de naam *determinatorenmodel*. Dit model is een simulatie van het playrooms-experiment en is geïmplementeerd in ACT-R , versie 5. Eerst wordt in hoofdstuk 3A beschreven hoe we van de RR-theorie naar een opzet voor het determinatorenmodel kunnen komen. In hoofdstuk 3B vertel ik vervolgens wat de uiteindelijke opzet van het model geworden is en hoe het precies werkt. Ook worden hierin de experimentele resultaten met de resultaten van het model vergeleken.

4.3 Beschrijving tweede model

Een grote uitdaging bij het modelleren van de experimenten van Karmiloff-Smith is om te proberen de modellen algemeen en herbruikbaar te maken. De experimenten die Karmiloff-Smith heeft uitgevoerd, gaan over heel uiteenlopende domeinen. Om te kijken of ik deze brede toepasbaarheid van haar theorie ook kan handhaven in mijn computermodellen, ben ik ook begonnen met het modelleren van een tweede experiment, dat een totaal andere achtergrond heeft. Mijn verwachting hierbij was, dat het model van het eerste experiment als basis gebruikt kan worden voor het model van het tweede experiment. Het tweede model heb ik het *blokkenmodel* genoemd. Het is dus een model van het *blokkenexperiment*. Het is, wegens de beperkte looptijd van dit onderzoek, niet geïmplementeerd in ACT-R, maar alleen op papier ontworpen. De beschrijving van het tweede model gebeurt in twee stappen: eerst vergelijk ik in hoofdstuk 4A het blokkenexperiment met het playrooms-experiment en vervolgens gebruik ik deze analyse om in hoofdstuk 4B een opzet voor het blokkenmodel te maken.

4.4 Analyse van de modellen

In dit hoofdstuk maak ik een terugkoppeling naar de RR-theorie. De vraag die ik wil beantwoorden

is: "Wat leren we van de twee ontwikkelde modellen over de RR-theorie en wat hebben we eraan?". Ik vergelijk de verklaring die de RR-theorie geeft voor U-vormig leren met de verklaring van het determinatorenmodel. Op grond daarvan analyseer ik in hoeverre de vertaalslag van RR-theorie naar ACT-R is gelukt. Overigens, wat *U-vormig leren* is, wordt in hoofdstuk 2B uitgelegd.

4.5 Discussie en Conclusie

Discussie en conclusie is het laatste hoofdstuk. Hierin probeer ik nog een groter kader te scheppen en geef ik aan hoe mijn bevindingen gebruikt zouden kunnen worden voor andere cognitieve modellen van ontwikkeling. Tevens zet ik een aantal mogelijkheden en onmogelijkheden van ACT-R op een rijtje die veel invloed hebben gehad op de uiteindelijke vorm van het determinatorenmodel. In dit hoofdstuk geef ik ook nog aan in welke richting verder onderzoek nodig is. In de conclusie, tot slot, vertel ik in volgelvlucht wat dit afstudeeronderzoek nu wel en niet opgeleverd heeft.

5 Wetenschappelijke relevantie voor KI

Karmiloff-Smith (1992) probeert in haar boek *Beyond Modularity: A Developmental Perspective on Cognitive Science* de lezer te overtuigen van het nut van ontwikkelingspsychologisch onderzoek voor de cognitiewetenschap. Door te ontdekken hoe cognitie zich ontwikkelt in een mensenleven, kom je ook meer te weten over hoe cognitie eigenlijk in elkaar zit. Wellicht dat dit ontwikkelingsperspectief zelfs onmisbaar is als we cognitie echt willen begrijpen. Helaas is de RR-theorie slechts een beschrijvende theorie op een hoog niveau van abstractie. De experimenten die Karmiloff-Smith heeft uitgevoerd, lijken de theorie wel te ondersteunen, maar vertellen weinig over de details van *representational redescription*. Het blijft onduidelijk hoe de representaties en de herschrijfmechanismen er precies uitzien. Computationale modellen van RR-experimenten zouden wel veel meer inzicht hierin geven. De eerste pogingen om computationale modellen te bouwen, die iets te maken hebben met de RR-theorie zijn allemaal connectionistisch en ook geen echte RR-modellen (Karmiloff-Smith, 1992). Deze modellen komen niet verder dan het eerste niveau van herrepresentatie (niveau I). De meest interessante delen van de theorie zijn echter juist de herrepresentaties die daarna pas plaatsvinden (niveau E1 en E2/E3). Wellicht dat een meer hybride architectuur zoals ACT-R beter geschikt is om deze overgangen te vangen in een cognitief model.

Het modelleren van experimenten uit de RR theorie in ACT-R kan ons meer leren over herrepresenteren en het steeds flexibeler worden van representaties. Daarnaast kan het ook leiden tot een verrijking van de ACT-R theorie zelf. De experimenten die met behulp van ACT-R zijn gemodelleerd, gingen nooit verder dan *het behavioral mastery* niveau van een bepaalde vaardigheid. Mensen gaan echter wel verder en dus kan ACT-R niet achterblijven! Deze verrijking van de ACT-R theorie hangt nauw samen met het generalisatie-door-specialisatie-principe. Wellicht kan de manier van productieregels generaliseren, die in dit afstudeeronderzoek ontwikkeld werd, in allerlei andere ACT-R modellen van pas komen. Ook kunnen we dankzij dit afstudeeronderzoek meer leren over het bouwen van cognitieve modellen van een *ontwikkeling*, die zich op een macrotijdsschaal – dus verspreid over meerdere jaren – afspeelt. Kortom, dit afstudeeronderzoek is met name interessant voor KI, omdat het nieuwe wegen inslaat op het gebied van cognitief modelleren. Tegelijkertijd zal het meer inzicht geven in hoe de ontwikkelingspsychologie de cognitiewetenschap vooruit kan helpen.

Hoofdstuk 2: Literatuuronderzoek

H O O T D S T U K

2

Literatuuronderzoek

2A: De Representational Redescription theorie

1 Samenvatting van de theorie

1.1 Ontwikkeling stopt niet bij beheersing van de vaardigheid

De *representational redescription* theorie geeft een algemene beschrijving van hoe een cognitieve vaardigheid zich ontwikkelt in een microdomein. Tijdens de ontwikkeling veranderen de representaties van de aangeleerde kennis een aantal keer van vorm. De RR-theorie onderscheidt, zoals we al zagen, vier niveaus van representatie:

- **Niveau Impliciet (I).** De vaardigheid wordt beheerst door de persoon. Hij gebruikt de kennis op dit niveau om snel en efficiënt de vaardigheid uit te voeren. De representaties zijn echter nog slechts impliciet in de geest van de persoon aanwezig. Ze vormen een op zichzelf staand geheel. Het cognitieve systeem heeft de onderdelen van de vaardigheid nog niet apart gerepresenteerd. De vaardigheid zit wel in het cognitieve systeem, maar is nog niet bekend aan dit systeem. Ook zijn de representaties nog niet beschikbaar voor andere componenten van het cognitieve systeem. De geleerde procedure kan snel en efficiënt uitgevoerd worden, maar is verder totaal niet flexibel. Dit betekent dat de persoon alleen de geleerde procedure kan gebruiken bij precies die ene taak. Er is geen generalisatie mogelijk buiten de taak zelf.
- **Niveau Expliciet-1 (E1).** Op niveau E1 veranderen de representaties van vorm. Ze worden flexibeler. De E1-representaties zijn abstracties van de I-representaties. De onderdelen van de procedure zijn werkelijk los van elkaar komen te staan en kunnen gerelateerd worden aan andere herschreven representaties. De representaties zijn minder lokaal. Hierdoor is het op dit niveau mogelijk generalisaties te maken buiten de direct geleerde procedure. De representaties zijn echter nog niet beschikbaar voor bewuste toegang. De persoon kan deze representaties daardoor nog niet onder woorden brengen.
- **Niveau Expliciet-2 (E2).** Ook nu zijn de representaties weer flexibeler en abstracter geworden. Flexibeler betekent in dit verband dat de representaties nu ook als kennisonderdelen bij andere taken gebruikt kunnen worden. Ook bij taken, die niet precies in dezelfde context liggen. Het E2-niveau is een soort tussenniveau, waarbij de representaties wel bewust toegankelijk zijn, maar nog niet klaar voor een verbale omschrijving.
- **Niveau Expliciet-3 (E3).** Op het E3-niveau zijn de representaties het meest expliciet. De persoon kan ze geheel flexibel gebruiken in een systeem van aan elkaar gerelateerde representaties en weet de rol van de representaties in dit systeem ook te omschrijven.

Karmiloff-Smith gaat ervan uit dat het doorlopen van deze niveaus zich zowel op een macrotijdschaal (een tijdsverloop van een aantal jaren) als op een microtijdschaal (tijdens één experimentele sessie) kan manifesteren. In *Beyond Modularity* gebruikt ze een mooi voorbeeld om uit te leggen wat de meerwaarde van de E-niveaus is: als je een zebra voor je neus hebt staan, dan herken je hem als zijnde een zebra. In je hoofd heb je van dit dier een representatie in de vorm van een soort plaatje (I-niveau). Als je deze representatie herrepresenteert tot *gestreept dier* (E1-niveau), dan heb je heel wat details van de eerdere representatie weggegooid. Maar het cognitieve systeem heeft ook voordeel van deze meer abstracte representatie. Nu ben je namelijk in staat de analogie tussen de zebra en het zebrapad (oversteekplaats) te zien. De herschreven representatie is misschien minder specifiek, maar wel productiever. Je kunt het *zwart-wit-gestreept*-concept nu immers gebruiken voor een nieuw doel. Het is natuurlijk niet zo, dat na herrepresentatie van het zebraplaatje, we de andere aspecten van zebra's zijn vergeten. In het algemeen geldt dat de representaties op een lager niveau ook beschikbaar blijven. Dit is met name handig voor taken, die vragen om snelle, geautomatiseerde, reacties.

Uit de verdeling in niveaus blijkt, dat de ontwikkeling niet ophoudt bij de beheersing van de vaardigheid (*behavioral mastery*). De RR-theorie heeft dit niveau juist als beginpunt. Maar hoe wordt deze ontwikkeling dan in gang gezet? De overgang van het ene naar het andere niveau is een proces dat niet van buitenaf gestuurd wordt. Het cognitieve systeem gaat zelf over tot de herrepresentaties om de kennis zo efficiënt mogelijk te kunnen gebruiken.

1.2 Dankzij representational redescription halen we alles eruit wat erin zit

Het RR-proces is uniek voor de mens. Dieren zijn niet in staat tot herrepresentatie. Het RR-proces stelt ons in staat de kennis die we hebben optimaal te gebruiken en deze kennis te vermeerderen via een intern proces. Dit leidt tot een hoog niveau van flexibiliteit en creativiteit. Dieren zijn soms in staat tot zeer ingewikkelde cognitieve processen, maar deze processen worden altijd gebruikt voor hetzelfde doel en dezelfde taak. De mens kan dankzij het doorgaande proces van herrepresentaties opgedane vaardigheden toepassen voor een ander doel of een andere taak. Het cognitieve systeem probeert dus alles uit de kennis te halen wat erin zit. Dit wil echter niet zeggen, dat we op alle microdomeinen "uitontwikkeld" raken en het E2/3 niveau bereiken. Op het gebied van taal bijvoorbeeld voldoen we als volwassenen aan allerlei subtiele gespreksregels, zonder dat we deze regels onder woorden kunnen brengen. Ook zijn er veel motorische en cognitieve vaardigheden die puur impliciet blijven. Op die manier zijn we in staat optimaal te handelen: aan de ene kant snel en automatisch als dat vereist is en aan de andere kant expliciet, creatief en productief, zodat we nieuwe wegen kunnen inslaan en nieuwe verbanden kunnen leggen.

2 Theoretische achtergrond van de RR-theorie

2.1 Modularisatie

Met de RR-theorie probeert Karmiloff-Smith de ideeën van Fodor en Piaget te verenigen (Karmiloff-Smith, 1994). Fodor en Piaget hebben een heel verschillende kijk op hoe het cognitieve systeem te verdelen valt in kleinere eenheden. Fodor gaat uit van een aangeboren modulariteit van de geest. Piaget heeft als uitgangspunt dat alle data door dezelfde mechanismes wordt verwerkt. Karmiloff-Smith breidt deze twee standpunten aan elkaar door niet uit te gaan van modules, maar van een proces van modularisatie. Pasgeboren baby's moeten nog veel cognitieve onderdelen ontwikkelen en tijdens die ontwikkeling treedt modularisatie op van de geest (en de hersenen).

2.2 Ontwikkeling op alle domeinen tegelijk of specifiek per domein

Piaget gaat dus uit van een algemeen cognitief systeem zonder modules. Daarnaast verdedigt hij het constructivisme. Dit houdt in (Karmiloff-Smith, 1992) dat hij van mening is dat baby's bij hun geboorte nauwelijks aangeboren kennis hebben. Het kind moet nog heel het cognitieve systeem ontwikkelen aan de hand van algemene processen. Deze ontwikkeling gaat volgens hem via algemene veranderingen in de structuur van representaties, dus er is geen aparte ontwikkeling per module. Deze veranderingen zijn voor alle cognitieve domeinen hetzelfde en vinden ook voor alle domeinen op hetzelfde moment plaats. Tegenover deze interpretatie van de ideeën van Piaget staat een groep psychologen die uitgaat van domeinspecifieke ontwikkeling. Het kind heeft volgens hen een aantal aangeboren domeinspecifieke principes. Deze principes leiden de leerprocessen. Per (micro-)domein gaat de ontwikkeling op een andere manier en met een ander tijdsverloop. In dit verband wordt met *domein* niet een onderdeel van het cognitieve systeem bedoeld, maar een kennisgebied, zoals bijvoorbeeld taal, natuurkunde en wiskunde. Een

microdomein is een subdomein daarvan. In het geval van taal kun je dan bijvoorbeeld denken aan kennis over het gebruik van lidwoorden. Bij wiskunde is getalbegrip een microdomein.

2.3 Nativisme verenigd met constructivisme

Psychologen die het standpunt verkondigen dat pasgeboren kinderen wel bepaalde voorkennis en/of richtlijnen hebben, worden nativisten genoemd. Met behulp van de RR-theorie probeert Karmiloff-Smith niet alleen verschillende standpunten over modulariteit te verenigen, maar ze probeert ook een brug te slaan tussen het nativisme en het constructivisme. Aan de uitgangspunten van Piaget voegt ze aangeboren domeinspecifieke voorkeuren toe (*biases*). Maar ze gaat niet zo ver als de nativisten. Deze gaan er namelijk van uit dat je niet alleen aangeboren voorkeuren hebt, maar ook al aangeboren kennis, die alleen nog maar "opengevouwd" hoeft te worden in de loop van je leven. Deze gedetailleerde aangeboren specificaties, moeten volgens Karmiloff-Smith erg afgezwakt worden. Karmiloff-Smith stelt zich op het standpunt dat bij geboorte al algemene richtlijnen en voorkeuren aanwezig zijn die verschillen per domein. Deze aangeboren gegevens zijn echter heel beperkt. Ze geven richting aan de mogelijkheden voor het leren en ontwikkelen tijdens de levensloop, maar leggen die paden niet vast. Geen modules dus, maar modularisatie, zoals al reeds eerder is besproken. Karmiloff-Smith vindt het van belang de nadruk meer te leggen op de ontwikkeling van de geest en het brein in interactie met de externe en interne omgeving. Dit is dus meer een kwestie van leren, dan van openvouwen van verborgen kennis.

Nativisme en constructivisme kunnen ook een aanvulling op elkaar zijn. De nativisten leggen namelijk meer de nadruk op de inputsystemen en in het constructivisme zegt juist meer over outputsystemen (Karmiloff-Smith, 1992). De RR-theorie neemt het beste van beide werelden door veel meer domeinspecifiek te zijn dan Piagets constructivisme. Aan de andere kant probeert de RR-theorie wel in totaal verschillende domeinen een zelfde soort onderliggende structuur te vinden in het ontwikkelingsproces.

3 De experimenten

3.1 Verschillende domeinen

Om aan te tonen dat de RR-theorie weliswaar domeinspecifiek is, maar ook domeinoverstijgend, zijn er op allerlei terreinen experimenten uitgevoerd. De vijf domeinen die in *Beyond Modularity* (Karmiloff-Smith, 1992) worden besproken, zijn taal, natuurkunde, wiskunde, psychologie en notatie. Binnen deze domeinen hebben de experimenten betrekking op vaak heel gedetailleerde microdomeinen, zoals bijvoorbeeld *kennis over wat een woord is* of *kennis over het gebruik van lidwoorden* in het taaldomein. De meeste experimenten hebben een identieke opzet. De proefpersonen zijn kinderen uit verschillende leeftijdsgroepen, waarbij de jongsten de vaardigheid net verworven hebben en de oudsten niet alleen perfect presteren, maar hun acties ook zeer gedetailleerd kunnen toelichten. Het hangt van de vaardigheid af wat de gemiddelde leeftijd van de verschillende leeftijdsgroepen is. Er worden ook onderzoeken met baby's beschreven, waarbij het aandachtspatroon of de zuigkracht van de baby een indicatie geeft van verschillen die de baby opmerkt.

3.2 Het aantonen van het E1-niveau

Het moeilijkste onderdeel van de experimenten is ongetwijfeld het aantonen van het E1-niveau. De interne representaties van de proefpersonen zijn veranderd ten opzichte van het I-niveau, maar de proefpersonen kunnen dit zelf niet onder woorden brengen. Het gedrag van de

proefpersonen is in sommige experimenten heel anders als gevolg van de veranderde representaties. Bij andere experimenten zijn de veranderingen in gedrag heel subtiel. De prestatie op de onderzoekstaak (percentage correcte acties) kan een tijdelijke dip vertonen als gevolg van de veranderende representaties. Meestal proberen de proefpersonen in dit geval te strak vast te houden aan een zojuist ontdekte regel of hypothese. Voorbeelden van subtiele gedragsveranderingen op het E1-niveau zijn spontane verbeteringen bij gesproken taal en het toevoegen van overbodige extra informatie aan de output.

In dit onderdeel van het literatuuronderzoek ga ik verder niet inhoudelijk in op de experimenten. Ik beschrijf zeven RR-experimenten in hoofdstuk 2C: *Selectie van twee geschikte experimenten*. Daarin ga ik ook in op de vraag welke experimenten geschikt zijn voor een computationeel model. In de komende paragraaf wil ik me ook richten op cognitieve RR-modellen, maar dan meer vanuit het standpunt van de theorie als geheel.

4 Gevolgen voor de RR-modellen

In deze paragraaf wil ik de eerste stap zetten om van de theorie naar de cognitieve modellen te komen. In deze paragraaf wordt het echt interessant. Hoe kunnen we zicht krijgen op de eisen die de theorie stelt aan RR-modellen? Wat zegt de RR-theorie over hoe die veranderende interne representaties er nu precies uit zien? Laten we kijken welke antwoorden Karmiloff-Smith ons op deze vragen kan geven.

4.1 Eisen die de RR-theorie zelf stelt aan RR-modellen

Het zou wel mooi en handig zijn als we uit de beschrijving van de RR-theorie een lijstje van eisen kunnen halen, die aan RR-modellen worden gesteld. Karmiloff-Smith (1992) heeft eigenlijk maar één hoofdeis: dat het model de overgang van impliciete naar steeds meer expliciete representaties kan beschrijven. Zij ziet veel overeenkomsten tussen haar theorie en de uitgangspunten van het connectionisme. Het blijkt echter dat connectionistische modellen heel goed zijn in het beschrijven van het aanleren van vaardigheden op het I-niveau, maar daarna niet verder komen. Het is onduidelijk of connectionistische modellen in de toekomst wel de overgangen naar expliciete niveaus zouden kunnen modelleren, of dat dit een inherente tekortkoming is van hun architectuur. Karmiloff-Smith is zelf erg enthousiast over het connectionistische netwerken, maar zij zegt niets over de geschiktheid van andersoortige architecturen, zoals symbolische of hybride architecturen. Het zou echter wel helpen de mogelijkheden en tekortkomingen van deze drie soorten te vergelijken. In hoofdstuk 2D: *Computationele modellen van verandering* zal ik deze vergelijking dan ook doen. In *Beyond Modularity* bespreekt Karmiloff-Smith de voor- en nadelen van connectionistische netwerken. Hieronder som ik deze op en probeer ik dit in verband te brengen met eisen die de RR-theorie aan computationele modellen stelt.

Eisen aan de *starting state*. Vanaf het moment dat we als mens geboren worden, veranderen ons brein en onze geest. Er komen meer neurale verbindingen, maar sommige verbindingen verdwijnen ook weer. Op latere leeftijd is ons brein minder flexibel en liggen de meeste verbindingen redelijk vast. Als je dus een model wilt maken van de ontwikkeling van een kind, dan moet dat model ook zijn eigen architectuur kunnen aanpassen als functie van zijn input. Neurale netwerken kunnen dit niet. Het aantal knopen ligt vast en kan niet uitgebreid worden. Wel kunnen neurale netwerken aangeboren voorkeuren modelleren, door het manipuleren van de beginwaarden van de verbindingen. Neurale netwerken zijn echter te domeinspecifiek. Als de zaken geregeld zijn voor een bepaalde taak, dan kan het netwerk wel een nieuwe taak leren, maar dan gaat de kennis over de eerste taak verloren. Dit maakt netwerken wel

geschikt voor het proces van modularisatie, maar dan voor slecht één module. Netwerken kunnen niet aantonen hoe uit een *starting state* meerdere specialistische modules ontstaan.

Eisen aan de input. Connectionistische modellen kunnen één bepaalde taak uitvoeren. Dit is vaak een taak, die versimpeld is en aangepast aan de mogelijkheden van hun architectuur. Er zijn echter veel rijkere inputvectoren nodig om de manier waarop kinderen leren in echte, natuurlijke situaties te kunnen modelleren. Ook zou de nadruk dan meer moeten liggen op het simuleren van doelgericht gedrag. Dit laatste is iets, waar een hybride architectuur als ACT-R betere mogelijkheden voor biedt (Anderson & Lebiere, 1998).

Eisen om de overgang van impliciete naar expliciete representaties te modelleren. Deze overgang is precies het speerpunt van de RR-theorie. Neurale netwerken vermengen echter inhoud en structuur. Daardoor kunnen ze nooit kenniscomponenten isoleren en ergens anders bij gebruiken. Om de RR-theorie te kunnen modelleren, moeten we dus een architectuur hebben, die kenniscomponenten kan isoleren en hergebruiken. Hiervoor is het wel nodig dat we weten hoe we dat isoleren en hergebruiken kunnen laten ontstaan in het model. Het voordeel van ACT-R is, dat structuur en inhoud wel netjes gescheiden zijn. Nadere bestudering van eerder ontwikkelde modellen in ACT-R kan ons wellicht leren hoe we in deze architectuur het isoleren en hergebruiken van kenniscomponenten kunnen laten ontstaan.

Uit bovenstaande opsomming blijkt wel dat de RR-theorie nogal pittige eisen stelt aan de architectuur en de modellen. Het feit dat netwerken op veel punten tekort schieten, wil natuurlijk nog niet zeggen dat andersoortige architecturen wel met de eisen uit de voeten kunnen. In de volgende hoofdstukken kom ik hierop terug en spits ik de discussie nog meer toe op de architectuur ACT-R.

4.2 Hoe zien de veranderende interne representaties er nu precies uit?

Om goede computermodellen van de RR-theorie te kunnen maken, moeten we een zeer gedetailleerd inzicht hebben in hoe de door Karmiloff-Smith beschreven representaties er precies uitzien. Dit is een zeer lastig punt. Karmiloff-Smith (1994) beschrijft haar RR-theorie als een *soft-core framework*, beschreven in verbale termen. Dit heeft als voordeel dat de grote lijn niet uit het oog wordt verloren en een hoog niveau van abstractie bereikt kan worden. Het nadeel is echter dat je niet veel op details hoeft in te gaan en het ook niet allemaal zo formeel hoeft aan te pakken. Het gevolg is dat de RR-theorie eigenlijk nog helemaal niet klaar is om direct gemodelleerd te worden. Hoe de beschreven representaties eruit zien, blijft een open vraag. De enige speculatie die Karmiloff-Smith doet over RR-representaties in (connectionistische) computermodellen, luidt als volgt:

"Thus, one would not want the entire trajectories of the network to be redescribed, but rather the product of the most important ones. And the RR model postulates that redescribed knowledge capturing abstract notions such as "verb" and "noun" must be in a different format than the original level-1 representations. In other words, redescriptions would have to be in a representational format usable across networks which had previously processed different representations at the input level." (Karmiloff-Smith, 1992, p. 187)

Dit betekent dat we nog een lange weg te gaan hebben om de representaties in een vorm gegoten te krijgen, die enerzijds direct in een architectuur gestopt kan worden en anderzijds wel de uitkomsten veroorzaakt, die in de experimenten worden beschreven. Hoofdstuk 3A: *Van RR-theorie naar RR-model* zal een verslag zijn van hoe ik probeer het gat tussen het *soft-core* verbale framework en het *hard-core* ACT-R framework te overbruggen. Het uiteindelijk ontwikkelde model zal echter wel iets toe kunnen voegen aan de RR-theorie!

2B: Generalisatie door specialisatie

1 Algemeen idee

In de nieuwste versie van ACT-R is het mechanisme voor het aanleren van nieuwe productieregels geheel herzien. Als een model vaak een algemene productieregel gebruikt, waarbij er iets opgehaald wordt uit het declaratieve geheugen, dan leidt dit vaak tot het ontstaan van een nieuwe productieregel die het feit dat telkens opgezocht werd in het declaratieve geheugen al in zichzelf heeft ingebakken. Deze nieuwe productieregel is dus een specialisatie van de regel waar hij van afstamt. Op deze manier ontstaan er steeds nieuwe, meer specialistische productieregels. Maar hoe kan er dan generalisatie van regels optreden in ACT-R? Hoe ontstaan nieuwe productieregels die juist algemener zijn dan de regels die je al had? Het algemene idee dat hierop een antwoord hoopt te vinden, bespreek ik in dit hoofdstuk. In grote lijnen kan het idee als volgt geformuleerd worden: generalisatie is eigenlijk ook een vorm van specialisatie. De specialistische kennis wordt niet gegeneraliseerd, maar is meer de aanleiding om nog algemenere productieregels te specialiseren. Deze meer specialistische productieregels zijn dan algemener dan de specialistische kennis waarmee het proces begon. De algemenere productieregels die worden gespecialiseerd, zijn vaak *pattern-matching*-achtige procedures. Hierbij spelen analogieën een belangrijke rol. Deze *pattern-matching*-procedures zijn eigenlijk analogie-trek-procedures. Het zijn dus analogie-trek-procedures die een essentiële rol spelen in generalisatie. Wellicht berust generalisatie altijd op analogieën trekken, waarbij die analogie-trek-procedure wordt gespecialiseerd tot een specifiekere procedure. Dit heeft dan een algemene regel tot gevolg, die algemener is dan het simpele feit dat eerst in het declaratieve geheugen moest worden opgezocht. Er heeft dus generalisatie plaatsgevonden.

2 Generalisatie in actie in het verledentijdenmodel

Hoe moeten we ons dit mechanisme van generalisatie in de praktijk voorstellen? Het ACT-R model van Taatgen en Anderson (2002), dat het aanleren van verleden tijden van werkwoorden beschrijft, maakt van dit idee gebruik om tot een productieregel voor de verleden tijd van regelmatige werkwoorden te komen. Hieronder volgt een gedetailleerde beschrijving van het generalisatie-door-specialisatie-mechanisme in de context van het verledentijdmodel. Het model doorloopt het leerproces op dezelfde manier als kinderen dat doen. Dit betekent dat het model in het begin slechts de beschikking heeft over heel algemene strategieën, die het kan gebruiken om een verleden tijd te produceren, gegeven de stam van het werkwoord. De methodes zijn dus niet specifiek voor die taak. Ze zijn zelfs niet specifiek voor taal bedoeld. Het zijn de volgende drie strategieën:

- Probeer de verleden tijd van het werkwoord uit het declaratieve geheugen op te halen.
- Probeer een nieuwe verleden tijd te genereren met behulp van een analogieproces. Haal een willekeurige verleden tijd op uit het geheugen en gebruik deze als voorbeeld voor de verleden tijd van het huidige woord.
- Gebruik gewoon de stam van het werkwoord als verleden tijd.

Hieruit blijkt dat er nog geen productieregel is, die de algemene regel voor zwakke werkwoorden representeert. Deze regel wordt na verloop van tijd geleerd door het ACT-R model, als een specialisatie van de analogiestrategie.

Dit laatste is dus waar het om gaat. De strategie die slechts eerder gehoorde verleden tijden uit het declaratieve geheugen ophaalt, wordt in feite gegeneraliseerd naar een regel die precies zegt welke verandering een regelmatig werkwoord moet ondergaan (in het Engels: *-ed* achter de stam). Maar deze generalisatie ontstaat als een specialisatie van analogiestrategie. Dit

is wat er in de loop van de tijd gebeurt:

- Het model vormt de verleden tijd van een sterk werkwoord goed, als het een werkwoord is waarvan de verleden tijd (vaak genoeg) eerder is vernomen en dus terug te vinden is in het declaratieve geheugen.
- In andere situaties neemt het model de verleden tijd van een willekeurig werkwoord en gebruikt de analogiestrategie om tot de verleden tijd van het gevraagde werkwoord te komen. Vaak zal de bron voor de analogie (*source analog*) een sterk werkwoord zijn, waarbij dus niets aan de stam van het werkwoord wordt toegevoegd. Als het gevraagde werkwoord bijvoorbeeld *work* was en het model gebruikt *go* als bron voor de analogie, dan zal het resultaat *work* zijn, want er wordt niets aan de stam toegevoegd.
- Sterke werkwoorden worden veel vaker gehoord en gebruikt door het model dan zwakke, dus de hierboven beschreven procedure zal vaak gebeuren. Als deze methode vijftientig keer is aangeroepen, treedt specialisatie op van de productieregels die bij deze methode betrokken zijn. Dit leidt tot het ontstaan van een nieuwe regel, de *blank suffix rule*. Deze regel is echter niet zo succesvol, want nu gebruikt het model gewoon de stam als verleden tijd. Dit brengt een hoop extra kosten met zich mee, omdat het model nu onduidelijk communiceert, of zijn zin aan moet vullen met tijdsaanduidingen zoals *gisteren*. Deze regel blijft dus wel onderdeel van het model, maar zal niet vaak gekozen worden om in actie te komen.
- De analogie-strategie wordt in een kleiner deel van de gevallen ook toegepast met een zwak werkwoord als bron van de analogie. In dat geval is het gevraagde woord bijvoorbeeld *talk* en de bron bijvoorbeeld *walk* → *walked*. Dit leidt tot het resultaat *talked*.
- Na een wat langere tijd heeft het model ook deze vorm van de analogie-strategie vijftientig keer gebruikt. Nu treedt opnieuw specialisatie op. De regelmatige-werkwoorden-regel ontstaat. Deze regel is zeer succesvol, want je kunt hem op ieder werkwoord toepassen. Het model kiest nu zo vaak voor deze regel, dat er overgeneralisatie optreedt – *break* wordt *breaked*. Op het moment is echter het meest van belang hoe deze regel heeft kunnen ontstaan en werkelijk succesvol wordt in het model. Conclusie: de regelmatige-werkwoorden-regel is een algemene regel. Hij is algemener dan de regel die gewoon het werkwoord opzoekt in het declaratieve geheugen (de "opzoekregel"). De generalisatie naar de regelmatige-werkwoorden-regel is echter geen generalisatie van deze opzoekregel, hoewel je dat wel zou verwachten. De generalisatie naar de regelmatige-werkwoorden-regel blijkt een specialisatie van de (zeer algemene) analogiestrategie te zijn.

3 Opmerkingen bij de analogiestrategie

Zojuist zagen we het generalisatie-door-specialisatie-idee in actie. Er moeten echter nog wel wat vragen worden beantwoord over dit idee in de context van het verledentijdmodel. Hoe ziet die analogiemethode er dan uit in dit ACT-R model? Waar komen die analogie-productieregels zelf dan weer vandaan? En met name: is dit mechanisme van het ontstaan van toegespitste, maar toch algemene regels ook in andere contexten toepasbaar en hoe gaat dan dat in zijn werk? De laatste vraag is zo belangrijk dat hij een eigen paragraaf krijgt hieronder. Op de eerste twee vragen ga ik nu in.

Hoe ziet de analogiestrategie eruit in het verleden-tijden-model? Deze bestaat uit twee zeer gespecialiseerde *pattern-matching* productieregels, namelijk:

RULE ANALOGY-FILL-SLOT

IF the goal has an empty *suffix* slot
 AND there is an example in which the *suffix* has a value
THEN set *suffix* of the goal to the *suffix* value of the example

en

RULE ANALOGY-COPY-A-SLOT

IF the goal has an empty *stem* slot and the *of* slot has a certain value
AND in the example the values of the *of* and *stem* slots are equal
THEN set *stem* to the value of the *of* slot

Om deze regels te begrijpen, moeten we eerst weten hoe een "verledentijdfeit" in het declaratieve geheugen is opgeslagen. Neem als voorbeeld van een zwak werkwoord *walk*. Deze staat als volgt in het declaratieve geheugen:

PAST-TENSE-GOAL23

ISA	PAST
OF	WALK
STEM	WALK
SUFFIX	ED

Een sterk werkwoord (bijvoorbeeld *go*) staat als volgt gerepresenteerd:

PAST-TENSE-GOAL24

ISA	PAST
OF	GO
STEM	WENT
SUFFIX	BLANK

De regel *analogy-fill-slot* neemt dus een willekeurige verledentijdchunk uit het declaratieve geheugen en gebruikt die als bron voor de analogie. Hij zet de *suffix* van de *target analog* op dezelfde waarde als de *suffix* van de *source analog*. De regel *analogy-copy-a-slot* zorgt ervoor dat in het *stem-slot* van de target analog dezelfde waarde komt te staan als al in het *of-slot* stond.

Samen zorgen de twee analogieregels ervoor dat er altijd een verleden tijd geproduceerd kan worden, ook van woorden die het model nog niet eerder gehoord heeft. Nu komen we echter op de tweede vraag van deze paragraaf: waar komen die analogieproductieregels zelf dan weer vandaan? Het zou kunnen zijn dat deze regels zelf ook weer een specialisatie zijn van meer algemene analogiestrategieën. Maar het is wel lastig om binnen ACT-R dit specialisatieproces dan weer te verklaren, want de namen van slots in ACT-R kunnen niet variabel worden gemaakt. Een andere manier om er tegen aan te kijken, is als volgt. Deze twee analogieregels zijn een onderdeel van een veel grotere verzameling analogieregels, die allemaal een *pattern-matching*-proces beschrijven met telkens een ander slotnaam als focus. Deze twee analogieregels zijn echter de enige twee die op de huidige situatie van toepassing zijn en daarom zijn slechts deze twee uitgewerkt in het verledentijdmodel. Hoe een dergelijke grote verzameling analogieregels dan weer ontstaat is een vraag die nauw samenhangt met de vraag van de volgende paragraaf: is dit mechanisme van het ontstaan van toegespitste, maar toch algemene regels ook in andere contexten toepasbaar en hoe gaat dan dat in zijn werk?

4 Andere contexten voor het generalisatie-door-specialisatie-principe

In de psychologie wordt veel onderzoek gedaan naar analogieën. Dankzij allerlei gecontroleerde experimenten komen we steeds meer te weten over hoe mensen te werk gaan wanneer ze

analogieën gebruiken en met name over wanneer een bepaalde analogie wel door de meeste proefpersonen wordt getrokken en wanneer dit niet (spontaan) gebeurt. De analogieën waar we het nu over hebben, zijn echter vaak op een hoog niveau en meestal ook tussen twee verschillende domeinen. In het schema van generalisatie-door-specialisatie past echter een ander soort analogieën: simpele, laag-niveau analogieën, die juist wel altijd binnen hetzelfde domein blijven. Het zou weleens zo kunnen zijn dat de kracht en het belang van dergelijke analogieën nog niet voldoende is onderkend. Met name de rol die zij spelen bij het leren van cognitieve vaardigheden is een nadere uitwerking waard. Wat we inmiddels weten over analogieën vanuit de psychologische literatuur kan daarbij zeker van waarde zijn, alleen wordt het in feite in een nieuwe context geplaatst. Uit de psychologische analogieliteratuur (Reeves & Weisberg, 1994) weten we bijvoorbeeld dat overeenkomst in oppervlaktekenmerken tussen bron en doel een analogie mogelijk en succesvol maakt. Voor mensen met genoeg kennis op het gebied in kwestie (experts) werkt analogie nog beter als zowel de oppervlaktekenmerken als de onderliggende, structurele kenmerken van bron en doel hetzelfde zijn. Door tegengestelde (afwijkende) oppervlaktekenmerken laten zij zich niet of minder van de wijs brengen. Het blijkt dat oppervlaktekenmerken en structurele kenmerken ieder hun eigen functie hebben bij het trekken van analogieën: oppervlaktekenmerken spelen een belangrijke rol in het vinden (*retrieval*) van de bron, terwijl overeenkomst in structurele kenmerken helpt bij het goed toepassen van de analogie. Dit zie je ook bij de twee analogie-regels uit het verledentijdmodel. Bij de *analogy-fill-slot* regel gaat het er met name om dat herkend wordt dat we met een zelfde soort situatie te maken hebben. Deze regel zoekt het voorbeeld, oftewel de bron. Bij de *analogy-copy-a-slot* regel is de structuur van de voorbeeldchunk zeer belangrijk, want het gaat om het *stem-slot* en het *of-slot* en om het feit dat de waarden daarop gelijk zijn.

Uit bovenstaande uiteenzetting blijkt, dat als we analogie betrekken in het generalisatie-door-specialisatie-proces, we meer te weten kunnen komen over hoe generalisatie in zijn werk kan gaan. Daarbij kunnen we gebruik maken van de kennis die we over het gebruik van analogieën hebben. Op die manier komen we te weten hoe het generalisatie-door-specialisatie-uitgangspunt werkt en kunnen we hopelijk een antwoord vinden op de hamvraag: wat is de rol van het generalisatie-door-specialisatie-principe bij het leren van (cognitieve) vaardigheden in het algemeen?

2C: Selectie van twee geschikte experimenten

1 Selectiecriteria

Het doel van dit literatuuronderzoek is de selectie van twee RR-experimenten van Karmiloff-Smith, die in aanmerking komen voor simulatie in ACT-R. Karmiloff-Smith heeft heel wat RR-experimenten gedaan. Deze worden kort beschreven in *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science* (Karmiloff-Smith, 1992). Het zijn er echter te veel om ze allemaal diepgaand te vergelijken. Daarom is het nodig een voorselectie te maken van op het eerste gezicht geschikte experimenten. Hieronder leg ik uit wat de selectiecriteria bij deze voorselectie zijn geweest. In paragraaf 2 volgt een lijst van zeven experimenten die door de voorselectie zijn heengekomen.

Bij de voorselectie heb ik gelet op de volgende onderdelen:

- **Moeilijkheidsgraad:** hoe ingewikkeld het experiment is.
- Wat voor **input** de proefpersoon krijgt en wat voor **output** hij geeft.
- Hoeveel en welke **voorkennis / wereldkennis** de proefpersoon moet hebben voor het experiment.
- Welk niveau / welke **niveaus** van de RR-theorie met het experiment onderzocht wordt/worden.

De experimenten die de voorselectie doorstaan hebben, zijn experimenten die als volgt op de hierboven genoemde aspecten scoren:

- **Moeilijkheidsgraad:** een simpel en helder experiment.
- De **input** die de proefpersoon krijgt is simpel en makkelijk te representeren in symbolen. Hetzelfde geldt voor de **output**. Dit betekent dat er nogal wat experimenten met zeer kleine kinderen afvielen, omdat de input en/of de output in zo'n geval vaak een ingenieus perceptueel patroon was. Tevens is het noodzakelijk dat de outputmogelijkheden beperkt zijn. Dit maakt een aantal tekenexperimenten ook minder geschikt.
- De proefpersonen moeten niet te veel voorkennis en/of **wereldkennis** nodig hebben. Deze kennis moet namelijk in het model gestopt worden en dat moet een overzichtelijke operatie blijven. Natuurlijk is er altijd wel een beetje kennis nodig. Ik heb experimenten geselecteerd die duidelijk aan te wijzen en te definiëren voorkennis veronderstellen.
- Het experiment onderzoekt niet slechts één niveau van de RR-theorie, maar beslaat het proces van overgangen naar volgende niveaus zo breed mogelijk.

2 Lijst van mogelijke experimenten

De volgende zeven experimenten zijn de voorselectie doorgekomen:

- **Playrooms.** Dit is experiment 12 uit een reeks experimenten naar lidwoorden en verwijzing (Karmiloff-Smith, 1979a, p. 170-185). Volledige naam: *comprehension experiment 12: the playrooms*. In hetzelfde boek wordt ook een ander playrooms-experiment beschreven (*production experiment 1: the playrooms*). Hiermee moet dit geselecteerde experiment niet verward worden.
- **Routes opschrijven.** Hierin moeten kinderen een route die de leider van het experiment uitzet op een kaart onthouden door er een representatie op papier van te maken (Karmiloff-Smith, 1979b).
- **Tekeningen.** De proefpersonen krijgen de opdracht normale en abnormale objecten te tekenen (Karmiloff-Smith, 1990).

- **Wat is een woord?** Kinderen van vier en vijf jaar luisteren naar een verhaaltje. Dit verhaaltje wordt telkens onderbroken. De kinderen moeten het laatste woord herhalen. Dit is dus een on-line taak (Karmiloff-Smith, Grant, Sims, Jones en Cuckle, 1996).
- **Wat is een woord, on-line en off-line.** Bij dit experiment is een bredere leeftijdsgroep betrokken. Ook zij moeten het laatste woord herhalen (on-line taak). Daarnaast moeten ze ook een off-line taak doen, waarbij ze aan een teddybeer vertellen of een los genoemd woord wel of niet een woord is (Karmiloff-Smith, 1992, p. 53-54).
- **Blokken.** Kinderen moeten een blok laten balanceren op een dunne metalen balk (Karmiloff-Smith and Inhelder, 1974/75).
- **Spoorbanen.** Eerst tekenen de kinderen een spoorbaan na, die bochten en rechte stukken bevat. Vervolgens moeten ze om onderdelen vragen en deze spoorbaan nabouwen. Daarna tekenen ze de spoorbaan weer na (Karmiloff-Smith, 1979c).

Hieronder zal ik ieder experiment beschrijven aan de hand van een aantal aspecten en een paar pluspunten en minpunten noemen. Dit vergemakkelijkt de vergelijking van de experimenten.

Experiment 1: Playrooms

Doel:	Onderzoek naar begrip van lidwoorden.
Domein:	Taal.
Microdomein:	Lidwoorden.
Input:	Vraag aan proefpersoon: "Tegen wie zeg ik: <i>Prête moi une X / la X?</i> "
Output:	Antwoord: meisje/ jongen, plus eventueel uitleg.
Niveaus:	I – E1 – E2/3.
Korte beschrijving:	Kinderen raden of de onderzoeker tegen de meisjespop of de jongenspop praat. Beide poppen hebben een speelruimte met meerder objecten. Als de onderzoeker het over <i>een</i> bal heeft (Frans: <i>une balle</i>), dan bedoelt hij de pop die meer dan één bal heeft. Eerst doen Franse kinderen dit op gevoel goed. Daarna interpreteren ze <i>une</i> alsof het <i>één</i> betekent en maken dus vaak fouten. Weer later in de ontwikkeling doen ze het weer goed en weten ze ook uit te leggen wat de rol van de lidwoorden hierin is.
Pluspunten:	Context overzichtelijk. Input en output simpel, behalve de uitleg.
Minpunten:	Uitleg van de kinderen moeilijk te modelleren.
Opmerkingen:	Dubbele betekenis <i>une</i> (telwoord en lidwoord) specifiek voor Franse taal.

Experiment 2: Routes opschrijven

Doel:	Niveau-overgangen van RR-theorie in de loop van één experiment aantonen.
Domein:	Notatie.
Microdomein:	Route noteren.
Input:	Telkens afrollend papier met daarop een route aangegeven.
Output:	Door de proefpersoon gemaakte representatie van de route op papier.
Niveaus:	I – E1.
Korte beschrijving:	Kinderen onthouden de route door hem op te schrijven. Eerst geven ze gewoon per splitsing de doodlopende en doorlopende paden aan. Later gaan ze redundante informatie toevoegen. Weer later worden ze efficiënter en geven ze de route abstracter weer, zonder redundante informatie.
Pluspunten:	Microtijdschaal: niveau-overgang tijdens experiment.

Minpunten:	Alleen overgang naar niveau E1. Route representeren kan op heel veel manieren. Iedere proefpersoon doet dat anders.
Opmerkingen:	Output moeilijk na te doen in een model. Resultaten van dit experiment zijn goed verklaarbaar met RR-theorie, maar als je hier een model van zou maken, gaat veel detail en bewegingsvrijheid verloren.

Experiment 3: Tekeningen

Doel:	Constraints bij RR in beeld brengen.
Domein:	Notatie.
Microdomein:	Tekeningen van levende en niet-levende objecten.
Input:	Tekenopdrachten: <i>Teken een huis</i> en <i>Teken een huis dat niet bestaat</i> .
Output:	Tekeningen.
Niveaus:	I – E1 – E2/3.
Korte beschrijving:	Proefpersonen worden steeds flexibeler in het tekenen van niet bestaande objecten, naarmate ze ouder worden. Jonge kinderen laten elementen weg of veranderen de vorm of grootte van onderdelen. Oudere kinderen voegden ook elementen toe, veranderde positie of oriëntatie van elementen of voegden dingen toe van een andere categorie.
Pluspunten:	Interessant microdomein. Onderzoekt de rol van constraints bij RR.
Minpunten:	Output vrijwel onmogelijk te modelleren.
Opmerkingen:	Tekeningen van kinderen zijn moeilijk te kwantificeren. Dit onderzoek is zeer afhankelijk van interpretaties.

Experiment 4: Wat is een woord?

Doel:	Onderzoeken hoe kinderen metakennis krijgen over wat een woord is.
Domein:	Taal.
Microdomein:	Metalinguïstische kennis over woorden.
Input:	Voorgelezen verhaaltje met pauzes. Vraag bij pauze: <i>Wat was het laatste woord?</i>
Output:	Het laatste woord (gesproken).
Niveaus:	I – E1.
Korte beschrijving:	Vierjarige kinderen komen minder vaak met het juiste antwoord dan vijfjarigen. Wel blijkt dat de kinderen het nagenoeg even goed doen bij woorden van de open klasse (woorden als <i>huis, mooi, werkt, loopt, Marie, gezongen</i>) als van de gesloten klasse (woorden als <i>de, het, die, en, maar, als</i>).
Pluspunten:	Output duidelijk.
Minpunten:	Proces van verwerken van voorgelezen tekst niet makkelijk te modelleren. Overgangen niet duidelijk aan te geven, want alleen I- en E1-niveau komen aan de orde.
Opmerkingen:	Bij dit experiment zijn nog andere experimenten gedaan, die moesten aantonen dat de kinderen niet gebruik maakten van andere strategieën, zoals het herhalen van de laatste klank(-en).

Experiment 5: Wat is een woord, on-line en off-line

Doel:	Het vergelijken van een off-line en een on-line beoordeling van wat een woord is.
Domein:	Taal.
Microdomein:	Metalinguistische kennis over woorden.
Input:	On-line: onderbroken verhaaltje. Vraag: wat was het laatste woord? Off-line: is X een woord?
Output:	On-line: het laatste woord. Off-line: ja / nee.
Niveaus:	I – E1 – E2/3.
Korte beschrijving:	Drie- en vierjarige kinderen hebben moeite met beide taken. Vijfjarigen doen het redelijk op de on-line taak, maar niet op de off-line taak. Zes- en zevenjarige kinderen presteren goed op beide taken.
Pluspunten:	Bekijkt alle niveaus. Simpel experiment.
Minpunten:	Hoe de representaties er precies uitzien, blijft giswerk.
Opmerkingen:	Dit experiment wordt kort besproken in <i>Beyond Modularity</i> (Karmiloff-Smith, 1992), maar er wordt daar geen referentie gegeven naar een uitgebreidere beschrijving van het experiment.

Experiment 6: Blokken

Doel:	Representatieovergangen in balanceertaak in natuurlijke omgeving onderzoeken.
Domein:	Natuurkunde.
Microdomein:	<i>Law of Torque</i> .
Input:	Dunne metalen balk waarop verschillende soorten blokken moeten balanceren.
Output:	Beschrijving van de acties van de kinderen.
Niveaus:	I – E1 – E2/3.
Korte beschrijving:	Kinderen proberen verschillende soorten blokken te laten balanceren. Jongere kinderen maken hiervoor gebruik van een <i>trial-and-error</i> -strategie. Oudere kinderen passen de theorie van middelpunt=balanceerpunt te strikt toe. Nog weer oudere kinderen weten deze theorie te nuanceren en passen deze alleen toe bij blokken met een gelijkmatige verdeling.
Pluspunten:	Conclusies worden getrokken op basis van de acties in plaats van de commentaren van de proefpersonen. Laat zien hoe kinderen theorieën opstellen en deze gebruiken. Gebruikte strategieën zijn helder.
Minpunten:	Modelleren van het gebruik van "voel-informatie" lastig. Modelleren van exploratie-fase (waarin blok uitvoerig wordt bekeken) lastig.

Experiment 7: Spoorbanen

Doel:	Niveau-overgangen in de loop van 1 experiment aantonen.
Domein:	Notatie.
Microdomein:	Representatie van spoorbanen.
Input:	voorbeeld van een rondlopende spoorbaan, losse stukken spoorbaan.
Output:	Tekening van spoorbaan.

	Constructie van spoorbaan uit losse stukken. Wederom tekening van spoorbaan.
Niveaus:	I – E1 – E2/3.
Korte beschrijving:	Kinderen zien een spoorbaan die ze natekenen, nabouwen en vervolgens weer natekenen. Om hem na te kunnen bouwen, moeten ze onderdelen aan de onderzoeker vragen. Het blijkt dat alle kinderen dit kunnen. Kinderen die de representaties op het E1-niveau hebben, blijken echter redundante informatie toe te voegen en een tweede tekening te maken, waarin de bochten overdreven rond zijn weergegeven. Later in de ontwikkeling verdwijnt deze overdrijving weer.
Pluspunten:	Zeer simpel experiment. Micro-ontwikkeling.
Minpunten:	Output moeilijk te modelleren.
Opmerkingen:	Constructie van spoorbaan moeilijk te modelleren. Verandering van representaties wordt mooi aangetoond.

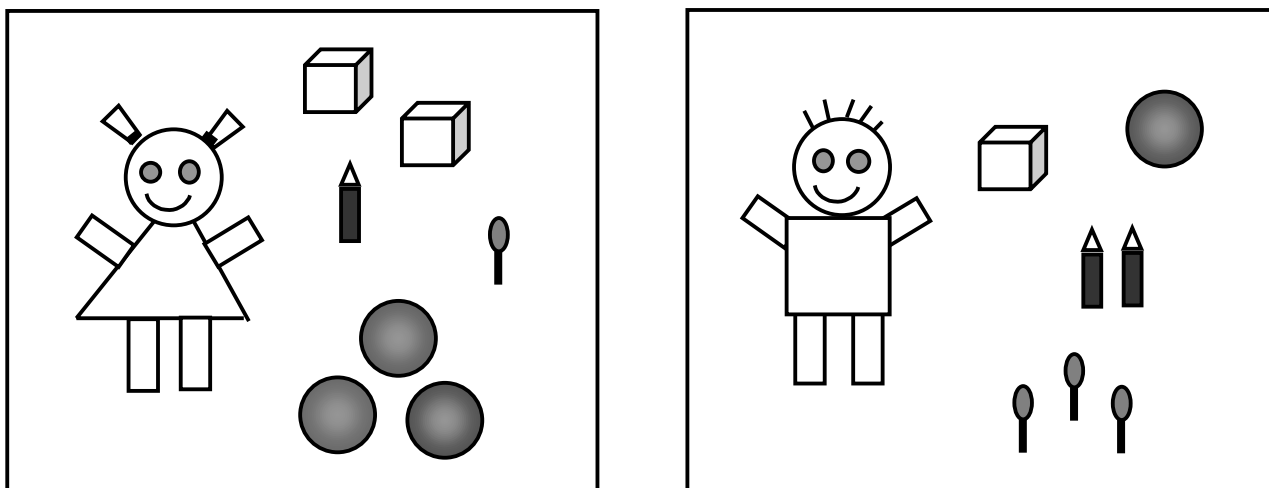
3 De uiteindelijke keuze

3.1 De vergelijking

Alle experimenten hebben zo hun voor- en nadelen. Een belangrijk vergelijkingscriterium is de vorm van de output. De experimenten op het gebied van notatie (experiment 2 en 3) geven veel vrijheid aan de output. Hierdoor zijn ze minder geschikt om te modelleren. Experimenten die alleen niveau I en E1 beschrijven, zijn ook niet favoriet, omdat juist de overgangen tussen alledrie de niveaus interessant zijn. Een experiment op microtijdschaal (experiment 2 en 7) is erg interessant en informatief, omdat je dan in korte tijd meer te weten kunt komen over hoe de overgang van het ene naar het andere niveau in zijn werk gaat. Het modelleren van een experiment, dat proefpersonen van verschillende niveaus naast elkaar zet is echter ook de moeite waard. Ook een dergelijk model kan laten zien hoe een overgang naar een hoger niveau werkt. Bijkomend voordeel in deze situatie is, dat de experimenten die een macrotijdschaal hebben, wel de volle breedte van het ontwikkelingstraject aantonen – van I naar E1 naar E2/3. De experimenten op microtijdschaal blijven steken bij het E1-niveau. De enige experimenten op alle niveaus en met een beperkt aantal mogelijke outputs zijn de experimenten 1, 5 en 6. In experiment 6 (blokken) is er in principe wel een heel scala aan mogelijke outputacties, maar de kinderen blijken in de praktijk altijd op grond van een strategie te handelen, waarbij het aantal verschillende strategieën heel beperkt is. Van experiment 5 heb ik geen uitgebreid verslag kunnen vinden. Dit maakt het moeilijk zicht te krijgen op de voorkennis / wereldkennis van de proefpersonen. De enige twee experimenten, waarvan ik kan overzien dat ze echt goed scoren op de criteria uit paragraaf 1 – een simpel experiment met heldere input en output, waarvoor weinig wereldkennis vereist is, dat de RR-theorie zo breed mogelijk onderzoekt – zijn experiment 1 en 6. Deze twee roep ik hierbij dus uit tot winnaars van de selectieprocedure. Hieronder zal ik ze nog wat uitgebreider bespreken en vertellen welke ik eerst wil gaan modelleren en waarom.

3.2 De winnaars

Het playrooms-experiment en het blokkenexperiment lijken dus het meest geschikt om te modelleren in ACT-R. Volgens de RR-theorie zijn beide experimenten op een heel abstract niveau van dezelfde soort. Beide beschrijven proefpersonen die de relevante representaties op verschillende niveaus hebben. Dit leidt tot verschillend gedrag. In beide gevallen zien we een U-vorm in de prestatie. Jongere kinderen doen de taak goed. Iets oudere kinderen presteren minder.



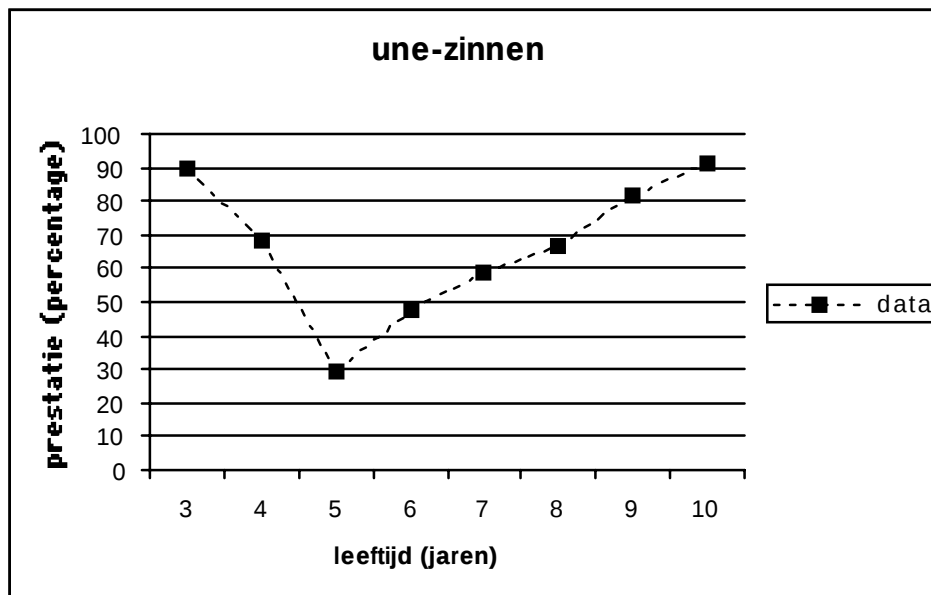
Figuur 1: De playrooms.

Ze gaan een nieuw soort fouten maken. Nog wat oudere kinderen komen weer op hetzelfde niveau als de jongste kinderen, alleen weten ze nu ook echt waar ze mee bezig zijn.

De eerste winnaar is het **playrooms-experiment**. Ik zal nu beschrijven waar dit experiment om draait. Kinderen blijken al vroeg kennis te hebben over wanneer je een bepaald lidwoord (Frans: *le* en *la*) moet gebruiken en wanneer je juist een onbepaald lidwoord (Frans: *un* en *une*) gebruikt. In dit experiment, wordt het aanwezig zijn van deze kennis aangetoond. Tevens wordt zichtbaar gemaakt dat de manier waarop kinderen deze kennis in hun hoofd hebben en kunnen gebruiken, wel sterk verandert naarmate ze zich meer ontwikkelen. De methode van het experiment is als volgt: de kinderen zien twee speelruimtes (*playrooms*). De ene ruimte is van een meisjespop en de andere van een jongenspop. Beide poppen zitten duidelijk zichtbaar in hun speelruimtes. Het meisje heeft de beschikking over een andere verdeling van speelattributen dan de jongen. Heft het meisje bijvoorbeeld één bal, dan heeft de jongen drie ballen. Daar staat dan weer tegenover dat de jongen bijvoorbeeld maar één boek heeft en het meisje vier boeken (zie figuur 1). De objecten zijn zo gekozen dat het allemaal vrouwelijke zelfstandig naamwoorden zijn in het Frans. De onderzoeksleider vraagt in het Frans aan de proefpersoon: "Tegen wie zeg ik: *Leen me de bal?*" of "Tegen wie zeg ik: *Leen me een bal?*" (en vergelijkbare vragen, maar dan met een ander object). De proefpersoon antwoordt telkens met "Tegen de jongen" of "Tegen het meisje". Het uitgangspunt hierbij is, dat als je zegt: "Leen me de bal", dan kan dat alleen tegen iemand die maar één bal heeft. Omgekeerd is het niet echt fout om "Leen me een bal" te zeggen tegen iemand die maar één bal heeft, maar het is waarschijnlijker dat je dat zegt tegen iemand die meer ballen heeft. Uit de resultaten van het experiment blijkt dat Franse kinderen een periode hebben waarin ze de betekenis van *une* verkeerd interpreteren, namelijk als *telwoord* in plaats van als *lidwoord*. Jonge kinderen van drie en vier jaar doen de taak best goed. Vanaf een jaar of vijf zakt de prestatie drastisch, omdat de kinderen *une* verkeerd begrijpen. Later stijgt de prestatie weer. Kinderen van tien jaar hebben weer hetzelfde niveau bereikt als de driejarigen. Dit ontwikkeling in prestatie beschrijft dus een U-vorm voor de *une*-zinnen (zie figuur 2).

De tweede winnaar is het **blokkenexperiment**. Ook hiervan volgt nu een omschrijving. In dit experiment moeten kinderen verschillende soorten blokken op een dunne metalen balk laten balanceren. Ze krijgen een hele verzameling blokken tot hun beschikking. Er zijn zeven soorten blokken. Er is een soort met een evenredige gewichtsverdeling, maar er zijn ook soorten die dat niet hebben. Soms is de reden daarvoor zichtbaar – er zit een groot vierkant blok aan één van de uiteinden geplakt – en soms niet – het blok is aan één kant intern verzwaard met een stuk metaal. Ook is er een soort die onmogelijk te balanceren is. Eerst mogen de proefpersonen zelf weten

in welke volgorde ze de blokken proberen te laten balanceren. In de tweede fase van het experiment moeten ze dezelfde blokken nog een keer laten balanceren, maar dan in een volgorde die vastgelegd is door de onderzoeker. Het blijkt dat jonge kinderen moeite hebben met de taak en zich verliezen in het subdoel om de eigenschappen van de blokken te bestuderen. Iets oudere kinderen (vier-, vijfjarigen) doen de taak vaak wel goed. Later in de ontwikkeling houden ze iets te strak vast aan hun zojuist ontdekte theorie dat het balanceerpunt altijd in het midden moet liggen. Pas vanaf zevenjarige leeftijd presteren de kinderen weer op hetzelfde niveau als de vierjarigen.



Figuur 2: Resultaten playrooms-experiment

Voor het modelleren van de experimenten, is een theoretische uitwerking nodig, die gedetailleerder is dan de beschrijvingen van de experimenten zelf. Voor deze theoretische uitwerking (zie hoofdstuk 2B) heb ik gebruik gemaakt van een model van Taatgen en Anderson (2002) van het leren van verleden tijden. Dat model heeft ook taal als domein. Het ligt dus voor de hand eerst het playrooms-experiment te modelleren. Een andere overweging hierbij is dat het blokkenmodel een aantal lastige modelleeraspecten heeft. De kinderen worden opgezet met een behoorlijk vrije opdracht om de blokken te laten balanceren. Bovendien kunnen ze het zo vaak als ze willen proberen. Ook spelen, kijken en voelen een erg belangrijke rol. Het blokkenexperiment is dus ingewikkelder en heeft veel te veel actiemogelijkheden. Om deze redenen was het toch handiger om eerst het playrooms-experiment te modelleren en pas daarna over te gaan op het blokkenmodel. Aangezien de beschikbare tijd zeer beperkt was voor dit afstudeeronderzoek, is het helemaal implementeren van het blokkenmodel niet haalbaar gebleken. In deze scriptie komt dit model dus wel aan bod, maar dan alleen in de vorm van een ontwerp op papier.

2D: Computatieve modellen van verandering

1 Inleiding

In hoofdstuk 2A: *De Representational Redescription theorie* heb ik al een eerste stap gemaakt van de theorie naar de te ontwikkelen cognitieve modellen. In de laatste paragraaf daarvan beschreef ik wat Karmiloff-Smith zelf aan heeft gegeven als belangrijke punten en eisen voor modellen van de RR-theorie. In dit literatuuronderzoek wil ik verdergaan met onderzoeken aan welke eisen de modellen moeten voldoen en welke tussenstappen ik moet nemen om tot een ACT-R model te komen. Nu zal ik mij echter niet beperken tot Karmiloff-Smith zelf, maar juist ook andere auteurs raadplegen. Ik zal me verdiepen in de computationele modellen die reeds bestaan van ontwikkelingspsychologische theorieën. Ik leg hierbij de nadruk op modellen die aangeven hoe je van impliciete naar expliciete representaties kunt overgaan. Er bestaan zowel connectionistische als symbolische modellen die zich hiermee bezig houden. In de volgende subparagrafen ga ik in op het verschil in uitgangspunten en mogelijkheden van beide soorten modellen. In paragraaf 2 zal ik vervolgens een aantal connectionistische modellen onder de loep nemen. Daarna zijn de symbolische en hybride modellen aan de beurt. Tot slot probeer ik te concluderen wat ik kan leren van deze eerder ontworpen modellen en beschrijf ik waaraan de door mij te ontwikkelen modellen moeten voldoen.

1.1 Connectionisme en symbolisme

Binnen het connectionisme werkt men met kunstmatige neurale netwerken. De manier waarop deze zijn vormgegeven is gebaseerd op hoe de menselijke hersenen en het centrale zenuwstelsel biologisch in elkaar zitten. Natuurlijk zijn de connectionistische modellen wel altijd een versimpeling van de werkelijkheid. Over het algemeen wordt vastgesteld hoeveel cellen (units) het netwerk heeft en hoe de verbindingen lopen. Door middel van een leermechanisme wordt dan tijdens een trainingsperiode de sterkte van de verschillende verbindingen bepaald. Eén bepaald netwerk kan één bepaalde taak uitvoeren. Verderop in dit literatuuronderzoek zullen we wat geavanceerdere netwerken tegenkomen, die juist wel tijdens het leren hun architectuur nog aan kunnen passen. Deze netwerken beginnen met een bepaald aantal units, maar breiden dit aantal uit als dat nodig is tijdens het leerproces. Het symbolisme heeft een heel ander uitgangspunt. In symbolische modellen heb je als kleinste eenheden symbolen. Deze symbolen zijn representaties van kleine stukjes kennis. De symbolen worden gemanipuleerd door productieregels. Deze regels zorgen ervoor dat er uit de huidige kennis nieuwe kennis kan ontstaan.

Het blijkt dat beide uitgangspunten hun eigen sterke punten hebben. Connectionistische modellen zijn goed in het simuleren van simpelere taken, die een directe relatie tussen perceptie en actie hebben. Dit soort taken zijn een stuk lastiger in een symbolisch model te vangen. Symbolische modellen zijn echter weer beter in het simuleren van taken die meer planning en redenering met zich meebrengen. Er komen ook steeds meer hybride modellen, die de voordelen van beide soorten proberen te verenigen. Ondanks deze dappere pogingen, is er toch vaak nog sprake van twee kampen, die beiden beweren de beste methode in handen te hebben. Simon en Halford (1995) vinden deze "oorlog" niet nodig. Zij bespreken de voordelen van computationele modellen in het doen van onderzoek naar cognitieve veranderingen. Juist het modelleren van die veranderingen moet ons inzicht brengen in wat er precies gebeurt:

"We cannot assume that we know the answer ahead of time. Rather, we must use this methodology to help us discover how cognitive transitions occur. In that enterprise, both symbolic and nonsymbolic approaches have their place." (Simon en Halford, 1995, p. 22).

Aangezien de modellen die ik wil gaan ontwikkelen ook zeker over cognitieve verandering gaan, zal ik hier even stilstaan bij de voordelen die computationele modellen van cognitieve verandering hebben, volgens Simon en Halford. Zij beweren dat computationele modellen de beste en eigenlijk de enige manier zijn om verandering te onderzoeken. Je kunt de modellen immers direct manipuleren. Dit betekent dat je dan meer weet over de representaties en de processen die de verandering veroorzaken. Je kunt meer zeggen over onder welke condities de verandering optreedt. Computationele modellen dragen op drie verschillende manieren bij aan ontwikkelingspsychologisch onderzoek. (1) De modellen helpen bij de interpretatie van de prestatie van kinderen tijdens experimenten. (2) Ze geven meer inzicht in theoretische onderwerpen, zoals capaciteitsbeperkingen. (3) Bovendien genereren computationele modellen weer nieuwe onderzoeksvragen. In de rest van dit literatuuronderzoek probeer ik uit te vinden hoe we werkelijk van al deze voordelen kunnen profiteren en in hoeverre reeds bestaande modellen hierin slagen.

1.2 Wat willen we weten van de modellen?

De modellen die ik in dit literatuuronderzoek bespreek, hebben één ding gemeen: ze gaan allemaal over cognitieve verandering. Maar hoe krijgen ze dat voor elkaar? Simuleren ze de ontwikkeling van kinderen of is het model meer een veredelde beschrijving? Modelleren ze de overgang zelf of doen ze meer een soort voor-en-na-onderzoek? Hoe maken ze gebruik van de resultaten die uit experimenten zijn gekomen? Werken ze binnen een overkoepelende architectuur? Is de soort overgang die ze beschrijven in verband te brengen met de RR-theorie? Wat voor aannames liggen aan de modellen ten grondslag? Hoe modelleren ze aangeboren of inmiddels verworven kennis? Hoe modelleren ze de omgeving waar het model mee interacteert en de input die het model uit de omgeving krijgt? Deze vragen zijn stuk voor stuk essentieel in het ontwerptraject. Antwoord hierop zal mij zeker helpen bij het maken van mijn modellen. In de komende paragrafen zal ik bovenstaande vragen samenvatten met behulp van de volgende steekwoorden: *simulatie, overgang, experimenten, architectuur, verband met RR-theorie, aannames, startkennis, omgeving/input*.

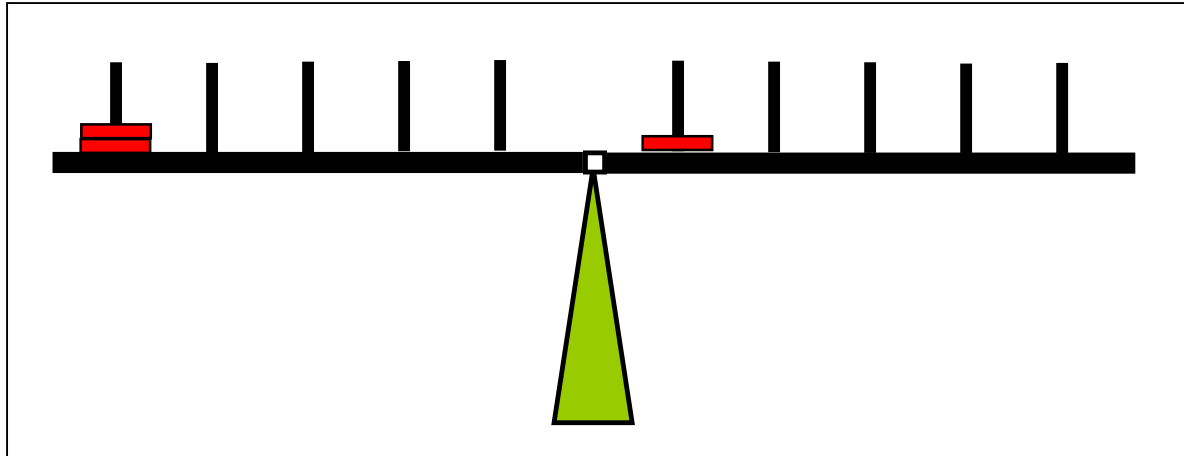
2 De connectionistische modellen

In deze paragraaf komen de volgende modellen aan bod:

- Het connectionistische model van de Balance Scale Task (BST) van McClelland (1995).
- Een aantal modellen van Shultz et al. (1995), die gebruik maken van *cascade-correlation*.

2.1 Het connectionistische model van de Balance Scale Task (BST)

McClelland wil met dit model laten zien dat je ook met connectionistische uitgangspunten een model van de BST kunt maken (McClelland 1995). De BST houdt kort gezegd het volgende in. Personen worden geconfronteerd met een weegschaal met twee armen. Op iedere arm zijn vijf plekken waarop één tot vijf gewichten geplaatst kunnen worden (zie figuur 3). De weegschaal heeft een bepaalde verdeling van gewichten, maar wordt ondersteund door een balkje. De taak van de proefpersoon is te voorspellen welke arm van de weegschaal naar beneden zal buigen als het balkje wordt weggehaald. Siegler (1981) heeft kinderen van verschillende leeftijdsgroepen onderzocht en kwam op grond daarvan tot vier verschillende regels die kinderen hiervoor hanteren. Naarmate ze ouder worden doorlopen ze deze regels (zeer globaal gezien) van 1 t/m 4.



Figuur 3: De balansschaal

Bij de eerste regels wordt voornamelijk het totale gewicht op beide armen in ogenschouw genomen. Bij latere regels wordt echter de afstand tot het draaipunt ook steeds belangrijker.

Aannames:

1. Kinderen hebben in de loop van hun leven vaker voorbeelden gezien van balanssituaties, waarin de beide objecten op dezelfde afstand van het draaipunt zitten.
2. Kinderen gebruiken de informatie over gewicht en afstand in twee stappen: ze coderen de informatie en gebruiken vervolgens de gecodeerde informatie om een voorspelling te kunnen doen.
3. In de BST zijn gewicht en afstand de dimensies van belang. Kinderen letten eerst meer op de dimensie gewicht. Dit is wellicht veroorzaakt door hun eerdere ervaringen of doordat de gewichten de meer opvallende, discrete elementen van de balansschaal zijn.

Architectuur: Het is uitgangspunt is een standaard neurale netwerk. Er is een verborgen laag, om de twee stappen uit aanname 2 te vangen. Aanname 3 leidt ertoe dat in de verborgen laag twee aparte modules zijn aangebracht, één voor gewicht en één voor afstand.

Startkennis: Het model begint met geen enkele startkennis, want de gewichten zijn aan het begin random. Wel zit in de lay-out van het netwerk een soort *bias* voor wat er gaat gebeuren, vanwege de vormgeving van de verborgen laag.

Omgeving/input: Tijdens de trainingsperiode worden meer inputvoorbeelden gegeven, waarbij de gewichten op dezelfde afstand van het draaipunt zitten. Dit is een gevolg van aanname 1.

Experimenten: McClelland vergelijkt de uitkomsten met de prestaties van menselijke proefpersonen en constateert dat zijn model globaal genomen hetzelfde doet. Wat echter wel fout gaat, is dat mensen onderscheid maken tussen een symetrisch voorbeeld en een asymetrisch voorbeeld. Het model kan dit (abstractere) onderscheid niet maken.

Simulatie: Het model heeft steeds een trainingsperiode waarin het honderd keer de taak moet uitvoeren en feedback krijgt over de juiste oplossing. Deze periode wordt telkens gevolgd door een testfase.

Overgang: Uit de resultaten op de testfases blijkt, dat de overgangen in regels die Siegler voor de BST heeft beschreven, ook door het model worden gemaakt. De overgang van regel 3 naar regel 4 gaat echter nauwelijks goed. Het model blijft heen en weer springen tussen regel 3 en regel 4, in plaats van redelijk stabiel regel 4 toe te gaan passen. Als je de regels vergelijkt met de menselijke prestaties en de prestaties van het model, dan blijkt dat mensen zich ook niet altijd volgens de regels van Siegler gedragen, maar er ook niet zo veel van afwijken als het model soms doet.

Verband met RR-theorie: McClelland geeft aan dat wat we bij de kinderen zien een mix is van het expliciete gebruik van regels en een meer impliciete strategie, gebaseerd op activiteiten. Ook merkt hij op dat er verschillen zijn tussen de antwoorden die proefpersonen geven en hun verklaringen. Het lijkt er sterk op dat juist de RR-theorie in deze kwesties meer inzicht kan geven.

2.2 De cascade-correlation modellen

Shultz et al. (1995) beschrijven in hun hoofdstuk een aantal modellen, die allen volgens het *cascade-correlation*-mechanisme werken. Om dit literatuuronderzoek niet te uitgebreid te laten worden, zal ik me in deze bespreking echter beperken tot het model wat zij van de BST hebben gemaakt. Dit is namelijk een model, waarin de overgang van impliciete naar expliciete representaties een grotere rol speelt. Het model kent twee varianten: het *Environmental Bias Model* (EBM) en het *Prestructured Weight Dimension Model* (PWDM).

Aannames:

1. Kinderen hebben in de loop van hun leven vaker voorbeelden gezien van balanssituaties, waarin de beide objecten op dezelfde afstand van het draaipunt zitten.
2. De omgeving van het kind verandert langzaam. Het kind wordt in de loop van de tijd blootgesteld aan meer en meer (verschillende) voorbeelden van het optillen en vasthouden van objecten.

Architectuur: Ook dit model is gebaseerd op een gewoon neurale netwerk, waarbij echter wel iets bijzonders aan de hand is. Het cascade-correlation-mechanisme zorgt er namelijk voor dat er nieuwe verborgen units aan het netwerk kunnen worden toegevoegd, tijdens het leren. Iedere nieuwe unit krijgt input van alle eerder toegevoegde verborgen units.

Startkennis:

- **EBM:** Deze variant begint met random gewichten tussen de units.
- **PWDM:** De gewichten zijn al in een bepaald deel van de "gewichtenruimte" geplaatst, waardoor het model bevooroordeeld is en meer op het aspect gewicht gaat letten.

Omgeving/input:

- **EBM:** Op grond van aanname 1 krijgt het model in de trainingsperiode meer voorbeelden waarbij de gewichten op dezelfde afstand van het draaipunt zitten. Aanname 2 heeft tot gevolg dat er langzaam aan nieuwe patronen worden aangeboden om van te *leren* (*expansion training*).
- **PWDM:** De gewichtspatronen zijn na pre-training al getraind op het letten op het aspect gewicht. Tijdens de werkelijke trainingsperiodes van het experiment krijgt het model gewoon random alle soorten van balance beam voorbeelden voorgeschoteld.

Experimenten: De prestaties van het modellen worden vergeleken met de regels van Siegler en ook met wat kinderen zelf doen.

Simulatie: Ook nu worden weer trainingssessies afgewisseld met testsessies. Ook worden er van beide varianten meerdere instanties getraind, alsof je dus een groep proefpersonen hebt.

Overgang: De overgangen van de ene naar de andere regel ontstaan inderdaad in de loop van de testsessies. De manier waarop de overgangen gaan, lijkt globaal erg op die van mensen, maar heeft wel wat afwijkingen van het patroon van mensen.

Verband met RR-theorie: Volgens Shultz et al. is er in de laatste fase van het veranderingsproces (regel 4) niet persé sprake van expliciete kennis van de onderliggende regel. Voldoende ervaring met het probleemdomain kan deze competentie al laten ontstaan. Vanuit de RR-theorie zou je echter verwachten dat de representaties die de kinderen in de loop van de tijd gebruiken, steeds explicieter worden en dat er dus uiteindelijk wel een vrij expliciete kennis is ontstaan van de onderliggende wetmatigheid. Een overeenkomst tussen de benadering van Shultz et al. en de RR-theorie, is dat beiden bij de overgangen kwalitatieve veranderingen in

gedrag verwachten, maar ook interne kwalitatieve veranderingen. Bij het model van Shultz et al. verschijnen er nieuwe verborgen units. Bij de RR-theorie veranderen de representaties van vorm.

3 Symbolische en hybride modellen

In deze paragraaf is het de beurt aan de symbolische en hybride modellen. De volgende modellen heb ik geselecteerd voor nadere beschouwing:

- Het TRIMM van Halford et al. (1995).
- De Structure-Mapping-Engine (SME) van Gentner et al. (1995).
- Q-SOAR van Simon en Klahr (1995).
- Het ACT-R model van het leren van verleden tijden, gemaakt door Taatgen en Anderson (2002).
- Het ACT-R model van de Balance Scale Task (BST), gemaakt door Van Rijn et al. (in press).

3.1 Een meer gedetailleerde analyse van de representaties

Mijn model van de RR-theorie is gemaakt in ACT-R, een hybride architectuur. Vandaar dat de modellen in deze paragraaf extra aandacht verdienen. Deze modellen beschouw ik niet alleen op de eerder aangegeven hoofdpunten, maar ik wil ook meer ingaan op de details van de implementatie. Met name is het interessant hoe de representaties van de aanwezige kennis zijn geïmplementeerd in de modellen en hoe de verandering van de representaties tot stand is gekomen.

3.2 Het TRIMM

TRIMM staat voor Transitive Inference Mapping Model. Het model simuleert het aanleren van een subvaardigheid van redeneren, namelijk transitiviteit. Transitiviteit houdt formeel de regel in dat als er een relatie is tussen a en b (aRb) en ook tussen b en c (bRc) dan geldt aRc . Dit gaat op als je het hebt over meetbare eigenschappen, zoals gewicht, lengte en afstand. Natuurlijk zijn er ook heel veel relaties waarvoor transitiviteit niet opgaat. Het TRIMM is gebaseerd op productieregels. Het is geschreven in de taal PRISM II. Deze taal is gebaseerd op de ACT*-architectuur (een voorloper van ACT-R).

Aannames:

1. De benodigde operatoren zijn geleerd door manipulatie-ervaringen. Ze zijn opgeslagen, samen met hun begin- en eindsituatie in het lange termijn geheugen.
2. Ook het volgorde-concept is bekend, dankzij ervaringen. Het wordt in het lange termijn geheugen opgeslagen door middel van lijsten van minimaal drie elementen.

Architectuur: Het model is gemaakt in PRISM II. Dit betekent dat er veel overeenkomsten zijn met de ACT*-architectuur, maar in PRISM II kunnen meer dingen aangepast worden door de programmeur. Hieruit volgt dat dit model minder sterk kan bogen op sturing van een architectuur van cognitie. De belangrijkste overeenkomst met ACT* is de manier waarop productieregels sterker worden. Als de oude productieregels niet genoeg voldoen in een bepaalde situatie, dan ontstaan er nieuwe productieregels met behulp van metacognitieve analogie-redeneringen.

Startkennis: Het model begint met een aantal productieregels in het geheugen, die algemeen van aard zijn.

Omgeving/input: De input van het model bestaat uit drie of vier premissen. Bij de drie premissen, zijn de relaties aansluitend ($a > b$, $b > c$, $a > c$) of niet-aansluitend ($a < b$, $a < c$, $b < c$). Bij de vier premissen, zijn de relaties altijd aansluitend, want het verwerken van vier niet-aansluitende premissen kunnen mensen niet zonder externe hulpmiddelen.

Experimenten: Tijdens het ontwerpen van het model, hebben de onderzoekers zich laten leiden door een enorme berg resultaten van experimenten. Om het model te checken, hebben ze echter achteraf ook nog zeven experimenten gedaan, die ze vergeleken met modeluitkomsten.

Simulatie: Het model is in feite een simulatie van hoe kinderen over de jaren heen steeds beter worden in het begrijpen van transitiviteit.

Overgang: Als mapping op het relationele niveau wordt aangeroepen, dan gebruikt het model strategieën die de aangeboden premissen niet integreren. Als mapping op het systeemniveau wordt aangeroepen, dan gebruikt het model strategieën die wel de aangeboden premissen integreren. In het begin van de ontwikkeling gebruikt het model associatief de meest geschikte productieregel. Het model heeft dan moeite met taken waarin integratie van de premissen nodig was geweest, omdat het daar nog geen geschikte productieregel voor heeft. Later in de ontwikkeling leert het model deze integratie wel voor elkaar te krijgen als dat nodig is. De overgang wordt bewerkstelligd doordat er dankzij een metacognitief analogieproces nieuwe productieregels ontstaan. Er ontstaan ook foute nieuwe productieregels, maar die worden steeds minder sterk en verdwijnen, waardoor ze weer ruimte maken voor nieuwe productieregels.

Verband met RR-theorie: Het TRIMM simuleert eigenlijk de volgende gang van zaken: Op een associatieve manier wordt reeds opgedane kennis gebruikt door productieregels. Als er geen geschikte productieregels aanwezig zijn, treedt een moeizaam en veel capaciteit vragend proces in werking, dat metacognitieve kennis produceert. Op grond van deze metacognitieve kennis kunnen nieuwe productieregels ontstaan, als dat nodig is. Als de metacognitieve kennis is gevangen in de productieregels, is het begrijpen van deze kennis niet meer nodig. Deze proceduralisatie is een heel andere voorstelling van zaken dan de RR-theorie doet. Het kan echter best zijn dat ook in het RR-proces een dergelijke proceduralisatie plaatsvindt.

Implementatie van veranderende representaties: De representaties veranderen in dit model, doordat de bestaande productieregels worden gespecialiseerd. De meer specialistische productieregels die succes hebben, blijven bestaan en worden sterker, terwijl nieuwe productieregels die geen succes hebben langzaam verdwijnen. De validiteit van een strategie wordt bepaald door een analogie-trek-proces waarbij de strategie-output wordt vergeleken met de geordende lijst in het lange termijn geheugen. Het model heeft dus geen abstract begrip van volgorde in het geheugen, maar kan wel op grond van het analogie-trek-proces handelen alsof het dat wel heeft.

3.3 Q-SOAR

Q-SOAR leert *number conservation*, oftewel het model leert dat er manipulaties zijn op een groep objecten die de hoeveelheid objecten niet veranderen.

Aannames:

1. Jonge kinderen kunnen conservatievraagstukken eerder oplossen als het om discrete objecten gaat. Pas daarna leren ze het ook voor continue hoeveelheden.
2. Jonge kinderen nemen aan dat de numerieke waarde van een rij objecten niet verandert, als er niets met de rij gebeurt.
3. Jonge kinderen nemen aan dat de numerieke waarde van een rij objecten waarschijnlijk wel verandert, als de rij duidelijk zichtbaar wordt getransformeerd door de onderzoeker.
4. Vierjarigen weten dat ze er door middel van meten achter kunnen komen op aanname 3 geldt bij een bepaalde transformatie.
5. Driejarige kinderen zullen niet zelf tot meten overgaan in het algemeen. Ze gaan wel over tot meten als ze geconfronteerd worden met twee tegenstrijdige bewijzen.
6. Zowel de driejarigen als de vierjarigen hebben de capaciteit om de waarden van voor en na de transformatie op te slaan en weer op te halen, maar alleen vierjarigen doen dit systematisch.

Architectuur: Q-SOAR is gemaakt in de SOAR-architectuur. Dit is een symbolische architectuur. Er is één leermechanisme en dat is *chunking*. Dit mechanisme zorgt ervoor dat er een verschuiving optreedt van bewuste, expliciete verwerking naar meer automatische, impliciete verwerking. Het feit dat dit model is ontwikkeld in een cognitieve architectuur, heeft een hoop voordelen. Omdat de architectuur meer beperkingen met zich meebrengt, worden de stappen van het model wel psychologisch plausibeler. Ook is zo'n model makkelijker te vergelijken met en te integreren in andere modellen die in dezelfde architectuur zijn gemaakt, waardoor meer eenheid nagestreefd kan worden (Simon en Halford, 1995).

Startkennis:

1. Kinderen van drie en vier jaar kunnen de hoeveelheid bepalen van een groep objecten, die niet groter is dan vier objecten. Dit doen ze door middel van subitizing. Ze zien de hoeveelheid dus in één oogopslag.
2. Jonge kinderen kunnen grotere hoeveelheden tellen. Kinderen jonger dan vier jaar zullen tellen echter niet spontaan gebruiken als een methode om kwalitatieve problemen op te lossen.
3. Kinderen die nog geen conservatiekennis hebben, kunnen toch conservatievraagstukken beantwoorden, als ze maar een specifieke kwantitatieve waarde kunnen bepalen voor de objecten.
4. Kinderen die nog geen conservatiekennis hebben, kunnen geen correcte antwoorden geven op conservatievraagstukken, als ze geen specifieke kwantitatieve waarde kunnen bepalen voor de objecten.

Omgeving/input: De driejarigen hebben in het begin andere kennis en andere strategieën dan de vierjarigen. Dit betekent dat ervaring met de omgeving in de loop van het tussenliggende levensjaar kennelijk deze veranderingen met zich meebrengt. De input tijdens het trainingsexperiment is voor beide leeftijdsgroepen wel precies identiek.

Experimenten: Het model is een simulatie van een specifiek experiment dat uitgevoerd is door Gelman in 1982 (geciteerd in Simon en Klahr 1995). Het is een trainingsexperiment, waaraan driejarige en vierjarige kinderen deelnamen. Er waren twee soorten controlegroepen.

Simulatie: Er is een apart model gemaakt dat het leren van de driejarigen simuleert (Q-SOAR-3) en één dat de vierjarigen simuleert (Q-SOAR-4).

Overgang: Zowel de driejarigen als de vierjarigen leren tijdens het experiment, maar bereiken andere niveaus. Ze maken dus niet dezelfde overgangen. Voor de drie- en vierjarigen geldt verschillende beginkennis. Ze gebruiken ook verschillende strategieën. Helaas is dit model niet zo opgezet, dat het ook aangeeft hoe de ontwikkeling van driejarige naar vierjarige gaat, wat betreft de beginkennis en strategieën.

Verband met RR-theorie: In *Beyond modularity* gaat Karmiloff-Smith ook in op het leren van *number conservation*. Vanuit de RR-theorie is het echter vooral interessant hoe kinderen de ontwikkeling doormaken van juiste antwoorden geven op conservatievraagstukken naar dit kunnen doen zonder te tellen en met het geven van de juiste verklaring. Tollefsrud-Anderson et al. (geciteerd in Karmiloff-Smith, 1992) hebben een experiment gedaan, waaruit bleek dat kinderen de volgende ontwikkeling doormaken: ze geven op een gegeven moment juiste antwoorden op vraagstukken over conservatie, maar blijken wel een lange reactietijd te hebben, omdat ze de elementen natellen. Later worden hun reactietijden sneller, omdat tellen niet meer nodig is, maar ze kunnen geen verklaring geven voor hun antwoorden. Pas weer later in de ontwikkeling kunnen ze die verklaring wel geven. Deze ontwikkeling past natuurlijk mooi in de RR-theorie. Het Q-SOAR model is dus minder veelzeggend voor de RR-theorie, want de uiteindelijk geleerde vaardigheid bevindt zich nog maar op het I-niveau.

Implementatie van veranderende representaties: In Q-SOAR ontstaan nieuwe regels altijd naar aanleiding van een impasse. Als Q-SOAR geen bestaande productieregel kan toepassen, ontstaat er een impasse en gaat het model proberen door middel van het stellen van subgoals een oplossing te vinden voor die impasse. Als de oplossing gevonden is, dan vindt chunking plaats. De nieuw opgedane kennis wordt opgeslagen in het geheugen voor later hergebruik. Hierbij wordt de kennis wel algemener gemaakt, zodat de nieuwe chunk in meer situaties bruikbaar is. Op deze manier krijgt Q-SOAR ook conservatiekennis, want hij past chunking toe op voorbeelden, waarbij van twee onder elkaar liggende rijen met evenveel objecten de ene rij wordt uitgerekt.

3.4 Het ACT-R model van het leren van verleden tijden

Dit model werd uitgebreid besproken in hoofdstuk 2B: *Generalisatie door specialisatie*. In dit hoofdstuk mag het model echter niet ontbreken, omdat het sterk verband houdt met de RR-theorie en met de door mij geselecteerde experimenten van Karmiloff-Smith. Het model simuleert hoe kinderen leren correcte verledentijdsvormen te produceren in het Engels (Taatgen & Anderson, 2002).

Aannames:

1. Het model begint bij het verwerken van een verleden tijd met de stam van het woord. Hoe deze is afgeleid, is niet onderdeel van het model.
2. Bij het leren van verleden tijden wordt niet alleen geleerd tijdens het horen van verleden tijden, maar ook tijdens het zelf produceren van verleden tijden.

Architectuur: Het model is gemaakt in ACT-R, een hybride architectuur. Deze architectuur is, net als SOAR, breed inzetbaar en zorgt ervoor dat de modellen meer psychologisch plausibel zijn, omdat ze binnen een bredere theorie van cognitie vallen (Simon en Halford, 1995).

Startkennis: Het model heeft al een paar strategieën om de verleden tijd te maken van een aangeboden woord:

- Probeer de verleden tijd op te halen uit het geheugen.
- Maak gebruik van analogie: haal een willekeurige verleden tijd op uit het geheugen en probeer op dezelfde manier de verleden tijd van het huidige woord te vormen.
- Neem gewoon de stam van het huidige woord als verleden tijd.

Omgeving/input: In andere modellen van het leren van verleden tijden, wordt vaak uitgegaan van één of meerdere van de volgende onrealistische aannames:

- Een plotselinge sprong in vocabulaire.
- Een hoge frequentie van regelmatige werkwoorden in de input
- Dat kinderen telkens feedback krijgen op het al dan niet goede verledentijdsvormen.

Dit model heeft deze onrealistische aannames niet nodig.

Experimenten: De voorspellingen van het model worden vergeleken met de een langlopend onderzoek van Marcus et al. (geciteerd in Taatgen en Anderson, 2002). De data van twee kinderen worden met de data van het model vergeleken.

Simulatie: Het model simuleert het aanleren van verleden tijden over een periode van een aantal jaren.

Overgang: Uit onderzoek blijkt, dat het leren van verleden tijden U-vormige leercurves met zich meebrengt, tenminste op microniveau. Eerst gebruiken kinderen de juiste verleden tijden van sterke werkwoorden, maar als ze wat ouder zijn ontstaat er overregularisatie. Weer later neemt deze af en hebben kinderen het produceren van goede verleden tijden helemaal onder de knie. Ze kunnen ook de verleden tijd geven van nieuwe, of verzonnen, werkwoorden. Deze overgangen zie je terug in het model, dankzij het ontstaan van een nieuwe productieregel, die steeds sterker wordt. De regel die gewoon de verleden tijd direct uit het declaratieve geheugen probeert te halen, verdwijnt echter niet en zal uiteindelijk voor sterke werkwoorden de meest gebruikte zijn.

Verband met RR-theorie: Het proces dat het model doorloopt om de verleden tijd te leren, heeft veel raakvlakken met experimenten binnen de RR-theorie. Het model begint op het *behavioral mastery* niveau, maar leert verder. De impliciete kennis, die het model uit de voorbeelden haalt, wordt omgezet in een productieregel, die de regel voor regelmatige werkwoorden representeert. Deze regel wordt eerst te veel toegepast, maar later heeft het model een evenwicht bereikt tussen de regel en de uitzonderingen. Bij veel RR-experimenten zien we een vergelijkbare ontwikkeling.

Implementatie van veranderende representaties: Het simuleren van het veranderen van representaties wordt bewerkstelligd door het productiecompilatiemechanisme dat in ACT-R ingebakken zit. In twee productieregels zit een algemenere analogiestrategie, die vaak wordt gebruikt. Als deze twee productieregels een bepaald aantal keer met succes zijn gebruikt, zijn ze zo sterk, dat ze voor specialisatie in aanmerking komen. Er ontstaat een nieuwe productieregel, die "afstamt" van de twee oude, maar gespecialiseerder is, omdat er geen voorbeeld meer wordt opgezocht in het declaratieve geheugen, waarop een analogieproces wordt uitgeoefend. In plaats daarvan implementeert de regel direct het gevolg van het analogieproces. In dit geval is dat *-ed* achter de stam van het woord plakken.

3.5 Het ACT-R model van de Balance Scale Task (BST)

Van de BST is ook een ACT-R model gemaakt (Van Rijn et al., in press). Van Rijn et al. hebben eigenlijk twee ACT-R modellen gemaakt, maar voor dit literatuuronderzoek heb ik slechts één van deze twee bestudeerd, namelijk het model dat niet met feedback werkt. Dit model simuleert in detail de overgang tussen Siegler's regel 1 en regel 2 (Siegler, 1981).

Aannames:

1. Als kinderen geconfronteerd worden met een item uit de BST, zullen ze beginnen met het zoeken naar een ongelijkheid.
2. De voorkeur voor de dimensie gewicht kan worden gemodelleerd door extra activatie van de chunk die de dimensie gewicht representeert.
3. In de experimentele taak van Jansen en Van der Maas (zie **experimenten**) wordt de mate waarin de dimensie afstand opvalt, gemanipuleerd. Deze manipulatie wordt in het model weergegeven door een extra component in de chunk-activatie-formule.

Architectuur: Het model is gemaakt in ACT-R, versie 5.0. Het maakt dus gebruik van de nieuwste manier om nieuwe productieregels te leren. Het model leert zonder feedback. De balance scale items worden aangeboden en het model geeft telkens een antwoord, maar het krijgt niet te horen of dat antwoord juist was.

Startkennis: Het model begint zonder enige specifieke productieregels voor de BST. Er zijn slechts algemene productieregels aanwezig, die declaratieve representaties interpreteren. Ook is er een productieregel die een antwoord kan produceren, bijvoorbeeld een gok. Er zijn een aantal declaratieve actiechunks aanwezig:

- Als er een antwoord gegeven moet worden op een verschilprobleem, probeer dan een nog niet gebruikt aspect op te halen om het probleem op te lossen.
- Als je een aspect hebt geselecteerd, probeer dan de bijbehorende waardes op te halen.
- Als de opgehaalde waardes gelijk zijn, begin dan opnieuw.
- Als de opgehaalde waardes ongelijk zijn, baseer dan je antwoord op het gevonden verschil.

Omgeving/input: De input voor het model bestaat uit random balance scale items. Andere computationele benaderingen (bijvoorbeeld McClelland, zie paragraaf 2.1) zorgden ervoor dat er in de input meer items zaten, waarbij alleen letten op gewicht genoeg was, maar in bij dit model was dat dus niet zo. Aanname 2 zorgt ervoor dat er toch een voorkeur voor de dimensie gewicht is aan het begin. Een ander punt dat met de omgeving te maken heeft, is de manier waarop mensen regel 4 van Siegler aanleren (de regel, waarbij gewicht en afstand worden vermenigvuldigd). Van

Rijn et al. beweren dat deze regel meestal alleen door directe instructie kan worden aangeleerd en niet op een natuurlijke wijze ontstaat. Om de overgang van regel 3 naar regel 4 te kunnen modelleren, moet dus een instructie-omgeving worden verondersteld.

Experimenten: Bij het maken van het model laten Van Rijn et al. zich leiden door een aantal empirische verschijnselen. Hierbij horen de door Siegler opgestelde regels. Ook maken ze gebruik van de uitkomsten van een specifiek experiment dat Siegler en Chen in 1998 uitvoerden (geciteerd in Van Rijn et al., in press). Van Rijn et al. stellen aan de hand van die empirische verschijnselen vier empirische criteria op waar hun model aan moet voldoen:

1. Het gedrag van het model moet te classificeren zijn in de regels van Siegler. Hierbij moet het model ook de overgang van de ene naar de andere regel kunnen verklaren.
2. Alle regels van Siegler moeten een onderdeel van het model vormen, ook de later door andere onderzoekers gevonden optelregel. De regels moeten in een vaste volgorde verschijnen, onafhankelijk van de inputvolgorde. Regel 4 moet niet gebaseerd zijn op een benadering van vermenigvuldigen, maar op vermenigvuldigen zelf.
3. Het model moet de transities kunnen maken, zonder feedback te krijgen. Ook moet het model de bevindingen van het experiment van Jansen en Van der Maas (zie verderop) kunnen repliceren.
4. Als er een groot verschil is tussen het product van afstand en gewicht op de ene arm en hetzelfde product op de andere arm, treedt het *Torque Difference Effect* op. Bij een kleiner verschil treedt dit effect niet op. Het model moet kunnen verklaren waarom dat zo is. Het *Torque Difference Effect* (TDE) houdt het volgende in: als bij een bepaald item een groot verschil tussen de producten van afstand en gewicht optreedt, dan neemt de kans toe op het gebruik van een geavanceerdere regel.

Het model wordt als het eenmaal is ontwikkeld getest op deze vier criteria. Daarnaast wordt een specifiek experiment van Jansen en Van der Maas (geciteerd in Van Rijn et al., in press) gesimuleerd. In dit experiment worden items in een zodanige volgorde aangeboden, dat het verschil tussen de twee waarden op de dimensie afstand eerst steeds toeneemt en later steeds af.

Simulatie en overgang: Het model simuleert de overgang van regel 1 naar regel 2. Daarnaast simuleert het, na het verwerken van aanname 3 in het model, ook de precieze resultaten van het experiment van Jansen en Van der Maas. Omdat dergelijke precieze informatie niet voor handen is voor de andere overgangen tussen de regels, worden die overgangen niet gemodelleerd. Wel stellen de onderzoekers dat als dergelijke informatie wel beschikbaar zou zijn, het model deze overgangen waarschijnlijk ook zonder problemen zou kunnen simuleren.

Verband met RR-theorie: Er is een duidelijke verbinding te maken met het blokkenexperiment van Karmiloff-Smith (1974/75). Hierbij gaat het immers om een zelfde soort taak. Het interessante is dat bij de taak van Karmiloff-Smith een omgekeerd proces plaatsvindt. Juist de dimensie afstand wordt eerst alleen in acht genomen en pas later in de ontwikkeling wordt ook de dimensie gewicht erbij betrokken (Simon en Halford, 1995). De manier waarop het bepalen van de relevante dimensies geregeld is in dit ACT-R model van de BST is daarom waarschijnlijk goed te gebruiken voor een ACT-R model van het blokkenexperiment van Karmiloff-Smith.

Implementatie van veranderende representaties: Van Rijn et al. gebruiken het productiecompilatiemechanisme om de overgang van regel I naar regel II te simuleren.

4 Gevolgen voor de te ontwikkelen cognitieve modellen

Nu we gezien hebben, hoe een aantal andere computationele modellen van verandering in elkaar zitten, rijst natuurlijk de vraag: Wat hebben we daar nu aan? Wat zijn de gevolgen van deze modellen voor mijn RR-modellen? Het blijkt wel, dat er uiteenlopende manieren zijn om computationele modellen vorm te geven. Ook de manier waarop de modellen gebruik maken van of vergeleken worden met experimentele data is heel verschillend. Hieronder probeer ik een blik

van bovenaf op de modellen te werpen en een overzicht te geven van wat al dan niet goede aspecten van de modellen zijn.

4.1 Sterke en zwakke kanten van de huidige modellen

De steekwoorden, aan de hand waarvan ik de modellen heb geanalyseerd, geven al aan wat ik belangrijk vindt in een computationeel model. Wil je echt wat kunnen zeggen over cognitieve verandering, dan is het belangrijk dat je model de verandering zelf simuleert, op een manier die gebaseerd is op psychologisch aannemelijke uitgangspunten en dat de voorspellingen en resultaten van het model nauw aansluiten bij de resultaten van experimenten met proefpersonen. Naar mijn idee, kunnen lang niet alle besproken modellen deze ideale situatie benaderen. Allemaal proberen ze wel de overgang(-en) zelf te simuleren. Hierbij doen ze vaak allerlei aannames, waarbij het niet duidelijk is of deze aannames plausibel zijn. De resultaten die de modellen opleveren, worden soms nauwgezet vergeleken met een specifiek experimenteel onderzoek (bijvoorbeeld bij Q-SOAR). In andere gevallen vergelijken de onderzoekers het model met algemene uitkomsten uit allerlei bijeengeraapte onderzoeken. Dit laatste heeft als voordeel, dat de uitkomsten meer geaccepteerd zijn in de psychologie. Het nadeel ervan is, dat losse verwijzingen naar hoe mensen het in het algemeen doen, nogal makkelijk te maken zijn. Een ander aspect, dat modellen zwakker kan maken, is de vrijheid die de programmeur soms heeft, als het model niet in het keurslijf van een architectuur zit. Het TRIMM is hier een voorbeeld van. Over de taal waarin het is geschreven, PRISM II, zeggen Simon en Halford het volgende: "*Unlike ACT* and SOAR, PRISM did not aim to constrain accounts of the entire range of phenomena through a common theory.*" (Simon en Halford, 1995, p. 10).

In samenhang met de hiervoor genoemde zaken, die een model niet sterk maken, valt op dat ook de kwestie van de "beginsituatie" een delicate zaak is. Het beginpunt van de simulatie is meestal niet de geboorte, dus het model moet voorzien worden van kennis, die hij (zogenaamd) opgedaan heeft door ervaringen in zijn leven tot nu toe plus eventuele aangeboren kennis. Wat aangeboren kennis inhoudt, is nog altijd een groot debat in de ontwikkelingspsychologie, waar niet één twee drie een overzicht van valt te geven. Op de andere "startkennis", de kennis die is opgedaan door ervaring tot nu toe, wil ik hier wel even wat uitgebreider ingaan. Programmeurs van modellen zouden er niet mee weg mogen komen om maar wat aannames te doen hierover en vervolgens die kennis maar keihard in het model te pompen. Wat voor kennis eerder opgedane ervaringen opleveren, is immers zeer nauw verweven met de manier van interactie met de omgeving en dus ook met de leermechanismen en verwerkingsmechanismen die in het model gebruikt worden. Het is mijns inziens van groot belang, dat de onderzoeker aangeeft, hoe die startkennis er is gekomen en op wat voor manier dat aansluit bij hoe het model tijdens de simulatie bezig gaat met gegevens en de omgeving. Op die manier kun je het startpunt van je model aannemelijk maken en zorg je ervoor dat wat je model voorspelt, ook inderdaad een gevolg is van het mechanisme dat je wilt modelleren en niet van verkeerd vormgegeven startkennis. In de paragraaf hieronder geef ik aan waarom dit laatste juist in het model dat ik wil maken een belangrijke rol speelt.

Als laatste punt van aandacht wil ik hier nog even ingaan op het verschil tussen leren en ontwikkelen en de invloed van trainingsstudies. Leren en ontwikkelen zijn twee begrippen die heel dicht tegen elkaar aanliggen. Ze worden dan ook vaak door elkaar gebruikt. *Ontwikkelen* klinkt een beetje alsof er alleen nog maar dingen ontvouwen hoeven te worden, die al bij geboorte in de persoon aanwezig waren. *Leren* heeft een veel actievere associatie. Door interactie met de omgeving doet de persoon nieuwe kennis op. Computationale modellen van verandering bestuderen zowel leren als ontwikkeling en vaak een soort van mengeling van de twee. Maar dat de twee toch niet als één en hetzelfde proces kunnen worden gezien, blijkt wel uit het model Q-SOAR. Zowel Q-SOAR-3 als Q-SOAR-4 hebben conservatie van aantallen nog niet onder de knie

aan het begin van de simulatie. Tijdens de simulatie krijgen ze één van drie soorten training aangeboden (vergelijkbaar met de experimentele groep en de twee verschillende controlegroepen in het bijbehorende experiment). Bij twee van deze drie soorten training leert Q-SOAR-4 het principe van conservatie van aantallen. Voor Q-SOAR-3 geldt dat alleen de training, zoals de experimentele groep die kreeg, tot het leren van het principe leidt. Zonder de training zal een kind het conservatieprincipe pas later in de ontwikkeling langzaam ontdekken. Q-SOAR modelleert dus niet hoe kinderen tijdens hun normale ontwikkeling achter het principe komen, maar het model simuleert hoe het geleerd wordt, door aanbieding van de juiste training. Op die manier slagen Simon en Klahr erin wel echt een cognitieve overgang te simuleren in hun model, terwijl ze wel met verschillende leeftijdsgroepen werken. Dit voorbeeld illustreert dat het van belang is bij het opzetten van een model rekening te houden met wat je precies wilt modelleren. Zijn de gebruikte experimenten trainingsstudies of alleen maar teststudies, een soort momentopnames? Hieronder komen we in de context van de RR-modellen ook op deze kwestie terug.

4.2 Eisen aan nieuw te ontwikkelen modellen

De keuzes die ik tot nu toe voor de RR-modellen heb gemaakt, zijn de volgende:

- De **architectuur** is ACT-R.
- De **experimenten** die ik wil simuleren zijn het playrooms-experiment en het blokkenexperiment.

Als eerste wil ik een model maken van het playrooms-experiment. Hierop zal ik dan ook deze paragraaf toespitsen. In dit experiment zijn kinderen van verschillende leeftijdsgroepen met elkaar vergeleken. Om de veranderingen zelf te simuleren in het model, is het niet genoeg om voor iedere leeftijdsgroep een ander model te maken. Het model zal juist een periode van meerdere jaren moeten simuleren, waarin de overgangen tussen de niveaus tijdens de simulatie worden bewerkstelligd. Het playrooms-experiment, dat als uitgangspunt dient, is geen trainingsexperiment, maar meer een testexperiment. De verschillen in prestatie tussen de leeftijdsgroepen geeft de cognitieve verandering weer. Dit betekent dat er een vertaalslag gemaakt moet worden van discrete momentopnames naar een vloeiend geheel.

Het in de vorige paragraaf genoemde probleem van het bepalen van de startkennis hangt hier mee samen. Hoe een kind in een bepaalde leeftijdsgroep reageert tijdens het experiment, is een gevolg van de ervaringen met de omgeving tot dan toe, plus de interne processen tot dan toe. De opgebouwde ervaringen tot dan toe spelen zich buiten het gezichtsveld van het experiment af. Over de interne processen tot dan toe kan men alleen maar hypothesen stellen en alleen datgene wat de hypothesen zeggen over veranderend waarneembaar gedrag, kun je met een experiment aantonen. Dit betekent dat ik bij het modelleren veel aannames moet maken over wat de startkennis is en hoe die startkennis is opgedaan. Ook maak ik vervolgens aannames over de ervaringen die de kinderen in de loop van de gesimuleerde jaren opdoen. Om te zorgen dat mijn model nog wel wat kracht overhoudt, is het van belang deze aannames duidelijk aan te geven. Ook moet het duidelijk zijn waarom de aannames plausibel zijn. De ACT-R architectuur en de RR-theorie bieden beperkende kaders die ervoor moeten zorgen dat mijn aannames niet helemaal uit de lucht komen vallen. In hoofdstuk 3A: *Van RR-theorie naar RR-model* zal ik aangeven, wat in mijn ogen de aannames, de startkennis en de beperkende kaders zijn voor het playrooms-experiment. Op deze plaats ga ik hier dus verder niet op in. In dit literatuuronderzoek heb ik bekeken hoe andere modellen van cognitieve verandering in elkaar zitten. Deze modellen hebben inzicht gegeven in wat de belangrijke aspecten van zo'n model zijn. Bovendien hebben ze aangetoond, dat het essentieel is goed over deze aspecten na te denken – met name over de rol van experimenten, simulatie, architectuur, omgeving en startkennis – en ze vooraf duidelijk in te vullen.

Hoofdstuk 3: Beschrijving eerste model

H⁰ O⁰ π D⁰ S⁰ T U K

3

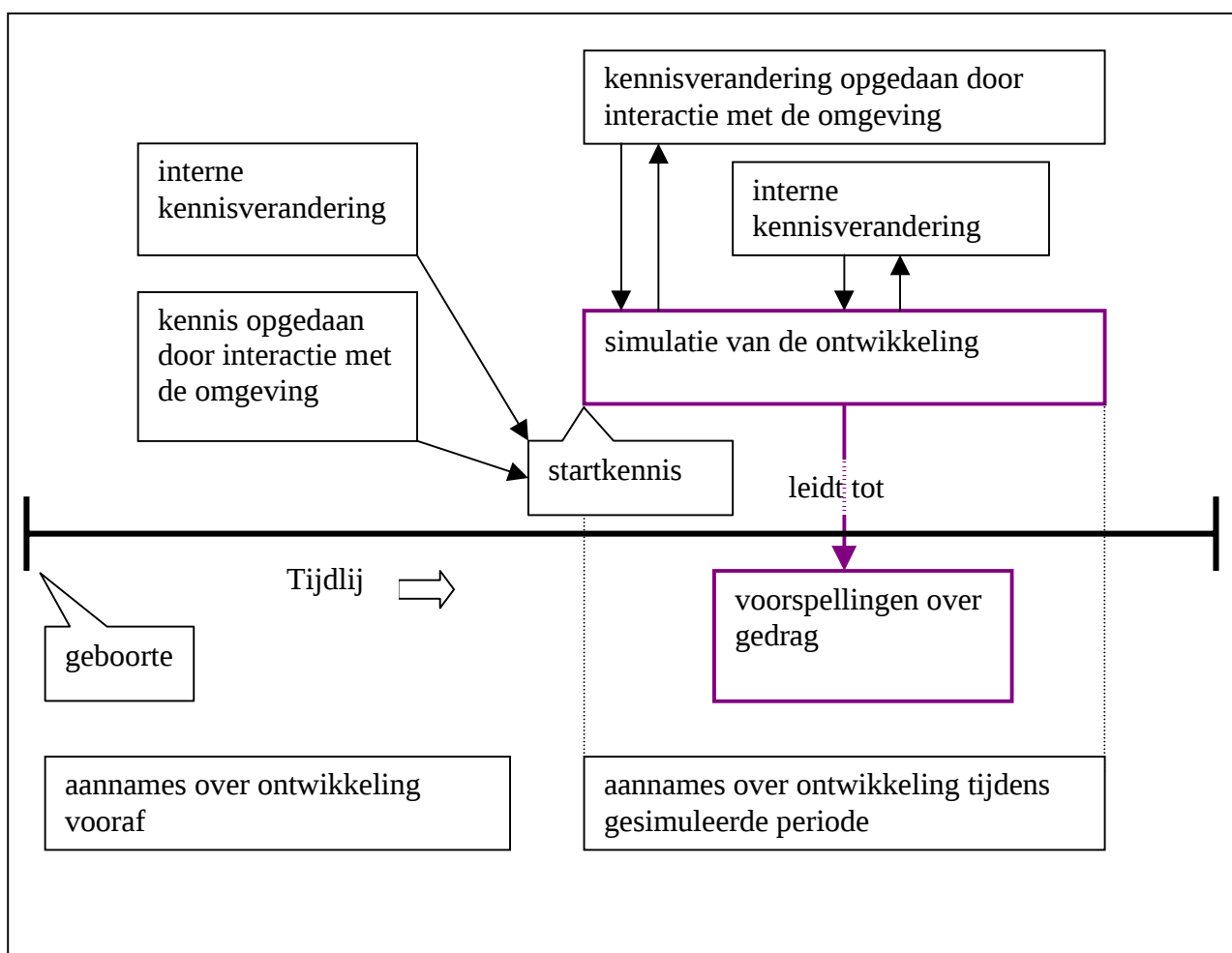
Beschrijving eerste model

3A: Van RR-theorie naar RR-model

1 Inleiding

In het literatuuronderzoek heb ik een aantal aspecten onderscheiden, die van belang zijn bij het maken van computationele modellen van verandering. In dit hoofdstuk wil ik ingaan op de invulling van deze aspecten in een model van het playrooms-experiment, het experiment dat ik als eerste heb gemodelleerd. In figuur 4 heb ik de steekwoorden die gaan over kennisverandering (zie hoofdstuk 2D) in een diagram opgenomen, zodat duidelijker is welke relatie ze met elkaar hebben.

De ontwikkeling die ik heb gemodelleerd, vindt plaats in een tijdsbestek van meerdere jaren. De simulatie begint niet meteen bij de geboorte, maar op driejarige leeftijd. Aan het eind van de simulatie is het model ongeveer elf jaar. Voordat het model drie jaar is, heeft het natuurlijk al



Figuur 4: een simulatiemodel in de tijd en hoe veranderende kennis daarmee interacteert.

een ontwikkeling doorgemaakt, die buiten de simulatie valt. Deze ontwikkeling heeft geleid tot de startkennis van het model op driejarige leeftijd. Omdat deze startkennis essentieel is voor het verloop van de simulatie, is het ook essentieel om de aannames van de ontwikkeling tot dan toe helder gespecificeerd te hebben. Het playrooms-experiment is slechts een testexperiment, waarbij

kinderen van verschillende leeftijden worden getest. Dit betekent dat ook over de tussenliggende ontwikkeling aannames moeten worden gedaan. Tijdens de gesimuleerde periode verandert de kennis van het model door interne en externe factoren. De mechanismes die in het model zijn geïmplementeerd, vormen een hypothese over hoe de cognitieve veranderingen tot stand komen. Deze mechanismes werken met de kennis die op een bepaald moment in het model zit. Dat is natuurlijk eerst de startkennis, maar later ook de kennis, die ondertussen weer door ervaring is opgedaan. Daarnaast werken deze mechanismes ook met kennis, die dankzij de werking van deze mechanismes zelf is ontstaan (interne kennisverandering). De pijlen lopen niet alleen van de ervaringskennis en de interne kennis naar de simulatie, maar ook andersom. Immers, de mechanismes van de simulatie doen nieuwe kennis ontstaan. Het lijkt misschien raar dat het tekstvak "interne kennisverandering" buiten de simulatie zelf staat. Ik bedoel hiermee dat de verandering als resultaat van de mechanismen in het model, maar een onderdeel is van alle interne kennisveranderingen, die op dat moment plaatsvinden. Er is wel een sterke interactie met al die interne kennisveranderingen. Dit alles klinkt nu nog erg abstract. Als ik het toepas op het specifieke geval van het leren van de betekenis van lidwoorden (het onderwerp van het playrooms-experiment) wordt het hopelijk duidelijker.

2 Analyse vooraf van het determinatorenmodel

In deze paragraaf zal ik mijn model onderwerpen aan dezelfde analyse als in het literatuuronderzoek (zie hoofdstuk 2D). Aangezien het model nog geen naam heeft, geef ik het de titel *determinatorenmodel*. Het gaat namelijk over de verwerking van lidwoorden en telwoorden en dit soort woorden vallen in de taalkunde onder de klasse van de *determinatoren*. Ik begin met de aspecten, die wel aan vastliggen of makkelijk vast te leggen zijn. Vanaf paragraaf 2.5 zal ik ingaan op de psycholinguïstische achtergrond van het gebruik van lidwoorden. We moeten daarover namelijk gedetailleerde kennis hebben, om het model echt vorm te kunnen geven.

2.1 Architectuur en experiment

Deze twee onderdelen waren al snel bepaald. Het model is gemaakt in ACT-R en het experiment waarmee de uitkomsten van het model worden vergeleken is het playrooms-experiment.

2.2 Simulatie en overgang

De bedoeling is dat het model Franstalige kinderen simuleert die leren hoe lidwoorden gebruikt worden. De simulatieperiode is, zoals al eerder gezegd, tussen drie en elf jaar. Op driejarige leeftijd presteren kinderen goed in het playrooms-experiment, dat een begripsexperiment is. Ze kunnen al op de juiste manier bepaalde en onbepaalde lidwoorden gebruiken en de meeste functies van lidwoorden in zinsdelen begrijpen, tenminste zo lijkt het. Als ze elf zijn, gebruiken en begrijpen ze de lidwoorden ook goed, maar nu begrijpen ze de functies van de lidwoorden ook echt. Tussentijds is er een terugval in prestatie als het gaat om het begrijpen van het woord *une*. De kinderen raken verward door de dubbele betekenis van *une* (lidwoord en telwoord). Het is de bedoeling dat het model ook een dergelijke terugval en een vergelijkbaar herstel in prestatie laat zien.

2.3 Aannames, startkennis en omgeving/input

Hier wordt het echt interessant. Laten we eerst eens kijken naar de **startkennis**. Op driejarige leeftijd hebben kinderen (impliciet) weet van hoe je bepaalde en onbepaalde lidwoorden gebruikt, want ze produceren zelf de juiste lidwoorden in de juiste context en begrijpen de manier waarop anderen de lidwoorden gebruiken. Met andere woorden: in dit microdomein zijn ze al op driejarige

leeftijd op het niveau van *behavioral mastery* (Karmiloff-Smith, 1992). Dat is mooi, maar voordat we verder kunnen kijken, moeten we ons wel afvragen hoe de kinderen daar gekomen zijn en hoe ze het produceren en verwerken van lidwoorden dan regelen, als ze drie jaar zijn. Omdat dit niet bij de onderzoeksvraag hoort, zullen we hierover een aanname moeten doen.

Aanname 1: *Driejarige kinderen gebruiken en verwerken lidwoorden goed, omdat ze gebruik maken van opgeslagen voorbeelden waarbij lidwoorden in een bepaalde context werden gebruikt.*

Hoe driejarige kinderen dan gebruik kunnen maken van die voorbeelden, zal ik nog nader aan bod laten komen in hoofdstuk 3. Grofweg zijn er twee mogelijkheden, die wellicht alletwee voorkomen:

- Kinderen zoeken de constructie die ze willen gebruiken – of die ze horen – op in het declaratieve geheugen en vinden hem klaar voor gebruik, omdat ze hem kortgeleden al eens eerder hadden gebruikt of gehoord.
- Kinderen trekken een analogie tussen de constructie die ze willen gebruiken – of die ze horen – en voorbeeldconstructies die ze in het declaratieve geheugen hebben opgeslagen en op die manier kunnen ze de constructie de juiste inhoud geven.

Hoe deze laatste analogieprocedure precies werkt, zullen we ook bekijken in paragraaf 3. In deze subparagraaf kijken we verder naar het gebruik en begrip van het telwoord *une*. Uit het experiment van Karmiloff-Smith komt niet rechtstreeks naar voren of en hoe driejarige kinderen het telwoord *une* kunnen begrijpen en gebruiken. Deze kennis speelt verderop in het experiment echter wel een essentiële rol. Ook hierover zullen we dus weer aannames moeten doen. We gaan ervan uit dat kinderen op driejarige leeftijd nog niet kunnen tellen, maar wel onderscheid tussen enkelvoud en meervoud kunnen maken, tenminste op een impliciete manier.

Aanname 2: *Op driejarige leeftijd kunnen (Franstalige) kinderen het woord *une* gebruiken om het verschil tussen 1 en meer-dan-1 aan te geven. Ze gebruiken en begrijpen *une* dan als een soort enkelvoudsmarkeerder.*

Aanname 3: *Ook bij het begrip en gebruik van de enkelvoudsmarkeerder *une* maken ze gebruik van opgeslagen voorbeelden waarbij *une* in een bepaalde context werd gebruikt.*

Later in de ontwikkeling leren kinderen tellen en zal de enkelvoudsmarkeerder *une* uitgroeien tot het telwoord *une*. Uit de resultaten van Karmiloff-Smith (1979) blijkt dat driejarige kinderen in het playrooms- experiment niet in de war raken van de dubbele betekenis van *une*. Als we aannemen, dat ze wel bekend zijn met *une* als enkelvoudsmarkeerder (aanname 2), dan moeten we dus ook aannemen, dat ze ook al impliciete kennis hebben over wanneer je welke betekenis van *une* moet gebruiken en hoe je een *une* die je hoort moet interpreteren. Dit leidt tot aanname 4.

Aanname 4: *Driejarige kinderen halen de twee betekenissen van *une* niet door elkaar. Dit is een gevolg van het feit, dat ze gebruik maken van opgeslagen voorbeelden, waarbij *une* al in de juiste context staat.*

Je zou dus kunnen zeggen dat ze op een impliciete manier al weten op welke aspecten van de omgeving ze moeten letten. Door het waarnemen van de situatie activeren ze onbewust voorbeelden met een vergelijkbare context.

Bovenstaande aannames maken al wat meer duidelijk over de benodigde startkennis. Veel is echter nog onduidelijk. Wat voor vorm hebben die voorbeelden, die de kinderen gebruiken? Hoe zijn die voorbeelden in het declaratieve geheugen gekomen? Hoe gebruiken de kinderen die voorbeelden? Op deze vragen hoop ik in hoofdstuk 3B een antwoord te vinden. Nu gaan we nog

even verder in op aannames en kennis. Hoe zit het met de input die kinderen vanaf hun geboorte tot hun elfde krijgen aangeboden, als het gaat om lidwoorden?

Aanname 5: *Kinderen verwerken vanaf hun geboorte aangeboden zinsdelen, waarin bepaalde en onbepaalde lidwoorden worden gebruikt. Na een tijdje produceren ze zelf zinsdelen waarin bepaalde en onbepaalde lidwoorden worden gebruikt.*

Een zelfde soort aanname kunnen we doen over de input van het telwoord *une*.

Aanname 6: *Franstalige kinderen verwerken vanaf hun geboorte aangeboden zinsdelen, waarin het telwoord *une* gebruikt wordt. Na een tijdje produceren ze zelf zinsdelen waarin het telwoord voorkomt. De verhouding tussen de hoeveelheid voorbeelden met *une* als lidwoord en *une* als telwoord is niet precies duidelijk. In ieder geval wordt *une* vaker als lidwoord gebruikt, dan als telwoord.*

Aannames 5 en 6 gaan niet alleen op voor driejarige kinderen. Het is juist belangrijk te bedenken dat tijdens de periode die gesimuleerd wordt (drie tot elf jaar) de input van lidwoorden en telwoorden op dezelfde voet doorgaat. De hen aangeboden zinsdelen met lidwoorden en telwoorden zullen meestal grammaticaal correct zijn. Dit hoeft niet op te gaan voor de lidwoorden en telwoorden die de kinderen zelf produceren. Karmiloff-Smith (1979, p. 64-72) heeft ook een playrooms experiment gedaan, waarbij de kinderen lidwoorden moesten produceren in de juiste context. Hieruit bleek dat de de juiste productie van lidwoorden behoorlijk achterblijft bij het juiste begrip. Pas rond de leeftijd van vijf jaar beginnen kinderen het onbepaalde lidwoord met enige regelmaat te gebruiken in een context waarin dat nodig is. Daarvoor gebruiken ze meestal (onterecht) het bepaalde lidwoord. Als ze acht zijn, hebben ze het gebruik van het onbepaalde lidwoord pas echt onder de knie en maken ze nauwelijks nog fouten. Deze informatie is van belang, omdat ik ervan uitga, dat mijn model ook leert tijdens het produceren van zinsdelen met lidwoorden en telwoorden.

Aanname 7: *Zowel het horen en verwerken van zinsdelen met lidwoorden en telwoorden als het zelf produceren van zinsdelen met lidwoorden en telwoorden draagt bij aan het leren over de functie van lidwoorden en telwoorden.*

Hoe dit precies in zijn werk gaat, zal ik nader analyseren in hoofdstuk 3B. In deze paragraaf wil ik graag nog even een globale schets maken van hoe naar mijn idee de simulatie in grote lijnen zal verlopen.

2.4 Veranderende representaties

Het veranderen van de representaties zal in ACT-R moeten gebeuren met behulp van het nieuwe proceduralisatiemechanisme. Dit mechanisme heet ook wel het productiecompilatiemechanisme. Hierbij worden bestaande productieregels samengevoegd tot een nieuwe, gespecialiseerde productieregel (Taatgen en Anderson, 2002; Taatgen, 2000). De inhoudelijke veranderingen die we willen verklaren met het model, zijn de volgende:

- Bij het gebruik van het bepaalde lidwoord – *la X* – kiezen alle kinderen tussen drie en elf jaar in de meeste gevallen voor de ruimte met precies één X. (Dit is dus eigenlijk geen verandering, maar juist iets wat de hele tijd gelijk blijft).
- Bij het gebruik van het onbepaalde lidwoord – *une X* – kiezen de jongste kinderen meestal correct voor de ruimte met meerdere X-en. Naarmate de leeftijd oploopt, neemt de prestatie af en kiezen de kinderen steeds meer voor de ruimte met één X. Vanaf ongeveer zesjarige

leeftijd vertoont de prestatie weer een stijgende lijn en nemen de kinderen weer steeds meer de kamer met meerdere X-en.

In het experiment van Karmiloff-Smith zijn nog meer dingen onderzocht, die interessante resultaten opleverden. We beperken ons echter tot deze twee resultaten, om het niet te ingewikkeld te maken. Het tweede resultaat, de U-vormige curve bij *une* X, is het meest interessante onderdeel van de resultaten. Ik zal hieronder dan ook ingaan op hoe ik die curve wil proberen te laten ontstaan in mijn model. Hiervoor is het essentieel om het zowel vanuit de ACT-R-mechanismen als vanuit de linguïstische kennis over lidwoorden te benaderen.

2.5 Indeling in periodes

De *une*-curve, zoals ik hem voor het gemak maar zal noemen, geeft aanleiding tot het indelen van de ontwikkeling in drie periodes. Net als in het verleden-tijden-model van Taatgen en Anderson (2002), ga ik ervan uit dat de kinderen in eerste instantie gebruik maken van voorbeelden (aannames 1, 3 en 4). Daarna ontwikkelen ze regels die minder in de context ingebakken zijn dan de voorbeelden en die sneller en efficiënter gebruikt kunnen worden dan de voorbeelden. Deze regels zijn eerst nog niet de juiste regels, of de regels zijn nog niet in het juiste evenwicht. Dit zorgt ervoor dat er fouten worden gemaakt. Later in de ontwikkeling verdwijnen deze fouten, omdat de regels nu wel goed zijn en ook in de juiste verhouding tot elkaar staan. Dit uitgangspunt leidt tot de indeling in drie periodes:

- **Periode I: drie tot vijf jaar.** De prestatie van de kinderen bij *une*-items is hoog, maar neemt wel af bij het ouder worden – van 90% correct naar 68% correct. Deze hoge prestatie wordt veroorzaakt doordat de kinderen bij het horen van de zin een vergelijkbaar voorbeeld uit hun geheugen zoeken. Vervolgens gebruiken ze een analogieproces om tot een beeld van de huidige situatie te komen. Dit beeld vergelijken ze met de speelruimte van de meisjespop en de jongenspop en op grond daarvan geven ze hun antwoord. Doordat de voorbeelden rijk aan context zijn, zullen ze in de experimentele situatie niet afgeleid worden door voorbeelden, waarbij *une* als telwoord wordt gebruikt.
- **Periode II: vijf tot acht jaar.** De prestatie van de kinderen is gedaald tot 29% op vijfjarige leeftijd, maar neemt wel weer toe tot 59%. De aanname is dat de prestatie zo drastisch gedaald is, omdat er regels zijn ontstaan, die nog niet goed werken. Karmiloff-Smith concludeert uit haar experiment dat kinderen in deze periode *une* interpreteren als het telwoord *één*.
- **Periode III: acht tot elf jaar.** De prestatie vertoont nu weer een sterk stijgende lijn, van 67% voor de achtjarigen naar 91% voor de tienjarigen. Wellicht komt de stijging doordat de ontstane regels tot nieuwe, betere regels hebben geleid. Een andere optie is dat de regels beter in evenwicht zijn gekomen. In ieder geval weten de kinderen nu wel beide betekenissen van *une* op de goede manier te onderscheiden.

Als je kijkt naar de rol van *une* in deze periodes, dan zie je dat *une* in periode II bijna altijd als telwoord wordt geïnterpreteerd. Hoe je dat modeltechnisch zou kunnen verklaren, zet ik in de volgende subparagraaf uiteen.

2.6 Hoe het ontstaan van regels de overheersing van het telwoord kan verklaren

Rond vijf jaar ontstaan regels over het gebruik van *une*. Er zijn drie manieren waarop je de overheersing van *une* als telwoord zou kunnen verklaren. De eerste verklaring gaat ervan uit dat rond die leeftijd één of meerdere regels ontstaan, die aangeven dat je *une* moet interpreteren als

het telwoord *één*. Ook ontstaan er regels die juist aangeven dat je *une* de betekenis "één van de meerdere" moet geven, de onbepaaldlidwoord-betekenis dus. De telwoordregel overheerst echter de andere regel, omdat de telwoordregel op de één of andere manier sterker is. Tijdens periode II maken beide soorten regels een ontwikkeling door, die ervoor zorgt dat er nieuwe, genuanceerdere regels ontstaan. Deze nieuwe regels gaan een interactie met elkaar aan, maar zullen niet meer directe concurrenten zijn, omdat iedere soort zijn eigen situaties heeft, waarin hij van toepassing is.

Bij de tweede verklaring is het uitgangspunt niet dat de telwoord-regel en de onbepaaldlidwoord-regel tegelijkertijd ontstaan. De telwoordregel ontstaat wel op vijfjarige leeftijd, maar de onbepaaldlidwoord-regel pas aan het begin van periode III. In periode II kan de telwoord-regel het gebruik van voorbeelden makkelijk overvleugelen, omdat het gebruik van voorbeelden een cognitief zwaar analogieproces vereist. De telwoord-regel is echter snel en efficiënt. Er moet in dit geval nog wel een verklaring gegeven worden waarom de ene regel veel later ontstaat dan de andere regel. Een aanname kan zijn dat tellen expliciet wordt geleerd aan kinderen. Dit kan betekenen dat er tijdelijk een grote toename is in het aantal voorbeelden met *une* als telwoord. Hierdoor treedt er bij deze vaardigheid veel sneller proceduralisatie op.

De derde verklaring lijkt erg op de tweede. Ook nu gaan we ervan uit dat de onbepaaldlidwoord-regel pas aan het begin van periode III wordt geleerd. De verklaring is echter anders. De telwoord-regel ontstaat veel sneller, omdat hij veel simpeler is. Als je ergens precies één van hebt, dan geef je dat de waarde *une*. Het gebruik van *une* als lidwoord ligt veel gecompliceerder. Vanuit psycholinguïstische hoek bekeken, heeft *une* vele functies. Hierop komen we later uitgebreid terug. Op dit moment is voornamelijk van belang, dat het ontstaan van de juiste onbepaaldlidwoord-regel dus niet snel kan gebeuren. Het zal eerder een kwestie zijn van het doorlopen van een aantal stadia, waarbij goede en minder goede regels ontstaan, die echter allemaal nog niet alle nuances aankunnen. Pas in periode III is er een set van regels ontstaan, die goed genoeg is om de prestatie uiteindelijk weer op hetzelfde niveau te krijgen als de prestatie van de driejarigen.

Vanuit het modelleren bekeken, zijn deze drie verklaringen niet allemaal even mooi en helder. De tweede verklaring doet bijvoorbeeld een erg sterke aanname over hoe een verandering in de omgeving en dus een verandering in de input ervoor zorgen dat de telwoordregel eerder ontstaat. Deze aanname laat weinig kracht over voor het model en is bovendien in strijd met aanname 6, waarin wordt gesteld dat – voor mensen van alle leeftijden – in een normale taalcontext *une* veel vaker wordt gebruikt als lidwoord dan als telwoord. Al met al is de tweede verklaring dus niet zo'n geschikte. De eerste verklaring heeft ook weer wat mindere punten, omdat het een uitgebreid proces veronderstelt, waarbij zowel telregels als lidwoordregels steeds specifiek en complexer worden. Het zou een veel minder ingewikkeld proces zijn, als je ervan uitgaat dat de telregels simpel en algemeen blijven, maar dat de lidwoordregels wel steeds specifiek worden. Op deze manier zul je de lidwoordregels gebruiken in de bijpassende situaties en als ze niet van toepassing zijn – bijvoorbeeld bij het tellen – vervel je automatisch in het gebruik van de telregels. Dit mechanisme is precies waar de derde verklaring op gebaseerd is. Deze verklaring lijkt op het moment dan ook het meest veelbelovend. In de volgende subparagraaf zullen we zien dat deze verklaring ook heel goed aansluit bij de beschrijvingen die Karmiloff-Smith vanuit de psycholinguïstische invalshoek geeft.

2.7 De functies van lidwoorden

Het playrooms-experiment dat ik aan het modelleren ben, is een onderdeel van een onderzoek van Karmiloff-Smith naar hoe kinderen de functies van bepaalde en onbepaalde lidwoorden leren. In dit onderzoek onderscheidt Karmiloff-Smith een aantal functies van lidwoorden (Karmiloff-Smith, 1979a). Hier zal ik deze functies even kort uiteen zetten. In eerste instantie hebben de

lidwoorden twee functies, namelijk een beschrijvende functie (*descriptor function*) of een aanwijzende functie (*determinor function*). In het eerste geval is het object waarover de uitspraak gaat al in de focus van de spreker en behoort en geeft de spreker door middel van zijn uitspraak nieuwe informatie over het object. In het tweede geval is het object waar de spreker het over wil hebben nog niet geïsoleerd en heeft het lidwoord juist als functie dit object aan te wijzen. De determinor function is weer onder te verdelen in vijf vormen van verwijzing:

- **Deictic reference.** Het bepaalde lidwoord heeft hierbij een echte aanwijzende functie. Deze functie gaat gepaard met aanwijzende gebaren.
- **Exophoric reference.** In dit geval gebruik je het bepaalde lidwoord als er van datgene waar aan gerefereerd wordt maar één exemplaar aanwezig is in de huidige extra-linguïstische context.
- **Non-specific reference.** Dit is de situatie met meerdere exemplaren van dezelfde soort in de extra-linguïstische context. Je wilt refereren aan één daarvan, maar het maakt niet uit welke.
- **Anaphoric reference.** Je gebruikt het bepaalde lidwoord voor iets, dat al eerder linguïstisch geïsoleerd is.
- **Generic reference.** In dit geval heb je niet te maken met een concreet exemplaar van een bepaalde klasse, maar wil je iets over de klasse zeggen, zoals bijvoorbeeld *Een pinguïn is een dier*. Afhankelijk van de taal wordt hiervoor het bepaalde of het onbepaalde lidwoord gebruikt. In het Frans wordt het bepaalde lidwoord gebruikt.

Naast deze functies van lidwoorden is er ook nog een andere functie van het onbepaalde lidwoord, die los staat van de determinor function, namelijk de **naamgevende functie**. Een voorbeeld daarvan is: *Kijk, dat is nou een olifant*. Dit gebruik van het onbepaalde lidwoord komt vaak voor in gesprekken tussen jonge kinderen en hun ouders.

Karmiloff-Smith geeft overigens de non-specifieke functie van het onbepaald lidwoord een onduidelijke status. Ze maakt geen onderscheid tussen de partitief-betekenis (*één van de*) en de existentiële interpretatie (er is een), zoals soms wel gebeurt in de taalkunde. Om de zaken overzichtelijk te houden, houd ik tijdens mijn hele verhaal de indeling van Karmiloff-Smith aan. Haar experimenten hebben namelijk ook deze indeling als uitgangspunt.

Nu we de functies van de lidwoorden weten, kunnen we gaan kijken hoe kinderen deze functies leren. Karmiloff-Smith neemt dezelfde drie periodes als uitgangspunt, als die ik hierboven aangegeven heb. Ze concludeert op grond van haar experimenten dat kinderen in de eerste periode niet uitgaan van de plurifunctionaliteit van lidwoorden. Ze gebruiken en horen bijvoorbeeld *une* wel in allerlei functies, maar zien het niet als hetzelfde woord. Ze zien het als een serie van unifunctionele homoniemen. Voor de observator mag het dan lijken alsof ze de verschillende functies gebruiken, maar het kind ervaart het alsof hij ieder moment een ander woord gebruikt. Dit sluit mooi aan bij het voorbeelden-idee dat ik voor periode I introduceerde. De kinderen gebruiken de eerdere voorbeelden en gebruiken de lidwoorden dus zeer genuanceerd, maar zelf begrijpen ze de functies niet. In periode II wordt het kind bewust van de dubbele functies van de lidwoorden. Dit leidt tot redundante en licht ongrammaticale uitspraken. Ze gebruiken een apart morfeem voor iedere functie. In het geval van *une* leidt dit bijvoorbeeld tot het gebruik van *une X* voor *een X* en *une des Xs* om *één X* aan te geven. In de derde periode verdwijnt de redundantie weer. Kinderen geven de lidwoorden nu plurifunctionele status. Daarnaast concludeert Karmiloff-Smith uit haar resultaten, dat kinderen op deze leeftijd de lidwoorden hebben geïntegreerd tot een systeem van meerdere mogelijkheden. Deze indeling in periodes gaat nog niet diep in op wanneer en hoe een kind de verschillende functies van de lidwoorden leert. Karmiloff-Smith beschrijft dit uitgebreid, aan de hand van een groot schema. Ik zal hier verslag doen van de belangrijkste onderdelen van haar beschrijving. Kinderen gebruiken eerste een losse klank als lidwoord. Daarna beginnen ze tegelijkertijd zowel bepaalde als onbepaalde lidwoorden te gebruiken. Beide soorten woorden worden door het kind nog niet gezien als onderdelen van een gemeenschappelijk semantisch systeem. Iedere soort heeft zijn eigen, zeer verschillende, functie. Het onbepaalde lidwoord wordt

gebruikt als een onderdeel van het naam geven aan objecten (de naamgevende functie). Het bepaalde lidwoord wordt door het kind gebruikt in de rol van *deictic reference*, om een object onder de aandacht te brengen. De lidwoorden worden niet door elkaar gehaald, maar hebben ieder hun eigen status en functie. De volgende stap is dat Franse kinderen andere lidwoorden gaan gebruiken voor meervouden. Ze gebruiken *des* in de naamgevende functie voor een groep objecten en *les* deictisch, om een groep objecten in de focus te brengen. Deze functies weerspiegelen dus de functies die aan de enkelvoudige lidwoorden worden gegeven. Kort nadat kinderen het onderscheid tussen enkelvoud en meervoud hebben gemaakt, worden ze zich bewust van de numerieke functie (*numeral function*) van het onbepaalde lidwoord. Ook krijgen ze rond diezelfde tijd de exoforische functie van het bepaalde lidwoord door. Ze gebruiken dus het bepaalde lidwoord als een object alleen is in de context en het onbepaalde lidwoord als ze verwijzen naar één van meerdere, dezelfde objecten. Op dezelfde manier lijken ze door hun gehoorde lidwoorden ook te begrijpen. Uit de verklaringen van de kinderen tijdens het playrooms experiment blijkt echter dat de het onbepaalde lidwoord dat ze in deze situatie begrijpen, eigenlijk het woord *één* is en niet het non-specifieke *een*. Als ze *une* horen, vatten ze het in deze fase dus op als het telwoord. Karmiloff-Smith is erg onduidelijk over of en hoe kinderen iets later toch overgaan tot de exoforische functie van het onbepaald lidwoord. Het lijkt er wel een beetje op dat dat gebruik helemaal wordt overschaduwd door het gebruik en begrip van het telwoord en dat deze verwarring pas is opgeheven op het moment dat kinderen leren *une* in de non-specifieke functie te gebruiken.

Na deze verwarrende fase ontwikkelt zich de *class inclusion function* bij het onderscheid tussen *les* en *des*. *Les* geeft nu niet alleen meervoud aan, maar ook dat je het over alle objecten hebt. Het volgende niveau is het niveau waarop het onbepaald lidwoord echt wordt gebruikt voor *non-specific reference* en het bepaalde lidwoord voor *anaphoric reference*. Dat *une* nu echt in de nonspecifieke functie wordt gebruikt, blijkt uit het feit dat kinderen in deze fase zinnen toevoegen als "het maakt niet uit welke". Ook wat betreft de anaforische functie, kunnen we zeggen dat die pas nu echt begrepen wordt. Heel jonge kinderen leken ook wel gebruik te maken van *anaphoric reference*, maar dat was volgens Karmiloff-Smith toch eigenlijk *deictic reference*, ofwel naar een object in de context ofwel naar een sterk mentaal beeld in het hoofd van het kind. Pas in deze latere fase begrijpen ze de anaforische functie echt en weten ze die aan te wenden om het gesprek of verhaal bij elkaar te houden. Hier houdt de beschrijving van Karmiloff-Smith op. Over het ontstaan van de generic function kan ze niet veel concluderen, omdat het moeilijk is daar goede experimenten voor op te zetten.

Uit bovenstaande chronologische beschrijving blijkt inderdaad dat kinderen pas meerdere functies aan lidwoorden kunnen geven op het moment dat de lidwoorden eerst heldere, eenduidige functies hadden. Mijn modeltechnische uitgangspunten, die ik in subparagraaf 2.6 heb besproken, lijken op het eerste gezicht mooi aan te sluiten bij de inhoudelijke analyse van Karmiloff-Smith. In hoofdstuk 3B: *Werking van het model* zet ik uiteen hoe de samenkomst van modeltheorie en linguïstische theorie er in meer detail uit zal komen te zien.

2.8 Periode-overgangen en de functies van *une* en *la*

De analyse van Karmiloff-Smith over wanneer welke functies van lidwoorden door kinderen worden ontdekt is erg uitgebreid. Voor mijn model zal ik alleen die functies gebruiken, die een rol spelen in het experiment, omdat het de gewenste functies zijn of omdat het juist verwarrende functies zijn. De analyse van Karmiloff-Smith spitst zich toe op het ontstaan van drie functies voor *une* en drie voor *la*. Deze zes wil ik ook een rol laten spelen in mijn model. Het gaat om de volgende functies:

- *une* in de naamgevende functie.
- *une* in de non-specifieke functie.

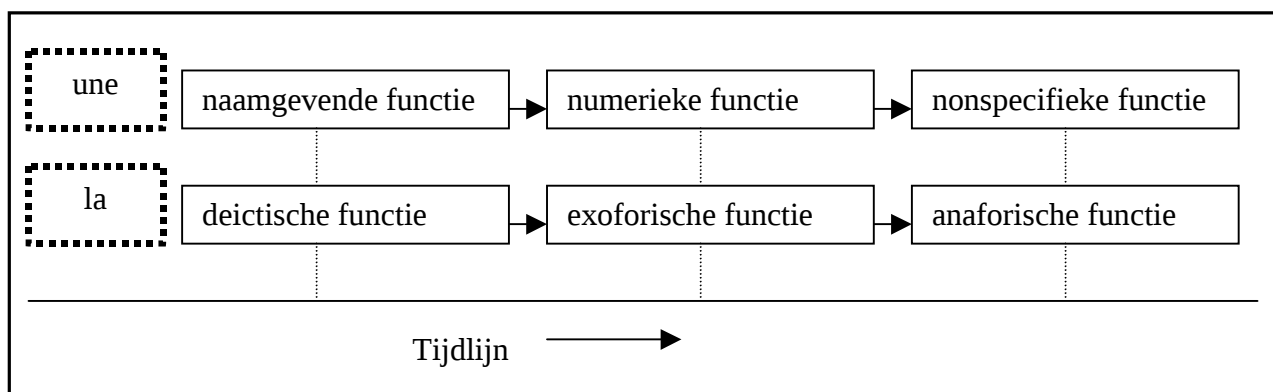
- *une* in de numerieke functie.
- *la* in de deictische functie.
- *la* in de exoforische functie.
- *la* in de anaforische functie.

In figuur 5 is de ontwikkeling van deze functies in de tijd te zien.

Ieder voorbeeld dat het kind heeft gehoord of zelf geproduceerd, wordt opgeslagen in het declaratieve geheugen. Bij die voorbeelden moeten we drie dingen onderscheiden: (1) de functie die de kinderen zelf een woord meegeven als ze hem gebruiken, (2) de functie die de kinderen een woord dat ze horen geven en (3) de functie die de spreker eigenlijk aan dat woord had gegeven. Figuur 5 laat de ontwikkeling zien in de functies die kinderen aan de uitgesproken en gehoorde lidwoorden geven. Echter, gezien vanuit het standpunt van de volwassenen hoort het kind doorlopend voorbeelden van alle zes de functies. Dit betekent dat vanaf het begin van de simulatie alle zes de soorten voorbeelden in het model moeten zitten. Hoe we de voorbeelden precies vormgeven in het model, kunt u lezen hoofdstuk 3B: *Werking van het model*.

2.9 Hoe dragen zowel het begrijpen als het produceren bij tot leren?

De vraag in deze subparagraaf is: hoe geven we aanname 7 vorm in ons model? Karmiloff-Smith concludeert uit haar experimenten dat de algemene trend in de productietaken gelijk was aan die in de begripstaken. In sommige gevallen bleek begrip wel een beetje op productie vooruit te lopen. Dit betekent dat we begrip en productie op kunnen vatten als twee processen die gebruik maken van dezelfde onderliggende kennis. Taatgen en Anderson (2002) doen dit ook in hun verleden tijden model. Bij productie is de stam van een werkwoord input en de gevormde verleden tijd is de output. Begrip van een gehoorde verleden tijd ontstaat, doordat er een procedure plaatsvindt, die de verleden tijd weer terugvormt naar de stam. In het declaratieve geheugen is deze stam dan al bekend of wordt toegevoegd. Op deze manier gebruiken productie en begrip dezelfde dingen in het declaratieve geheugen. Ook bij mijn playrooms model zal bij begrip en productie gebruik worden gemaakt van dezelfde elementen uit het declaratieve geheugen. De voorbeelden in het declaratieve geheugen staan, leggen een verband tussen de linguïstische term, bijvoorbeeld *la voiture* en een representatie van (een deel van) de extralinguïstische situatie, bijvoorbeeld een



Figuur 5: De ontwikkeling van nieuwe functies voor une en la in de loop van de tijd.

ruimte met precies één auto. Omdat dit verband geen richting heeft, is het te gebruiken om van de situatie naar de term te gaan (productie) of andersom (begrip). Productieregels hebben echter wel een richting. De specifieke begrip-productieregels die ik in mijn model wil laten ontstaan, gaan dus van de term naar de situatie. Deze specifieke productieregels hebben echter algemenere ouders waar ze uit zijn ontstaan, namelijk de analogie-productieregels. De aanname is dat er een hele

verzameling van dit soort analogie-productieregels is. De voor begrip benodigde analogie-productieregels hebben als input een term nodig, gebruiken een voorbeeldrelatie tussen een term en een situatie en leveren een situatie op. Er zijn ook regels die de analogietrekprocedure precies andersom laten werken. Die zijn nodig voor productie. Die regels hebben als input een situatie nodig, gebruiken dezelfde voorbeeldrelatie tussen een term en een situatie, maar leveren nu een linguïstische term op. Het specialiseren van deze twee soorten analogie-productieregels vindt kennelijk redelijke tegelijk plaats, waarbij de begrip-productieregels wellicht net iets eerder ontstaan. In mijn model zal ik mij richten op het ontstaan van de begrip-productieregels, omdat het experiment dat ik wil modelleren een begrip-experiment is. Toch houd ik de mogelijkheid voor het ontstaan van productie-productieregels ook open. Je kunt je immers ook voorstellen dat in het experiment de kinderen bedenken wat ze zelf zouden zeggen tegen de poppen en dat gebruiken om de keuze te maken.

2.10 Concrete plannen voor het model

In deze paragraaf heb ik in heel wat subparagrafen beschreven, wat ik allemaal geanalyseerd heb, om tot een opzet voor mijn model te komen. In hoofdstuk 3B: *Werking van het model* zal ik deze opzet concreter maken en de werking van het model gedetailleerd beschrijven.

3B: Werking van het determinatorenmodel

1 Opzet van het model

Voordat ik de werking van het model uit de doeken zal doen in de volgende paragraaf, vertel ik in deze paragraaf wat precies de opzet is van het model. Ik ga in op wat het model naar mijn idee concreet zou moeten doen en hoe het model dat kan bereiken.

1.1 Welke onderdelen hebben de voorbeelden nodig?

Hoe ziet een specifiek voorbeeld van het gebruik van een lidwoord in een bepaalde functie er precies uit? Een belangrijk punt hierbij is hoe je de situatie in de omgeving representeert in het model. Mensen hebben een soort plaatje in hun hoofd, dat aangeeft wat op dat moment het onderwerp van gesprek is. Daarnaast is een representatie nodig van de extralinguïstische context, waarbij het aantal identieke objecten (of het aantal objecten van dezelfde soort) met name van belang is. Alle functies uit figuur 5 van hoofdstuk 3A: *Van RR-theorie naar RR-model*, uitgezonderd de naamgevende functie en de numerieke functie, zijn determinerende functies. Ze zorgen er dus voor dat duidelijk wordt over welk object of onderwerp de uitspraak gaat. In sommige gevallen is er een directe relatie tussen het "mentale plaatje van het onderwerp" en het onderwerp in de buitenwereld zelf, zoals bij de deictische functie en de exoforische functie. In andere, geavanceerdere gevallen, verwijst het mentale plaatje niet naar iets dat er echt is, maar meer naar een categorie. Dit is min of meer het geval bij de non-specifieke functie en zeer duidelijk het geval bij de generieke functie, maar deze laatste laten we buiten ons model. In het playrooms experiment zijn de zaken waar de uitspraken over gaan echter altijd aanwezig in de omgeving. Dat maakt het in dit geval een stuk overzichtelijker. Iets anders wat ook een belangrijke rol speelt, is het wijzen en kijken bij het deictisch gebruik van *la*. Ook dit moeten we op de één of andere manier in de voorbeelden zien te verwerken. Voorbeelden waarbij *une* wordt gebruikt in de naamgevende functie zijn lastig, omdat de extralinguïstische situatie in zo'n geval zowel één uniek object kan zijn, als meerdere objecten, waarvan er één wordt aangewezen. Bij de naamgevende functie legt de spreker vaak een opvallende nadruk op het zelfstandige naamwoord waar het om gaat. Ook dit is iets wat niet makkelijk is om mee te nemen in de voorbeelden. We zullen deze twee dingen in het model als volgt versimpelen: zowel bij de naamgevende als de aanwijzende functie gaan we uit van een object dat wordt aangewezen. In het geval van de anaforische functie spelen weer andere dingen een rol, namelijk de intralinguïstische situatie, waarbij in de vorige zin het onderwerp al is geïsoleerd, zodat je er nu met *la* naar kunt verwijzen.

1.2 Hoe zien voorbeelden eruit?

Na deze brainstorm over wat er allemaal van belang is bij de voorbeelden, zullen we de zaken weer even helder moeten krijgen. In feite is het bij het gebruik van het bepaalde of het onbepaalde lidwoord voornamelijk van belang of je een nieuw onderwerp introduceert met je uitspraak. Het kan ook zijn dat je nieuwe informatie wilt geven over een object dat al duidelijk onderwerp van gesprek is. Daarnaast is de uniekheid van het object in de huidige context van belang: zijn er meer van dezelfde soort of is het object alleen? Op grond van deze twee aspecten, kunnen we de volgende onderdelen voor de voorbeelden bedenken, die de nieuwheid en de uniekheid van het object representeren:

- De **determinator** die gebruikt is, met de waarden *la* en *une*.
- Het zelfstandig naamwoord (**noun**) van de linguïstische term, bijvoorbeeld *voiture*, *montre* of *brosse*.
- Het **aantal** objecten van dezelfde soort als het huidige object, aanwezig in de extralinguïstische context, met de waarden *1*, *meer* en *1-aangewezen*.
- De focus voordat de uitspraak wordt gedaan (**focus-voor**). De focus vooraf kan leeg zijn, maar kan ook de waarde *symbool* hebben.
- De focus nadat de uitspraak is gedaan (**focus-na**). Deze kan de waarden *symbool*, *hoeveelheid* en *label* krijgen. Hieronder bespreek ik wat deze waarden betekenen.
- De functie die het lidwoord heeft (**rol**). Dit zijn natuurlijk de zes eerder besproken functies. In het model is de naamgeving echter wat versimpeld:
 1. De non-specifieke en de exoforische functie krijgen bij *rol* de waarde *introduceren*.
 2. De numerieke functie is versimpeld tot de rol *hoeveelheidsaangeven*.
 3. De anaforische functie heet in het model *continueren*.
 4. De deictische functie is in het model vervangen door *aanwijzen*.
 5. De naamgevende functie heet gewoon *naamgeven*.

De focus-waarden slaan op het volgende. *Leeg* bij *focus-voor* betekent dat er nog geen onderwerp van gesprek was, maar dat die wel aangewezen wordt met de huidige uitspraak. De *focus-na* is dan *symbool*. Als er al een object is dat de focus van het gesprek is, dan krijgt *focus-voor* de waarde *symbool*. Als *focus-na* de waarde *label* heeft, betekent dit dat de focus komt te liggen op de naam van het object. Bij *hoeveelheid* komt de focus, zoals je wel zou verwachten, op de hoeveelheid van het object te liggen. In de beperkte context van dit experiment is die hoeveelheid altijd 1. De *focus-voor* en *focus-na* geven samen in feite de functie van het lidwoord aan. Is de *focus-voor* *leeg* en de *focus-na* *symbool*, dan was het lidwoord bedoeld om een onderwerp te introduceren, oftewel aan te wijzen als gespreksonderwerp (exoforische en non-specifieke functie). Als er vooraf al een object in de focus was, dan kan het lidwoord één van de volgende functies hebben: numerieke functie (*focus-na* is dan *hoeveelheid*), anaforische functie (*focus-na* is dan *symbool*) of naamgevende functie (*focus-na* is dan *label*). In het model zullen we ook de volgende versimpeling toepassen: als object X eerst de focus van gesprek was en na de uitspraak is dat object Y, dan geven we de *focus-voor* van de uitspraak de waarde *leeg*. *Leeg* betekent in het model dus ofwel echt leeg ofwel iets anders dan het object waar de uitspraak over ging. Op dezelfde manier is de waarde *symbool* bij *focus-voor* en *focus-na* altijd gekoppeld aan de waarde bij *object*. Als de *focus-voor* de waarde *symbool* heeft en de *focus-na* ook, dan is er geen focusverschuiving geweest. Stel dat de uitspraak *la X* bevatte en dat X al onderwerp van gesprek was. *Focus-voor* heeft dan de waarde *symbool*. Achteraf ligt de focus nog steeds op hetzelfde object, namelijk X, dus krijgt *focus-na* ook de waarde *symbool*. De gebruikte functie was dus kennelijk de anaforische functie (in het model wordt dit *continueren* genoemd).

De hierboven besproken zes aspecten van voorbeelden zijn nodig om onderscheid te maken tussen de zes soorten voorbeelden. Hieronder geef ik aan hoe een prototypisch voorbeeld bij iedere functie er dan uit zou komen te zien.

Naamgevende functie

Determinator: *une*

Noun: *voiture*

Aantal: *1-aangewezen*

Focus-voor: *symbool*

Focus-na: *label*

Rol: *naamgeven*

Correct: *naamgeven*

De naamgevende functie kun je zowel gebruiken in een situatie waarin maar één element van het juiste soort aanwezig is, of waarin er meerdere aanwezig zijn. In dat laatste geval wijs je ook naar één van de elementen. Beide gevallen zijn echter weer tot één soort terug te brengen. Je kunt namelijk pas de naamgevende functie gebruiken als eerst duidelijk is welk element in de focus is. De focus vooraf is dus al bepaald (ofwel omdat er maar één element was, ofwel door wijzen) en de context doet er dan vervolgens niet meer toe.

Numerieke functie

Determinator: *une*

Noun: *voiture*

Aantal: 1

Focus-voor: symbool

Focus-na: hoeveelheid

Rol: hoeveelheidsaangeven

Correct: hoeveelheidsaangeven

Nonspecifieke functie (1)

Determinator: *une*

Noun: *voiture*

Aantal: meer

Focus-voor: leeg

Focus-na: symbool

Rol: introduceren

Correct: introduceren

Uit de resultaten van Karmiloff-Smith blijkt dat Franstalige kinderen tussen de vijf en zeven jaar *une X* gebruiken voor de numerieke functie en *une des Xs* voor de nonspecifieke functie. We kunnen dus wel aannemen dat de kinderen ook als ze jonger zijn, al voorbeelden in hun geheugen hebben van *une-des-Xs*-constructies:

Nonspecifieke functie (2)

Determinator: *une des*

Noun: *voiture*

Aantal: meer

Focus-voor: leeg

Focus-na: symbool

Rol: introduceren

Deictische functie

Determinator: *la*

Noun: *voiture*

Aantal: 1-aangewezen

Focus-voor: leeg

Focus-na: symbool

Rol: aanwijzen

Exoforische functie

Determinator: la
Noun: voiture
Aantal: 1
Focus-voor: leeg
Focus-na: symbool
Rol: introduceren

Anaforische functie (1)

Determinator: la
Noun: voiture
Aantal: 1
Focus-voor: symbool
Focus-na: symbool
Rol: continueren

Anaforische functie (2)

Determinator: la
Noun: voiture
Aantal: meer
Focus-voor: symbool
Focus-na: symbool
Rol: continueren

Bij de anaforische functie draait het er juist om dat je niet de focus verandert. Je wilt aangeven dat de focus hetzelfde blijft. Hierbij maakt het aantal niet meer uit. Je kunt dus anaforische voorbeelden hebben met de waarde 1 bij *aantal*, maar ook anaforische voorbeelden waarbij *aantal* de waarde *meer* heeft.

Nu we hebben gezien hoe de voorbeelden eruit zien, zal ik in de volgende subparagrafen aangeven hoe het analogieproces op deze voorbeelden in zijn werk gaat. Ook zal ik een beschrijving geven van de regels die het model in iedere fase tot zijn beschikking heeft.

1.3 Het experiment en normale verwerking en productie in drie periodes

De door Karmiloff-Smith uitgevoerde experimenten, zijn in feite momentopnames van hoe kinderen op verschillende leeftijden lidwoorden verwerken. Om een model te kunnen maken van het experiment, moeten we dus ook de gewone verwerking van lidwoorden en het produceren van lidwoorden modelleren. Uit de resultaten van het experiment blijkt, dat er drie periodes zijn te onderscheiden. In iedere periode levert het experiment andere resultaten op. Dit suggereert dat dezelfde periodes te onderscheiden zijn voor normale verwerking en productie van lidwoorden. Er zijn dus drie periodes voor drie soorten activiteiten (normale verwerking, normale productie en "experimentele verwerking" - de verwerking van lidwoorden die plaatsvindt tijdens het experiment). Voor het begrijpen van het model is het nodig om helder voor ogen te hebben, hoe iedere activiteit in iedere periode uitgevoerd wordt. Per activiteit en periode hebben we dus regels nodig, die het verband tussen de determinatoren en de lidwoorden uitdrukken. Deze regels zijn in het model eerst nog niet aanwezig. Het model beschikt alleen maar over analogieregels. Het productiecompilatiemechanisme zorgt er echter voor dat uit deze analogieregels nieuwe regels ontstaan, die direct het verband tussen de lidwoorden en hun functies proberen te leggen. In de volgende subparagraaf zullen we, op grond van de gegevens uit het experiment en uit andere

experimenten (Karmiloff-Smith 1979a, experiment 1), deze, door het model te ontdekken, regels opstellen.

1.4 De (te ontdekken) productieregels

Laten we beginnen met de **normale verwerking**. Het kind hoort een constructie met een lidwoord erin. Hoe verwerkt het deze constructie? Het hangt ervan af of het kind de uniekheid van het object in de huidige context vantevoren kan vaststellen of niet. Als het kind dat kan, dan zal hij die kennis gebruiken in zijn regels. Zo niet dan gebruikt hij een regel die deze kennis oplevert. Hieronder bespreken we eerst de regels die moeten ontstaan als het model de uniekheid wel direct uit de omgeving kan bepalen. We beperken ons even tot *la* en *une*, maar voor *une-des* gelden dezelfde regels als voor *une*.

- Fase I: ALS lidwoord = *la* EN aantal = 1 DAN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = *une* EN aantal = 1 DAN rol = onbekend.
 ALS lidwoord = *une* EN aantal = meer DAN rol = introduceren.
- Fase II: ALS lidwoord = *la* EN aantal = 1
 DAN focus-na = symbool EN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = *une* EN aantal = 1
 DAN focus-na = hoeveelheid EN rol = hoeveelheidsaangeven.
 ALS lidwoord = *une* EN aantal = meer
 DAN focus-na = symbool EN rol = introduceren.
- Fase III: (focus-na is wel uit context te halen)
 ALS lidwoord = *la* EN focus-voor = leeg EN focus-na = symbool
 EN aantal = 1 DAN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = *une* EN focus-voor = symbool EN focus-na = hoeveelheid
 EN aantal = meer DAN rol = hoeveelheidsaangeven.
 ALS lidwoord = *une* EN focus-voor = leeg EN focus-na = symbool
 EN aantal = 1 DAN rol = introduceren.

 (focus-na is niet uit context te halen)
 ALS lidwoord = *la* EN focus-voor = leeg EN aantal = 1
 DAN focus-na = symbool EN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = *une* EN focus-voor = symbool EN aantal = meer
 DAN focus-na = hoeveelheid EN rol = hoeveelheidsaangeven.
 ALS lidwoord = *une* EN focus-voor = leeg EN aantal = 1
 DAN focus-na = symbool EN rol = introduceren.

In de normale, niet-experimentele situatie is het niet altijd mogelijk de waarde op de dimensie *aantal* te bepalen. Hiervoor moet het model ook regels ontwikkelen. Die regels kan het model dan ook gebruiken tijdens het experiment. Immers, in de **experimentele situatie** is het aantal nooit direct uit de context te bepalen. Het is juist de opdracht het juiste aantal te bepalen. Op grond daarvan kan het model dan de juiste speelkamer kiezen. Dat de waarde op de dimensie *aantal* soms niet te bepalen valt uit de context, leidt tot het ontstaan van de volgende regels:

- Fase I: ALS lidwoord = *la* DAN aantal = 1 EN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = *une* DAN aantal = 1 EN rol = onbekend.
 ALS lidwoord = *une* DAN aantal = meer EN rol = introduceren.

- Fase II: ALS lidwoord = la
 DAN focus-na = symbool EN aantal = 1 EN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = une
 DAN focus-na = hoeveelheid EN aantal = 1 EN rol = hoeveelheidsaangeven.
 ALS lidwoord = une
 DAN focus-na = symbool EN aantal = meer EN rol = introduceren.
- Fase III: (focus-na is wel uit context te halen)
 ALS lidwoord = la EN focus-voor = leeg EN focus-na = symbool
 DAN aantal = 1 EN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = une EN focus-voor = symbool EN focus-na = hoeveelheid
 DAN aantal = meer EN rol = hoeveelheidsaangeven.
 ALS lidwoord = une EN focus-voor = leeg EN focus-na = symbool
 DAN aantal = 1 EN rol = introduceren.

 (focus-na is niet uit context te halen)
 ALS lidwoord = la EN focus-voor = leeg
 DAN focus-na = symbool EN aantal = 1
 EN rol = introduceren.
 ALS lidwoord = une EN focus-voor = symbool
 DAN focus-na = hoeveelheid EN aantal = meer
 EN rol = hoeveelheidsaangeven.
 ALS lidwoord = une EN focus-voor = leeg.
 DAN focus-na = symbool EN aantal = 1
 EN rol = introduceren.

Als het kind zelf een zin wil **produceren**, dan weet hij al wat hij wil zeggen, dus de rol van het lidwoord is al bekend en ook het aantal is gevonden door naar de context te kijken. Vervolgens leveren deze twee aspecten het bijbehorende lidwoord op.

- Fase I: ALS rol = introduceren EN aantal = 1 DAN lidwoord = la.
 ALS rol = introduceren EN aantal = meer DAN lidwoord = une.
- Fase II: ALS rol = introduceren EN aantal = 1
 DAN focus-na = symbool EN lidwoord = la.
 ALS rol = introduceren EN aantal = meer
 DAN focus-na = symbool EN lidwoord = une.
 ALS rol = hoeveelheidsaangeven EN aantal = 1
 DAN focus-na = hoeveelheid EN lidwoord = une.
- Fase III: ALS rol = introduceren EN aantal = 1
 DAN focus-voor = leeg EN focus-na = symbool
 EN lidwoord = la.
 ALS rol = introduceren EN aantal = meer
 DAN focus-voor = leeg EN focus-na = symbool
 EN lidwoord = une.
 ALS rol = hoeveelheidsaangeven EN aantal = 1
 DAN focus-voor = symbool EN focus-na = hoeveelheid
 EN lidwoord = une.

Merk op dat voor productie de dimensies focus-voor en focus-na niet bepalend zijn. Als je weet wat voor functie je wilt geven aan het lidwoord en je weet het aantal van dat soort object in de huidige context, dan ben je klaar. Als het model in een situatie is waar aantal niet uit de context te bepalen is, dan zal hij wel gebruik maken van de beoogde focusverschuiving. De regels dit dat mogelijk maken zullen ook in ons model ontstaan, maar die bespreek ik hier verder niet.

1.5 Het ontdekken van relevante dimensies in de context

Uit bovenstaande regelsets is op te maken dat de kinderen naarmate ze ouder worden meer aspecten van de context kunnen herkennen om de regels op te baseren. Deze aspecten noemen we, in navolging van Van Rijn et al. (in press) *dimensies*. In het determinatorenmodel zijn drie dimensies van belang, namelijk *aantal*, *focus-na* en *focus-voor*. Bij aanvang van de simulatie is het model drie jaar oud. Hij kan nog niet tellen of hoeveelheden aangeven van objecten. Hij is ook nog niet helemaal bekend met het begrip *hoeveelheid*. Hij hoort wel voorbeelden van het gebruik van *une* met de rol *hoeveelheid*aangeven, maar kent deze functie nog niet. Het model slaat deze voorbeelden dan ook op met in het *rol*-slot de waarde *onbekend*. Het model is echter wel in staat om de uniekheid van een object in de context op te merken. We kunnen dus zeggen dat de dimensie *aantal* op die manier wel bekend is. De dimensies *focus-voor* en *focus-na* zijn in deze fase nog onbekend. Het model heeft nog niet door dat het gebruik van lidwoorden te maken heeft met het verschuiven van de focus. Het model ziet iedere gehoorde zin ook als een op zichzelf staand geheel en niet als deel van een gesprek. Zodra het model tellen heeft geleerd en heeft geleerd hoeveelheden van objecten aan te geven, treedt hij fase II binnen. Het model kent nu niet alleen de dimensie *aantal*, maar ook de dimensie *focus-na*. Hij heeft nu immers door dat er twee verschillende waarden zijn waar je de focus op wilt hebben liggen na de zin: ofwel op het zojuist geïntroduceerde object (*focus-na* is dan *symbool*) ofwel op de hoeveelheid van een object. Het model krijgt nu dus in de gaten dat *une* twee functies heeft. Hij heeft echter nog niet door dat wat er gezegd is voordat de het lidwoord kwam, ook van belang is. Hij kent dus de dimensie *focus-voor* nog niet. Hij ziet de *focus-na* nog niet als een resultaat van een focusverschuiving. Het gevolg is dat hij wel van eerder gehoorde lidwoordconstructies de focus-na kan opslaan, maar dat hij nog niet in staat is de focus-na op grond van de huidige context te voorspellen. In fase III begint het model wel door te krijgen dat determinatoren een focusverschuiving veroorzaken en dat je dus informatie uit de vorige zin of uit eerdere woorden van dezelfde zin kunt gebruiken om de lidwoordconstructie te begrijpen. Het model benadert zinnen nu als onderdelen van een lopend gesprek. *Focus-voor* is nu dus bekend. Het model probeert nu deze dimensie direct uit de context op te maken. Daarnaast is het model nu ook in staat om de focus-na te gaan voorspellen. Dit zal niet altijd lukken, maar dat is niet erg, want de focus-voor geeft al genoeg onderscheidende informatie om de twee betekenissen van *une* uit elkaar te halen. Het beschikbaar komen van nieuwe relevante dimensies leidt tot het ontstaan van nieuwe, meer geavanceerde productieregels. Maar voordat deze regels ontstaan, gebruikt het model eerst regels die op grond van analogie werken. Deze analogieregels kunnen dan de "ouders" worden van nieuwe productieregels. Hoe die analogieregels werken, komt in de volgende subparagraaf aan bod.

1.6 Het analogieproces

Een van de aannames in ons model is, dat kinderen vaak zinnen begrijpen en produceren op grond van een analogieproces. Ze weten wat ze willen zeggen en gebruiken een voorbeeld als mal voor de juiste zinsconstructie. Zo ook bij het begrijpen van zinnen. De uitspraak is vergelijkbaar met een eerder gehoorde uitspraak, dus kan de betekenis worden berekend aan de hand van die eerdere uitspraak. Op deze manier zinnen produceren en begrijpen kost echter wel veel tijd en moeite. Later in de ontwikkeling zal het kind dus op zoek gaan naar snellere en

makkelijkere methoden om met taal om te gaan. In ons model komt dit naar voren als een verschuiving van de analogiemethode naar gespecialiseerde productieregels, die snel en simpel uitvoerbaar zijn. Het productiecompilatiemechanisme zorgt voor die overgang. Het model kan niet van tevoren voorspellen welke regels bruikbaar blijken te zijn. Daarom maakt het snel nieuwe productieregels aan. Als een nieuwe productieregel succes heeft, wordt zijn kracht verhoogd. Op die manier kan het gebeuren dat goede nieuwe productieregels eerder ontstane regels gaan overvleugelen. Als een nieuwe regel niet veel succes met zich meebrengt, dan zal deze regel roemloos ten onder gaan. De nieuw ontstane regels en de oudere analogieregels blijven naast elkaar bestaan in het model. Het kan dus gebeuren dat het model weer terugvalt op de oudere analogieregels.

Het model doorloopt drie situaties (A, B en C). Over deze situaties vertel ik meer in de paragraaf 2. Zoals we al zagen, wordt bij overschakeling naar een nieuwe situatie nieuwe informatie uit de omgeving wordt gehaald, waar dat eerst nog niet gedaan werd. Zodra deze nieuwe informatie beschikbaar is, kan het model ook geavanceerdere analogieregels gebruiken. Dit kan dan vervolgens weer leiden tot het ontstaan van ingewikkeldere productieregels. Zo neemt het model in de loop van de ontwikkeling steeds meer nuances van de functies van lidwoorden en telwoorden mee in zijn verwerkingsproces.

1.7 De analogieregels

Zoals al eerder is opgemerkt, kan het analogieproces twee kanten op werken: de productierichting en de begriprichting. De begriprichting sluit op het eerste gezicht het meest aan bij het playrooms experiment, omdat dit ook een begripexperiment is. Laten we het analogieproces dus eerst vanuit de begriprichting bekijken. Het recept hiervoor gaat als volgt:

1. Luister naar de input: de zin P.
2. Neem de waarden van relevante dimensies uit de omgeving waar.
3. Genereer met behulp van een analogieproces op een uit het geheugen opgehaald voorbeeld de bijbehorende situatie P bij zin P.
4. Vergelijk situatie P met de de situatie van de meisjespop en met de situatie van de jongenspop.
5. Kies de situatie die het meest op situatie P lijkt.
6. Geef antwoord: meisje of jongen.

Wat het kind bij stap 2 zoal waar kan nemen, is afhankelijk van de doorzichtigheid van de situatie en van welke relevante dimensies hij al kent. Stap 3 is de meest ingewikkelde stap. Laten we er even van uitgaan dat het model bij stap 2 nog geen relevante dimensies heeft kunnen waarnemen uit de omgeving. Stap 3 bestaat dan uit de volgende substappen:

- Representeer de target van de analogie. Dit leidt tot een half ingevuld voorbeeld P:

Voorbeeld P

Isa:	voorbeeld
Determinator:	la
Noun:	brosse
Aantal:	onbekend
Focus-na:	onbekend
Focus-voor:	onbekend
Rol:	onbekend

Voorbeeld P is een chunk in het declaratieve geheugen. Dit voorbeeld is tevens het huidige doel. Het slot *isa* geeft het type van de chunk aan, in dit geval een *voorbeeld*.

- Haal de source van de analogie op uit het geheugen. Dat is bijvoorbeeld voorbeeld E:

Voorbeeld E

Isa: voorbeeld
Determinator: la
Noun: voiture
Aantal: 1
Focus-na: onbekend
Focus-voor: onbekend
Rol: introduceren

- Voer de mapping uit. Dit leidt tot een ingevuld voorbeeld P:

Voorbeeld P

Isa: voorbeeld
Determinator: la
Noun: brosse
Aantal: 1
Focus-na: onbekend
Focus-voor: onbekend
Rol: introduceren

De slots die in de target nog op *onbekend* stonden, worden ingevuld door het analogie-proces. Dit kan echter wel betekenen dat een bepaald slot opnieuw opgevuld wordt met *onbekend*. Hierop komen we in paragraaf 2 terug. In dit geval wordt het slot *aantal* ingevuld met de waarde 1 en het slot *rol* met de waarde *introduceren*. De slots *focus-na* en *focus-voor* krijgen opnieuw de waarde *onbekend*.

- Sla het gecreëerde voorbeeld P op in het geheugen.

Bij dit analogieproces hebben is dus in de target al gespecificeerd welke elementen uit de voorbeelden al ingevuld zijn in het begin en welke ingevuld worden door het trekken van de analogie. De reeds ingevulde slots hebben hun waarde gekregen door directe waarneming uit de omgeving. De waarde van bij het slot *rol* wordt altijd opgeleverd door de analogie. Als de analogie is voltooid, ga je situatie P vergelijken met de meisjeskamer en de jongenskamer (stap 3 en 4). Hoe gaat deze vergelijking nu in zijn werk? Om dat te weten te komen, moeten we eerst vaststellen hoe we de meisjeskamer en de jongenskamer gaan representeren in het geheugen. Er zijn vier soorten settings in het playrooms-experiment. Bij iedere setting is gespecificeerd, welke en hoeveel attributen iedere pop heeft. Van ieder soort object moet dus worden gerepresenteerd hoeveel ervan in welke kamer zijn. Deze *playroomfacts* zien er als volgt uit:

Fact123

Isa: playroomfact
Object: brosse
Kamer: meisje
Aantal: meer

Fact124

Isa:	playroomfact
Object:	brosse
Kamer:	jongen
Aantal:	1

Hieruit blijkt dat de vergelijking tussen de ruimtes van de jongen en het meisje en de gecreëerde situatie, dus alleen op de eigenschap *aantal* kan gaan. Een productieregel zoekt in het declaratieve geheugen een playroomfact op met als object *brosse* en als aantal 1. Als hij die vindt, produceert hij als antwoord de waarde die bij *kamer* staat, in dit geval de waarde *jongen* (in het Frans: *garçon*).

2 De werking van het model

2.1 De analogieregels (in de begriprichting) in ACT-R termen

In deze paragraaf wil ik de analogieprocedure, die ik beschreef in de paragrafen 1.7 en 1.8, specificeren naar echte productieregels in ACT-R termen. Ik zal alleen de begriprichting behandelen. In de begriprichting wordt eerst de linguïstische term gehoord en dus worden de slots *determinator* en *noun* in de goal gevuld. Vervolgens probeert het model informatie uit de omgeving te vergaren. Dit kan leiden tot het invullen van één of meer van de slots *aantal*, *focus-voor* en *focus-na*. Daarna wordt het analogieproces gestart. Het proces bestaat uit twee stappen: (1) een voorbeeld aanvragen uit het declaratieve geheugen, op grond van de half ingevulde target – dit heet in ACT-R een *retrieval request* – en (2) de overige slots invullen aan de hand van het gevonden voorbeeld. De productieregels die dit doen, zien er bijvoorbeeld zo uit (waarden met een =-teken ervoor zijn variabelen):

(P aanvraag-van-det-naar-focvoor-focna-aantal-rol

=goal>

isa	voorbeeld
determinator	=det
aantal	onbekend
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	tebepalen
status	begin

→

+retrieval>

isa	voorbeeld	(dit is de <i>retrieval-request</i>)
determinator	=det	
status	klaar	

=goal>

status	voorbeeld-aangevraagd
--------	-----------------------

)

(P van-det-naar-focvoor-focna-aantal-rol

=goal>

isa	voorbeeld
status	voorbeeld-aangevraagd

=retrieval>

isa	voorbeeld
aantal	=aant
focus-voor	=focvoor
focus-na	=focna
rol	=rol

→

=goal>

aantal	=aant	(hier worden de ontbrekende onderdelen ingevuld)
focus-voor	=focvoor	
focus-na	=focna	
rol	=rol	
status	zin-verwerkt	

)

Bovenstaande twee regels zijn van toepassing, wanneer er niets uit de omgeving kon worden opgemaakt. De analogieprocedure levert nu alle gegevens over de omgeving op. Het kan echter wel zijn dat er een voorbeeld wordt gebruikt waarin enkele omgevingsdimensies de waarde *onbekend* hadden. In dat geval blijven een aantal slots in de goal ook na de analogieprocedure nog op *onbekend* staan. Dit is wellicht een beetje raar, maar het is het gevolg van het feit dat slotnamen en het aantal slots van een bepaald chunktype van tevoren moeten vastliggen in ACT-R. In fases waarin het model nog niet bekend is met alle dimensies, blijven de bijbehorende slots dus steeds op *onbekend* staan. Ter extra verduidelijking geef ik hieronder ook nog een voorbeeld van de analogieregels die gebruikt worden als er wel informatie uit de omgeving is gehaald, bijvoorbeeld de waarde van de dimensie aantal. In het target van de analogie staat dan al de juiste waarde voor aantal ingevuld (bijvoorbeeld *meer*), voordat het analogieproces begint. Deze twee regels kunnen dan worden gebruikt:

(p aanvraag-van-det-aantal-naar-focvoor-focna-rol

=goal>

isa	voorbeeld
determinator	=det
aantal	=aant
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	tebepalen
status	begin

→

+retrieval>

isa	voorbeeld
determinator	=det
aantal	=aant
status	klaar

=goal>

status	voorbeeld-aangevraagd
--------	-----------------------

)

(p van-det-aantal-naar-focvoor-focna-rol

=goal>

isa	voorbeeld
status	voorbeeld-aangevraagd

=retrieval>

isa	voorbeeld
focus-voor	=focvoor
focus-na	=focna
rol	=rol

→

=goal>

focus-voor	=focvoor
focus-na	=focna
rol	=rol
status	zin-verwerkt

)

2.2 Hoe uit het analogieproces nieuwe regels ontstaan

Het determinatorenmodel is gebaseerd op de nieuwste versie van ACT-R 5.0. Hierin werkt productiecompilatie iets anders dan in de vorige versie. In deze paragraaf leg ik kort uit hoe deze nieuwe productiecompilatie werkt. We zagen al dat het analogieproces bestaat uit de volgende twee stappen: (1) het model doet een *retrieval request* voor een geschikt voorbeeld, (2) het model gebruikt dit voorbeeld om zijn huidige doel te vervullen. Het productiecompilatiemechanisme heeft als doel de *retrieval* van een voorbeeld overbodig te maken. Stel dat voorbeeld A gebruikt is. Het productiecompilatiemechanisme maakt dan een nieuwe regel, waar de inhoud van voorbeeld A al ingebakken zit. Deze regel heeft echter nog een verwacht succes van 0. De nieuwe regel heeft dus nog geen kracht. Later in de simulatie worden weer twee stappen uitgevoerd, waarbij weer voorbeeld A gebruikt wordt. Dit hoeven niet precies dezelfde stappen te zijn als eerst. Als productiecompilatie dan wel weer dezelfde nieuwe regel oplevert, dan wordt deze samengevoegd met de eerder ontstane regel. De kracht van deze regel wordt daarmee ook iets verhoogt. Als dus maar vaak genoeg dezelfde twee stappen worden uitgevoerd met gebruikmaking van hetzelfde voorbeeld, dan heb je een nieuw ontstane regel, die een behoorlijk hoge succesverwachting heeft en de krachtmeting met de regels waar hij uit is ontstaan – zijn ouders – goed aankan. De nieuwe regel is sneller en efficiënter. Dit kan ertoe leiden dat de ouders niet meer meedoen in de simulatie en dat de nieuwe regel altijd gekozen wordt. Het kan ook gebeuren dat er een nieuwe regel ontstaat, die specifiek is dan zijn ouders, maar niet op de goede manier. Deze regel kan best lange tijd een grote rol spelen in de simulatie, maar als hij uiteindelijk toch niet tot de juiste resultaten leidt, zal zijn kracht op een gegeven moment niet verder toenemen en kan weer een nieuwe, ook steeds sterker wordende regel de regel gaan overvleugelen. Om het succes van nieuwe regels te kunnen bepalen, heb je echter wel een succesmaat en dus feedback nodig. In hoeverre dat in ons model kan, zal blijken in de volgende paragraaf.

2.3 Succesvolle en minder succesvolle regels in een situatie zonder feedback

Tijdens het experiment krijgen de kinderen geen feedback over of ze de juiste kamer hebben uitgekozen. In een deel van het experiment wordt wel gevraagd of de andere kamer ook mogelijk was geweest, maar dat laten we buiten beschouwing in ons model. In de normale, niet-experimentele situatie krijgen kinderen meestal ook geen directe feedback over hun interpretatie

of hun uiting. In ons model kunnen we dus ook niet gebruik maken van directe feedback. Een productieregel is in zo'n geval succesvol als hij het verwerkingsproces naar een eindstatus weet te brengen. Een productieregel zal normaal gesproken dus nooit tot een *failure* leidt. De kracht van een regel wordt bepaald door zijn succeskansen, maar ook door de kosten die met uitvoeren van de regel gemoeid zijn. In dit kostengedeelte kunnen we wel een vorm van indirecte feedback betrekken. Als een kind immers het verkeerde lidwoord kiest of de rol van het gehoorde lidwoord verkeerd interpreteert, kan dit leiden tot miscommunicatie en onduidelijkheid. Dergelijke uitspraken en interpretaties leiden dus wel tot succes, maar hun kosten worden verhoogd, omdat er onduidelijkheid is ontstaan, die achteraf nog opgelost moet worden of die op een andere manier later tot extra moeite kan leiden. Deze vorm van extra effort noem ik een *ambiguitetsstraf*. Een niet echt goede regel die leidt tot een ambiguitetsstraf kan echter wel floreren. Komt er dan een nog betere regel, die geen ambiguitetsstraf krijgt, dan zal die nieuwe regel de oude wel gaan overvleugelen.

Hogere kosten bij een regel kunnen ook komen, doordat de regel een langere linguïstische constructie oplevert. In ons model, zie je dat bij het gebruik van de constructie *une des Xs*. Bij deze constructie is het duidelijk wat de rol is, namelijk aanwijzen, maar er moeten meer woorden worden gebruikt. Deze constructie brengt dus meer kosten met zich mee om uitgesproken te worden. Het uitspreken van de woorden zit niet in ons model, dus moeten we de hogere kosten direct doorberekenen aan de veroorzaker daarvan: de regel die ervoor kiest *une-des* te gebruiken als determinator. De regel is dus niet ambigu, maar levert wel een onnodig ingewikkelde constructie op. De straf die deze regel daarvoor krijgt, noem ik dan ook een *redundantiestraf*. Eigenlijk zijn we in ons taalgebruik altijd bezig het evenwicht te vinden tussen ambigüiteit en redundantie. We willen wel eenduidig en correct zijn, maar het moet ook zo efficiënt mogelijk. Dit is dus een afweging tussen snelheid en correctheid. Dat deze afweging niet alleen geldt in het domein van de taal, maar ook op allerlei andere cognitieve gebieden, zal blijken uit de komende hoofdstukken. In de RR-theorie en de RR-experimenten kun je namelijk je vaak een ontwikkeling ontdekken, die nauw samenhangt met het ontwikkelen van een evenwicht tussen snelheid en correctheid.

De feedback is als volgt concreet gemaakt in het determinatorenmodel. Als het model een lidwoordconstructie gehoord en verwerkt heeft, dan wordt de toegekende rol vergeleken met de werkelijke functie die bedoeld was. Als die gelijk zijn, dan leidt dat tot de registratie van een succes. Als ze niet gelijk zijn, wordt dat ook als een succes geregistreerd, maar met toegevoegde efforts. Er zijn een verschillende gevallen te onderscheiden. Als het model na het hele begripproces op het eind nog steeds *onbekend* heeft staan bij rol, dan is het lidwoord dus duidelijk niet begrepen. In zo'n situatie heeft een kind ook wel door dat de communicatie niet perfect verloopt en dat de belangrijke informatie die in de determinator zat verstopt, niet door hem is begrepen. De toegevoegde effort is dan ook hoog (2.0). Als het model wel een rol heeft toegekend, maar niet de juiste, dan is de toegevoegde effort lager, namelijk 1.1. In het werkelijke leven zal een kind zich aan de ene kant prima staande kunnen houden in de interactie met anderen als hij de functie van een lidwoord verkeerd begrijpt. Het kan aan de andere kant wel leiden tot onverwacht gedrag of verwarring. Om die reden wordt er dus wel een extra effort toegekent. Niet alle manieren van verkeerd begrijpen zijn even verwarrend en lastig. Een aanname in het determinatorenmodel is dat met name bij het verwisselen van de numerieke en de non-specifieke functie de foutmaat niet symmetrisch is. Het is veel erger als een kind een non-specifieke functie geeft aan een numerieke determinator dan wanneer hij het omgekeerde doet. In het eerste geval mist de luisteraar belangrijke informatie. In het tweede geval zal de luisteraar ondanks de misinterpretatie – als een soort bij-effect – toch de introductie van het object als focus van het gesprek accepteren. Stel dat een kind (in het Frans) te horen krijgt: "Geef me een bord.", dan kan hij deze zin verkeerd interpreteren en denken dat de spreker vraagt om precies één bord. In dat geval zal hij de spreker alsnog wel geven wat hij wilde. Als een luisteraar de overgang in

focus naar de hoeveelheid (in plaats van het object zelf) niet door heeft, dan geeft dit vaker problemen. Stel iemand zegt tegen de luisteraar (in het Frans): "Ik heb één schoen!" en de luisteraar interpreteert de *une* als *een*, in plaats van als *één*, dan zal de luisteraar blij zijn voor deze persoon. Hij zal niet de eigenlijke boodschap niet begrijpen – dat het hebben van slechts één schoen helemaal niet oké is, omdat je er twee nodig hebt om op straat te kunnen lopen! In het model is deze niet-symmetrische foutmaat als volgt verwerkt: als het model *introduceren* begrijpt, waar eigenlijk *hoeveelheidsaangeven* was bedoeld, dan is de toegevoegde effort hoger dan in de andere gevallen, namelijk 2.0. Als het model *hoeveelheidsaangeven* begrijpt in plaats van *introduceren*, dan krijgt het de normale hoeveelheid extra effort bij verkeerd begrijpen (1.1).

2.4 Situatie A, B en C

Een belangrijk onderdeel van de werking van het model is de onderverdeling in drie fases. Dit zijn, globaal gezien, dezelfde drie fases als die door Karmiloff-Smith (1992) worden onderscheiden, alleen is het beginpunt steeds eerder, omdat het effect van een situatieverandering pas later merkbaar is. In het model heb ik de drie fases situatie A, B en C genoemd. Situatie A is de situatie zoals die is voor aanvang van de simulatie en deze loopt nog door tot drie maanden na het begin. Dan begint situatie B. Deze loopt bijna vijf jaar. Op achtjarige leeftijd komt het model vervolgens in situatie C. De drie situaties zijn echt verschillende situaties, want de beschikbare kennis in het declaratieve geheugen verandert zodra je een nieuwe situatie (en dus een nieuwe fase) binnenkomt. We zagen al eerder dat er telkens nieuwe relevante dimensies beschikbaar komen in de loop van de tijd. In situatie A is er één dimensie bekend, namelijk *aantal*. In situatie B komt daar *focus-na* bij. *Focus-voor*, tenslotte, komt beschikbaar in situatie C. Van een beschikbare dimensie kan het model de waarde proberen te achterhalen in de omgeving. Dit betekent dat zodra er een nieuwe dimensie bijkomt, de beschikbare voorbeelden ook meer gevuld raken. Het model let nu immers wel op de waarde in het bijbehorende slot. Is een dimensie nog niet beschikbaar, dan heeft het model alleen voorbeelden waarbij bij het overeenkomstige slot *onbekend* is ingevuld. In situatie A ziet een voorbeeld er dus bijvoorbeeld zo uit (de Franse objectnamen zijn versimpeld tot strings van letters):

(voorbeeld1

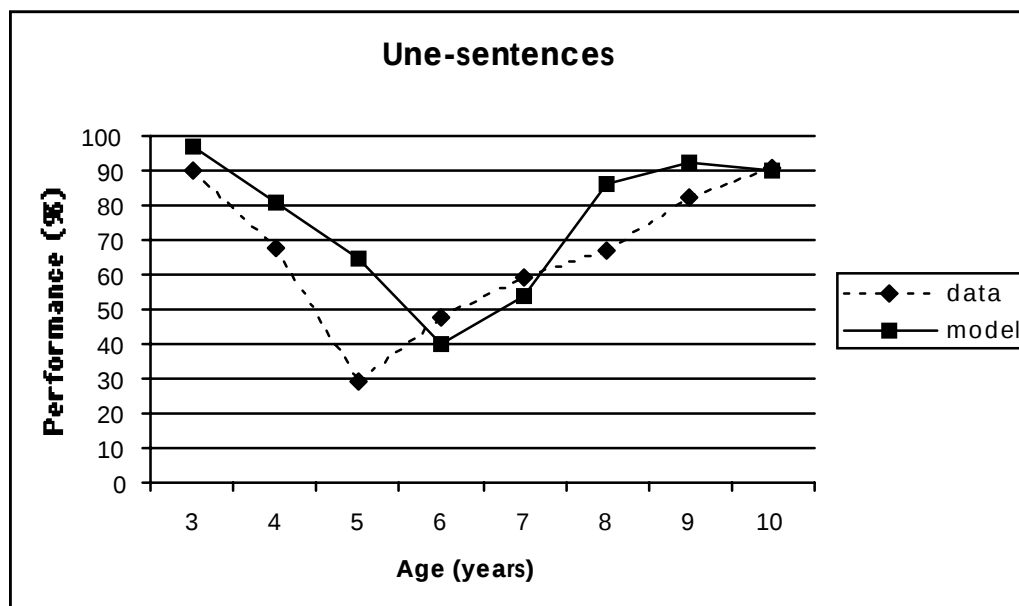
ISA	voorbeeld
determinator	la
noun	AAA
aantal	1
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	introduceren
status	klaar
taak	normaal
correct	introduceren

)

Het slot *correct* is alleen maar aanwezig om de gevonden rol te kunnen vergelijken met de intentie van de spreker. Als het model aan het begin van situatie B is, dan zitten de voorbeelden uit situatie A natuurlijk ook nog vers in het geheugen. Als het model dan een situatie-A-voorbeeld gebruikt voor analogie, dan komt hij niets te weten over de nieuw ontdekte dimensie *focus-na*. Dat slot blijft dan op *onbekend* staan. Dankzij de competitie tussen regels zal het gebruiken van informatievere voorbeelden echter wel toenemen. In de volgende subparagraaf zien we hoe het analogieproces in iedere situatie precies verloopt.

2.5 Analogieën in de situaties A, B en C

In situatie A is het model alleen bekend met de dimensie *aantal*. Als hij een zinsdeel met een lidwoord hoort, gebruikt hij een analogieregel, die een verband legt tussen *determinator* en *aantal*. De analogieregel zoekt een eerder gehoord voorbeeld op, waarbij dezelfde determinator was gehoord. Als de waarde van *aantal* niet direct uit de omgeving kan worden bepaald, wordt de waarde van *aantal* overgenomen van het eerder gehoorde voorbeeld. Het model zal niet altijd een juist soort voorbeeld kiezen en daardoor niet altijd het juiste aantal bepalen. Echter, het model bevindt zich altijd in een bepaalde context. Het ervaren van deze context zorgt ervoor dat de analogiestrategie toch meestal tot het juiste antwoord leidt. Het kind kan in situatie A nog niet expliciet waarden op bepaalde dimensies uit de omgeving waarnemen, behalve de waarde op de dimensie *aantal*. Maar impliciet heeft de context wel invloed. Als het model in een situatie zit, waarin telwoorden worden gebruikt – denk hierbij bijvoorbeeld aan het kijken naar een onderdeel van Sesamstraat over tellen – dan hebben de voorbeelden die telwoorden gebruiken, vanwege de associatieve overeenkomsten, een hogere activatiewaarde. Ze liggen simpelweg wat dichterbij de oppervlakte. Omgekeerd, als het model in een situatie zit, waarin lidwoorden worden gebruikt – bijvoorbeeld als een ouder een kind in de dierentuin allerlei diernamen leert – dan activeert het kind, wederom door uitwaaiende associaties, automatisch de voorbeelden die lidwoorden gebruiken wat meer. In het model is dit hele verhaal versimpeld. Het model zit eigenlijk standaard in een meer lidwoord-achtige situatie. Er zijn meer voorbeelden van lidwoorden dan van telwoorden en de lidwoord-voorbeelden zullen dus meestal gevonden worden. Dit heeft tot gevolg dat de simpele analogiestrategie van situatie A in de experimentele context toch al een prestatie



Figuur 6: de experimentele resultaten van de proefpersonen (verschillende leeftijdsgroepen) en de experimentele resultaten van een run van het Determinatorenmodel (longitudinaal).

van meer dan 90% oplevert (zie figuur 6).

Eenmaal in situatie B wordt het ingewikkelder. Het model heeft nu de beschikking over de dimensie *aantal* en ook over de dimensie *focus-na*. Hij zal wederom bij het horen van een constructie met een lidwoord proberen te achterhalen wat het aantal is. In veel gevallen zal dat

direct uit de context kunnen, omdat het model het aantal kan “zien” of zich het kan herinneren. Er zullen echter ook gevallen zijn, waarin het aantal niet direct uit de context te bepalen is. De experimentele situatie is hiervan natuurlijk het duidelijkste voorbeeld. Als het model het aantal direct uit de context heeft bepaald, dan gebruikt hij deze informatie bij het opzoeken van een geschikt voorbeeld voor de analogie. Hij kiest een voorbeeld dat niet alleen dezelfde determinator heeft, maar ook hetzelfde aantal. Hiermee wordt de kans behoorlijk vergroot dat hij een correct voorbeeld uitkiest. Als het aantal niet direct uit de omgeving bepaald kon worden, dan zoekt hij voorbeeld slechts op grond van de determinator en gebruikt die om het aantal te bepalen. Tevens neemt hij dan echter ook de waarde bij *focus-na* van dat voorbeeld over. Op grond van de door de analogie opgeleverde waarde bij *aantal* bepaald hij – in de experimentele situatie – vervolgens of de zin tegen de jongenspop of tegen de meisjespop was gezegd. Het model is, zoals ik al eerder aangaf, nog niet in staat de *focus-na* te voorspellen, omdat hij de focusverschuiving nog niet door heeft en de zinnen nog niet als een geheel gesprek ziet. Dit betekent dat hij de *focus-na* van de huidige zin altijd via analogie bepaalt. Hij maakt hierbij gebruik van de uitgebreidere voorbeelden, die hij sinds het begin van situatie B tot zijn beschikking heeft.

In situatie C heeft het model alle tools in handen om de zinnen goed te begrijpen. Hij kent nu ook de dimensie *focus-voor*, dus wat het aandachtspunt was voordat het zinsdeel werd uitgesproken. Hij probeert de waarden van *focus-voor*, *focus-na* en *aantal* direct uit de context op te vragen. Alle informatie die hij hieruit krijgt, gebruikt hij bij het selecteren van een geschikt voorbeeld. Als hij zowel een waarde voor *focus-voor* als een waarde voor *aantal* gevonden heeft, dan zal hij altijd een correct voorbeeld selecteren en dus de zin goed begrijpen. Als één van de drie dimensies nog geen waarde heeft, dan laat hij die waarde opleveren door de analogie. Hetzelfde gebeurt als meerdere dimensies nog geen waarde hadden. Het model is in staat om de experimentele situatie altijd goed te doen, aangezien hij de waarde van *focus-voor* – *leeg* of *symbol* – kan gebruiken om een juist voorbeeld te selecteren. Deze levert dan weer de juiste waarde voor *aantal* en het model kan de juiste kamer uitkiezen.

2.6 De productieregels die ontstaan in situatie A, B en C

De analogiestrategie kost veel tijd en moeite. Eerder beschreef ik al hoe het productiecompilatie-mechanisme van ACT-R nieuwe productieregels vormt om de processen te versnellen. In deze subparagraaf laat ik zien welke productieregels ontstaan en hoe die tot de gevonden percentages kunnen leiden. Telkens als er een nieuwe dimensie beschikbaar komt voor het model, gaat het gebruik maken van deze nieuwe dimensie met behulp van een geavanceerdere analogiestrategie. Productiecompilatie van deze nieuwe analogiestrategie leidt dan weer tot nieuwe, meer geavanceerde productieregels. In het model ontstaan allerlei nieuwe productieregels, maar we zullen ons in deze paragraaf beperken tot de nieuwe productieregels, die invloed hebben op het playrooms-experiment. In de eerste fase kan het model alleen gebruik maken van de dimensie *aantal* bij het horen van een determinator. Deze dimensie kan hij, als hij in de experimentele situatie zit, niet direct waarnemen. Hij gebruikt dan de twee onderstaande regels, die samen een analogiestrategie vormen:

(P 1

=goal>

ISA	voorbeeld
determinator	=det
aantal	onbekend
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	tebepalen
status	begin

→

+retrieval>

ISA	voorbeeld	(retrieval request met voorwaarde: determinator)
determinator	=det	
status	klaar	

=goal>

status	voorbeeld-aangevraagd
--------	-----------------------

)

Regel 1 vraagt dus een voorbeeld aan uit het declaratieve geheugen met dezelfde waarde bij het slot *determinator* als in de goal.

(P 2

=goal>

ISA	voorbeeld
status	voorbeeld-aangevraagd

=retrieval>

ISA	voorbeeld
aantal	=aant
focus-voor	=foc-voor
focus-na	=foc-na
rol	=rol

→

=goal>

aantal	=aant	(waarden van het voorbeeld worden gekopieerd)
focus-voor	=foc-voor	
focus-na	=foc-na	
rol	=rol	
status	zin-verwerkt	

)

Regel 2 gebruikt het opgehaalde voorbeeld om waarden uit te kopiëren. Dit is de werkelijke analogiestap. In situatie A wordt voor de dimensies *focus-voor* en *focus-na* opnieuw *onbekend* ingevuld. Het slot *aantal* krijgt wel echt een waarde. In de loop van de simulatie ontdekt het productiecompilatiemechanisme de regelmaat in de waarden op de dimensie *aantal* en bouwt de volgende nieuwe productieregels voor *une*:

(P 3

=goal>

ISA	voorbeeld
determinator	une
aantal	onbekend
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	tebepalen
status	begin

(resultaat van *retrieval* is al ingevuld)

→

=goal>

aantal	meer
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	introduceren
status	zin-verwerkt

)

Deze regel heeft dus als input *determinator=une* en levert als output *aantal=meer* en *rol=introduceren*.

(P 4

=goal>

ISA	voorbeeld
determinator	une
aantal	onbekend
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	tebepalen
status	begin

→

=goal>

aantal	1
focus-voor	onbekend
focus-na	onbekend
rol	onbekend
status	zin-verwerkt

)

Regel 4 heeft dus ook als input *determinator=une*. Deze keer is de output echter *aantal=1* en *rol=onbekend*. De waarde *onbekend* is een consequentie van het feit dat het model nog geen idee heeft van tellen en hoeveelheden aangeven. De analogiestrategie waaruit regel 3 en 4 zijn ontstaan, blijft nog steeds aanwezig. De totale set van oude en nieuwe regels bepaalt het gedrag van het model tijdens het experiment in de eerste fase. Het model voert in totaal acht gesimuleerde jaren uit. In een gesimuleerd jaar vindt heel veel gewone verwerking en productie plaats. Iedere gesimuleerde maand wordt het model in de experimentele situatie geplaatst en aan het playrooms-experiment onderworpen. Tijdens het eerste gesimuleerde jaar (leeftijd model: 3 jaar) is de prestatie van het model op het playrooms-experiment ongeveer 90% (zie figuur 6). Voor de experimentele taak concurreren de regels 1, 3 en 4. Regel 3 heeft vaak de hoogste activatie-

waarde en wint meestal de competitie. Deze regel is namelijk snel en succesvol en leidt niet tot een onbekende functie.

In fase 2 beschikt het model over voorbeelden met *focus-na* erin. Voor de analogiestrategie is het model nu nog steeds aangewezen op regel 1 en 2, aangezien hij nog niet in staat is de *focus-na* te voorspellen op grond van de context. Het voorbeeld dat gebruikt wordt, bevat nu echter wel informatie over *focus-na*. Dit betekent dat toepassing van regel 6 nu een andere uitwerking heeft: zowel de dimensie *aantal* als de dimensie *focus-na* krijgen nu een echte waarde. Het slot *focus-voor* blijft nog steeds op *onbekend* staan.

Het productiecompilatiemechanisme vindt ook nu weer de regelmaat, zowel bij de *focus-na* *symbool* als bij de *focus-na* *hoeveelheid*. Het model bouwt de volgende regels:

(P 5

```
=goal>
  ISA      voorbeeld
  determinator une
  aantal   onbekend
  focus-voor onbekend
  focus-na onbekend
  rol      tebepalen
  status   begin

→
=goal>
  aantal   meer
  focus-voor onbekend
  focus-na symbool
  rol      introduceren
  status   zin-verwerkt
```

)

(P 6

```
=goal>
  ISA      voorbeeld
  determinator une
  aantal   onbekend
  focus-voor onbekend
  focus-na onbekend
  rol      tebepalen
  status   begin

→
=goal>
  aantal   1
  focus-voor onbekend
  focus-na hoeveelheid
  rol      hoeveelheid-aangeven
  status   zin-verwerkt
```

)

Deze regels zijn geavanceerder, dan Regel 3 en 4, want ze geven meer informatie. Ze leiden niet meer tot een onbekende functie en winnen de competitie van de oudere regels al snel. Ze veroorzaken echter ook overgeneralisatie. Als de eigenlijke functie van de gehoorde determinator *hoeveelheid-aangeven* was, dan kan het model de verkeerde regel gebruiken en de functie *introduceren* begrijpen en omgekeerd. De eerste fout is veel erger dan de tweede. Dit zagen we al in paragraaf 2.3. Ook zagen we dat – als een gevolg hiervan – de hoeveelheid toegekende extra effort bij de twee soorten fouten verschillend is. Het rationele model zoekt altijd naar de snelste en beste regels. Het moet echter een afweging tussen snelheid en correctheid maken, omdat deze zaken niet tegelijkertijd gemaximaliseerd kunnen worden. Deze afweging kan tot gevolg hebben dat het model tevreden is met een snelle regel die meestal, maar niet altijd naar een succesvol antwoord leidt. Het model krijgt geen directe feedback over zijn interpretaties, dus het is al tevreden als het een of andere functie weet toe te kennen. In de simulatie zien dat de overgeneralisatie van regel 6 minder extra effort geeft dan de overgeneralisatie van regel 5. Hierdoor kan regel 6 sterker en sterker worden, ookal leidt hij in het gewone leven soms tot het verkeerde antwoord. In de experimentele situatie leidt regel 6 altijd tot precies het verkeerde antwoord. Dus hoe sterker regel 6 wordt, hoe meer de prestatie op de experimentele taak achteruit gaat. Rond zesjarige leeftijd is de prestatie van het model tot ongeveer 40% gedaald (zie figuur 6).

Aan het begin van de derde fase stopt de daling. De dimensie *focus-voor* is de reddende engel. Het model ziet het gebruik van determinatoren nu als een verschuiving in de focus. Hij registreert de focus-voor in de huidige situatie en voorspelt op grond daarvan, tijdens het horen van de zin met de determinator, de focus-na. Deze gegevens gebruikt hij om de juiste functie en het juiste aantal te bepalen. Deze nieuwe analogiestrategie ziet er zo uit:

(P 7

=goal>

ISA	voorbeeld
determinator	=det
aantal	onbekend
focus-voor	=foc-voor
focus-na	=foc-na
rol	tebepalen
status	begin

➔

+retrieval>

ISA	voorbeeld	(nu een <i>retrieval request</i> met meer voorwaarden)
determinator	=det	
focus-voor	=foc-voor	
focus-na	=foc-na	
status	klaar	

=goal>

status	voorbeeld-aangevraagd
--------	-----------------------

)

(P 8

=goal>	ISA	voorbeeld
	status	voorbeeld-aangevraagd
=retrieval>	ISA	voorbeeld
	aantal	=aant
	rol	=rol
→		
=goal>	aantal	=aant
	rol	=rol
	status	zin-verwerkt

)

Op grond hiervan worden de volgende productieregels aangemaakt:

(P 9

=goal>	ISA	voorbeeld
	determinator	une
	aantal	onbekend
	focus-voor	leeg
	focus-na	hoeveelheid
	rol	tebepalen
	status	begin
→		
=goal>	aantal	meer
	rol	introduceren
	status	zin-verwerkt

)

(P 10

=goal>	ISA	voorbeeld
	determinator	une
	aantal	onbekend
	focus-voor	symbool
	focus-na	hoeveelheid
	rol	tebepalen
	status	begin
→		
=goal>	aantal	1
	rol	hoeveelheid-aangeven
	status	zin-verwerkt

)

Het meest belangrijke aspect van de regels 7, 9 en 10 is, dat ze niet meer in competitie met elkaar zijn. Iedere regel heeft een ander ALS-gedeelte en iedere regel vuurt daardoor in een andere situatie. Deze regels gebruiken weer meer informatie en geven geen aanleiding meer voor overgeneralisatie. Ze weten altijd het goede antwoord te bepalen, zowel in de experimentele als in de normale situatie. Hoe vaker regel 9 wordt gebruikt, hoe beter de experimentele resultaten worden. Uit figuur 6 blijkt, dat aan het eind van de simulatie de prestatie weer net zo hoog is als in het begin, namelijk ongeveer 90%. In figuur 6 staat de uitkomst van een bepaalde run van het model.

2.7 De resultaten van het model op het playrooms-experiment

De resultaten van een run van het model staan in figuur 6 aangegeven, samen met de experimentele resultaten van de proefpersonen. Als we meerdere runs vergelijken, zien we steeds een U-vorm ontstaan. Deze kan echter wel wat grilliger verlopen dan die in figuur 6. Twee afwijkingen die meerdere keren voorkwamen, zijn: een te laag en te laat dieptepunt en een te snelle stijging in de tweede helft van de U-vorm. De te snelle stijging kwam eigenlijk in alle runs voor. Bij het bekijken van de resultaten moet in aanmerking worden genomen dat beide soorten resultaten niet heel makkelijk te vergelijken zijn. Het experiment van Karmiloff-Smith onderzocht verschillende kinderen die ingedeeld waren in leeftijdsgroepen met een breedte van één jaar. De prestaties van de kinderen in één leeftijdsgroep werden gemiddeld. Het model simuleert in feite één bepaald kind dat steeds ouder wordt. Toch vertoont de prestatie van het model redelijk dezelfde trend als die van de proefpersonen.

2.8 Wat het model nog meer kan

Het uitgangspunt bij het ontwikkelen van het model is geweest dat alle aspecten die een rol spelen bij het bepalen van de functies van determinatoren een plaats moesten krijgen. Dit betekent dat het model meer kan dan alleen maar het playrooms-experiment nabootsen. Het model is gebaseerd op de analyse van Karmiloff-Smith (1979a, hoofdstuk 9) over het leren van de pluriformiteit van determinatoren. Alle elementen uit deze analyse modelleren bleek onmogelijk, dus is er een selectie gemaakt. In paragraaf 1 van dit hoofdstuk besprak ik reeds de zes functies die Karmiloff-Smith onderzocht met haar experimenten. Het ontdekken en leren van deze zes functies is als volgt in het model opgenomen: de deictische en de naamgevende functie worden op driejarige leeftijd al min of meer bekend verondersteld. Voorbeelden van deze functies heeft het model dus de hele tijd voor handen. De exoforische functie voor *la* wordt in het simulatieproces geleerd. Hetzelfde geldt voor de numerieke en de non-specifieke functie van *une*. Het model leert, net als in de werkelijkheid, eerst de exoforische functie en de numerieke functie en pas later de non-specifieke functie. Hierbij moet wel vermeld worden dat de productieregel voor de non-specifieke functie wel al eerder aanwezig is, maar deze wordt overschaduwd door de regel voor de numerieke functie en komt dus (nog) niet aan bod. Het model leert ook de anaforische functie van *la*. Dit kun je zien aan de productieregels die ontstaan voor *la*. Het aanleren van de anaforische functie heeft geen invloed op het playrooms-experiment, dus het begrijpen van de anaforische functie blijkt alleen uit de werking van het model in de normale situatie. Het model leert de functies niet alleen te begrijpen, maar ook zelf te gebruiken. Dat is dus de productiekant. Deze productiekant wordt ook al niet gebruikt in het playrooms-experiment, maar toch kunnen we wat interessante zaken uit de analyse van Karmiloff-Smith hiermee verklaren. Zij merkt namelijk op dat er kinderen zijn die in fase 2 vaker de constructie *une des Xs* gebruiken dan *une X*, om verwarring te voorkomen. In het simulatiemodel komt dit ook naar voren. Het model krijgt af en toe een voorbeeld met *une-des* als determinator aangeboden. Het kan deze voorbeelden gebruiken wanneer het zelf de non-specifieke functie wil uitdrukken. Het productiecompilatiemechanisme is,

als het maar voldoende tijd krijgt, ook in staat van weinig voorkomende gevallen de regelmaat te ontdekken. Het gevolg is dat het model een productieregel tot zijn beschikking krijgt die *une-des* als te gebruiken determinator selecteert. Dit leidt er in sommige runs inderdaad toe dat het model zelf veel vaker *une-des* Xs gebruikt, terwijl hij deze constructie niet vaak aangeboden krijgt. Andere aspecten van de productiekant van het model zijn geen aandachtspunt geweest. We zullen in één van de volgende hoofdstukken zien, dat het model zich daar wel uitstekend voor leent.

Een onderdeel van het playrooms-experiment dat buiten het model is gelaten, is de vraag aan de kinderen – nadat ze een antwoord hebben gegeven – of de zin *Prête moi la / une X* (leen me de/een X) ook aan de *andere* pop zou kunnen zijn gericht. Het model simuleert deze taak dus niet, maar met behulp van het model kan wel een verklaring gegeven worden voor de resultaten op dit onderdeel. Uit de resultaten van de proefpersonen blijkt, dat de kinderen in fase 1 vaak vinden dat de zin inderdaad net zo goed tegen de andere pop zou kunnen zijn gezegd. In fase 2 kiezen ze resoluut voor de verkeerde pop en vinden de andere pop geen mogelijkheid. In fase 3 selecteren ze wel weer de juiste pop en nu zijn ze ook zo zeker van hun zaak dat ze terecht aangeven dat de andere pop niet had gekund. Deze trend is met het model te verklaren door te kijken naar de competitie tussen de analogiestrategie en de nieuw ontwikkelde productieregels. In fase 1 ontstaan er wel nieuwe productieregels, die de analogiestrategie beconcurreren, maar deze blijven min of meer even sterk als de analogiestrategie. In deze fase komt het dus vrij veel voor dat het model nog een voorbeeld uit het geheugen ophaalt en deze gebruikt voor analogie. Als de onderzoeksleider nu aan het model zou vragen of de andere kamer ook zou kunnen, dan zal het antwoord van het model inderdaad "ja" zijn, omdat het ook een voorbeeld op kan halen met *une* als één en dus is de kamer met precies één van het gevraagde object ook een mogelijkheid. In de tweede fase heb je dezelfde concurrentie tussen analogiestrategie en nieuwe productieregels. In deze fase winnen de nieuwe productieregels echter veel terrein. Dit betekent dat het kind niet snel terug zal vallen op het opzoeken van een eerder voorbeeld. Daardoor kan het zich minder makkelijk voorstellen dat de andere kamer ook wel goed zou kunnen zijn.

Bovenstaande uiteenzetting laat zien dat het model een redelijk uitgebreid model is met veel potentieel. We zullen de beschrijving van de werking en de resultaten hier echter bij laten, omdat dit hoofdstuk anders veel te lang zou worden. Het model zelf is te vinden op mijn internetpagina: <http://www.ai.rug.nl/~karinz/>. Vanaf het volgende hoofdstuk zullen we de details achter ons laten en ons bezig gaan houden met de vragen: wat hebben we nu eigenlijk aan het determinatorenmodel en wat kunnen we ervan leren?

Hoofdstuk 4: Beschrijving tweede model

H⁰ O⁰ π D^s T U K

4

Beschrijving tweede model

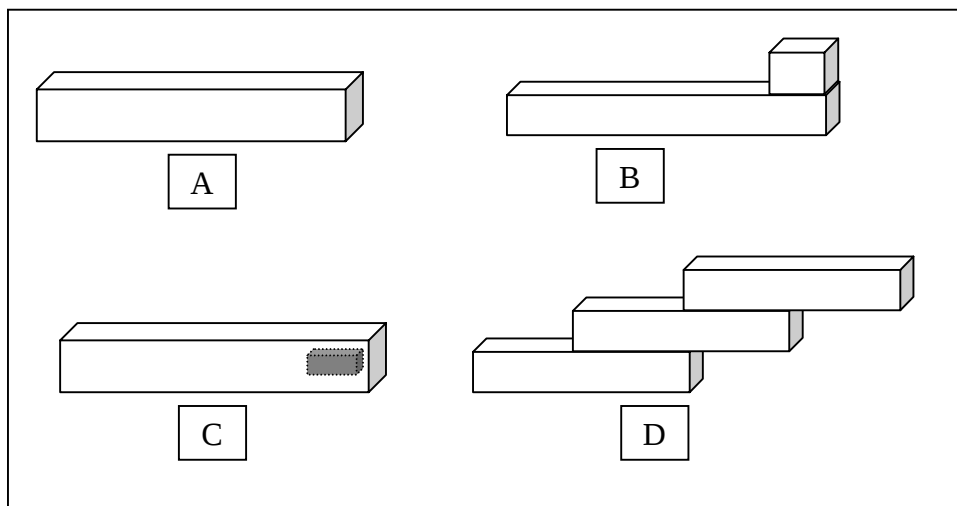
4A: Vergelijking met het determinatorenmodel

1 Het blokkenexperiment

Het blokkenexperiment (Karmiloff-Smith & Inhelder 1974/75) is het tweede experiment dat ik heb geselecteerd om een model van te maken. In dit hoofdstuk zal ik dit experiment wat uitgebreider bespreken en inventariseren in hoeverre we aspecten van het determinatorenmodel zouden kunnen gebruiken voor een blokkenmodel.

1.1 Opzet van het blokkenexperiment

Zevenenzestig kinderen tussen de vier en negen jaar oud krijgen de opdracht een hele verzameling verschillende blokken om de beurt op een dunne metalen rand te laten balanceren. De verzameling blokken is in te delen in vier soorten (zie figuur 7):



Figuur 7: Soorten blokken: (A) lengteblok, (B) verdacht gewichtsblok, (C) niet-verdacht gewichtsblok en (D) onmogelijk blok

- **Lengteblokken.** Deze blokken hebben een uniforme gewichtsverdeling en hebben het evenwichtspunt in het midden.
- **Verdachte gewichtsblokken.** Deze blokken bestaan uit een een lang dun blok met aan één zijde een dik vierkant blok erop geplakt.
- **Niet-verdachte gewichtsblokken.** Bij deze variant lijkt het op het oog alsof je te maken hebt met een lengteblok, maar aan de binnenzijde is één zijde verzwaaard met metaal.
- **Onmogelijke blokken.** Een dergelijk blok bestaat uit meerdere lange blokken die steeds half op elkaar gelijmd zijn en is onmogelijk in evenwicht te brengen op de metalen rand.

De experimentele procedure omvat twee onderdelen. In het eerste onderdeel moeten de kinderen de blokken één voor één op de rand leggen in een zelf gekozen volgorde. In het tweede deel geeft de onderzoeker de volgorde aan. Met een kleinere groep kinderen is een jaar later een herhalingsexperiment gedaan. Het experiment bevat nog meer onderdelen en subtiliteiten, die ik voor de overzichtelijkheid in deze bespreking verder achterwege laat.

1.2 Resultaten van het experiment

Ook wat betreft de resultaten, zal ik mij beperken tot de meest opvallende. Tijdens de sessies met de blokken traden een aantal leereffecten op. Deze effecten waren ook te vinden in de ontwikkeling door de jaren heen. Het belangrijkste effect was, dat de kinderen in de loop van de tijd veranderden van strategie. Eerst maakten ze gebruik van "voel-feedback". Ze kregen de blokken in balans door willekeurig ergens te beginnen en dan telkens de blokken heen en weer te corrigeren totdat het evenwicht was gevonden. Later in de ontwikkeling maken ze geen gebruik meer van voel-feedback, maar gebruiken ze hardnekkig de volgende strategie: leg het blok met het midden op de metalen rand, laat los, als het valt probeer je het nog een keer. Ze schoven het contactpunt soms wel een beetje weg van het midden van het blok, maar nooit erg ver. Als het uiteindelijk met deze strategie niet lukte (dat was natuurlijk het geval met de gewichtsblokken), dan besloten ze dat het blok gewoon niet plaatsbaar was en gaven het op.

Deze hardnekkige strategie houdt in de ontwikkeling en ook tijdens de sessie lang stand, maar nog iets oudere kinderen slagen er uiteindelijk wel in een andere strategie te ontwikkelen. Ze onderzoeken het blok eerst op de gewichtsverhoudingen en plaatsen het vervolgens op een punt niet ver van het zwaartepunt op de metalen rand. Hieruit blijkt dat ze uiteindelijk deze taak (weer) meester zijn. Ze kennen dan in ieder geval een intuïtieve versie van de *Law of Torque*.

2 Overeenkomsten en verschillen met het playrooms-experiment

2.1 Micro-ontwikkeling en macro-ontwikkeling

In het blokkenexperiment is veel ruimte om te experimenteren en te proberen. Hierdoor (en doordat dezelfde blokken nog een keer terugkomen, maar dan in een vaste volgorde) gebeurt het vaak dat het kind in een sessie een leerproces doormaakt. Dit leerproces speelt zich dan af op een microniveau. Tevens is uit de verschillen tussen kinderen op verschillende leeftijden ook een ontwikkelingsproces waargenomen, dat in grote lijnen hetzelfde verloopt. Dat laatste is dus een macro-ontwikkeling. In het playrooms-experiment is echter alleen sprake van een macro-ontwikkeling. De kinderen worden getest door middel van het experiment, maar vertonen geen leereffecten tijdens het experiment. Om het blokkenexperiment goed te kunnen vergelijken met het playrooms-experiment, moeten we ons dus op de macro-effecten concentreren.

2.2 U-vorm in de resultaten

De resultaten van beide experimenten vertonen een U-vorm. Op jonge leeftijd weten de kinderen de taak al tot een goed einde te brengen. Als ze iets ouder zijn, zakt hun prestatie opeens vrij snel en weer later in de ontwikkeling komen ze weer terug op het oude niveau. Deze U-vorm kan ons veel vertellen over de strategieën die de kinderen gebruiken. In hoofdstuk 5 zullen we nader bekijken of de beide U-vormen een zelfde soort verklaring hebben.

Daaraan voorafgaand zal ik er eerst nog een ander experiment (met bijbehorend computermodel) bespreken, dat ook veel overeenkomsten vertoont met het blokkenexperiment, namelijk de Balance Scale Task.

3 Overeenkomsten en verschillen met de Balance Scale Task

3.1 De Balance Scale Task

In hoofdstuk 2 kwam de Balance Scale Task (BST) al ter sprake. Deze taak lijkt erg op de taak in het blokkenexperiment. Een kind krijgt een balansschaal met twee armen te zien met verschillende gewichtjes erop geplaatst, op verschillende afstanden van de voet van de schaal. Het kind moet beoordelen welke van de twee armen van de schaal naar beneden zal gaan. Als er evenwicht is, zullen beide armen omhoog blijven. Siegler (1981) heeft regels opgesteld, die de strategieën van de kinderen in verschillende leeftijdsfases beschrijven. Op grond van deze regels hebben Van Rijn, Van Someren en Van der Maas (in press) een model in ACT-R gemaakt. Uit de regels en het model blijkt dat de kinderen eerst alleen letten op de gewichten op beide armen en niet op de afstand die ze hebben tot de voet van de balansschaal. Als ze ouder worden, ontwikkelen ze meer geavanceerde regels, die als de gewichten op beide armen even zwaar zijn, het aspect afstand erbij betrekken. Pas na instructie en wanneer ze kunnen vermenigvuldigen, zijn ze in staat alle gevallen met verschillende afstanden en gewichten goed op te lossen.

3.2 Overeenkomst: het ontdekken van relevante dimensies

Bij de Balance Scale Task en bij het blokkenexperiment spelen dus de dimensies *lengte* (oftewel *afstand*) en *gewicht* een rol. In beide gevallen neemt het kind eerst slechts één van de dimensies in ogenschouw. Later wordt dat gecombineerd met de tweede dimensie. Het grappige is, dat de Balance Scale Task kennelijk de kinderen als eerste aan de dimensie *gewicht* doet denken, terwijl in het blokkenexperiment de *lengte* de meest opvallende dimensie is. De kinderen beginnen aan zo'n taak met een schat aan eerder opgedane ervaringen. Op grond van die ervaringen, zullen ze een experimentele setting op een bepaalde manier interpreteren. In de ene setting herkennen ze dat de dimensie *gewicht* van belang is en in de andere setting herkennen ze de *lengte* als een dimensie om op te letten. Karmiloff-Smith en Inhelder (1974/1975) beweren dat jonge kinderen in balanssituaties nog niet de rol van de dimensie *gewicht* kennen. Uit onze vergelijking met de Balance Scale Task blijkt dat dit niet zonder meer waar is. Het is eerder zo dat jonge kinderen eerst proberen met behulp van één dimensie de taak te volbrengen. Als ze later door hebben dat dit niet goed genoeg werkt, gaan ze op zoek naar een tweede relevante dimensie. Welke dimensie ze als eerste ontdekken is afhankelijk van waar de experimentele situatie hen aan doet denken. Later in dit hoofdstuk en ook nog in volgende hoofdstukken, zullen we uitgebreider ingaan op hoe dat zoeken en ontdekken van relevante dimensies dan precies gaat.

4 Wat kunnen we gebruiken van het determinatorenmodel?

In deze paragraaf zal ik de discussie over het blokkenexperiment van Karmiloff-Smith en Inhelder bespreken. Door deze discussie te vergelijken met mijn analyse van het playrooms-experiment, hoop ik aan te kunnen geven welke elementen uit het determinatorenmodel bruikbaar zouden kunnen zijn voor het blokkenmodel.

4.1 De strategieën

Karmiloff-Smith en Inhelder gebruiken het blokkenexperiment als illustratie voor hun theorie over hoe kinderen cognitieve taken leren. Ze beschrijven hoe de kinderen eerst ieder blok als een aparte uitdaging zien. Ze laten zich nog niet beïnvloeden door eerdere successen of tegenvallers. Ze krijgen het voor elkaar op grond van telkens proberen en bijstellen ieder blok (behalve

natuurlijk de onmogelijke blokken) te laten balanceren. Na een tijdje krijgen ze door dat wat de blokken doen niet alleen afhankelijk is van hun eigen acties, maar ook van de eigenschappen van de blokken. Nu onderzoeken ze de blokken op allerlei manieren, om de eigenschap te ontdekken die balans mogelijk maakt. In deze fase maken ze geen gebruik meer van voelfeedback, maar proberen ze een goede oplossing te beredeneren. Ze gaan nu ook gebruik maken van eerdere successen, maar dat werkt niet altijd goed, omdat niet alle blokken hetzelfde zijn. Dit gebruik maken van eerdere successen zie je ook in het determinatorenmodel. Om een determinator te begrijpen, zoekt het model een voorbeeld op van een situatie waarin dezelfde determinator werd gehoord of uitgesproken. Vervolgens trekt het model een analogie tussen die situatie en de huidige situatie en baseert daarop zijn begrip van de zojuist gehoorde determinator. In het blokkenmodel kunnen we gebruik maken van dezelfde structuur als we willen modelleren hoe kinderen hun acties baseren op eerdere successen met blokken in balans.

In hun zoektocht naar de eigenschap die balanceren mogelijk maakt, ontdekken ze de dimensie *lengte*. Dit maakt het mogelijk structuur aan te brengen in een heel aantal succesvolle balanssituaties. Het blijkt dat heel veel blokken in balans zijn, als je het contactpunt met de metalen rand precies in het midden van het blok (dus op de helft van de lengte) situeert. De kinderen ontwikkelen nu een theorie over waar een blok in balans is. Deze theorie noemen Karmiloff-Smith en Inhelder een *theorie-in-actie*. De kinderen kunnen de theorie nog niet goed onder woorden brengen, maar ze passen hem in hun acties wel systematisch toe. Ze doen dat zo systematisch, dat ze blokken die ze eerst wel goed deden (bijvoorbeeld niet-verdachte gewichtsblokken) opeens fout gaan doen. Ze blijven vasthouden aan hun ontdekte theorie-in-actie en doen foute resultaten af als "onmogelijk om te laten balanceren". Dit leidt tot de daling in prestatie (het eerste deel van de U-vorm). In het determinatorenmodel treedt een zelfde achteruitgang in prestatie op. Ook nu heeft het kind een theorie ontwikkeld – in de vorm van een productieregel – die niet altijd opgaat, maar wel altijd wordt toegepast. Als het kind het woord *une* hoort interpreteert het dat als *één*. Omdat deze regel snel is en een hoge activatiewaarde heeft, wordt deze meestal verkozen boven het zwaardere analogieproces. In het blokkenexperiment is dus een theorie-in-actie ontstaan, die in een ACT-R blokkenmodel de vorm kan krijgen van een productieregel. Voorwaarde voor het ontwikkelen van deze regel is echter wel dat het kind de dimensie *lengte* kent en als relevant ziet. In het determinatorenmodel was het ontdekken van twee dimensies, namelijk *aantal* en *focus-na*, ook een voorwaarde voor het ontstaan van de "allesbepalende productieregel". Deze manier van het leren van een nieuwe productieregel kan dus ook van pas komen bij het blokkenmodel.

In het blokkenexperiment krijgt het kind de kans om verschillende strategieën na elkaar te proberen op een blok. Als de theorie-in-actie niet tot het gewenste resultaat leidt, probeert het kind vaak hetzelfde contactpunt als bij het laatste succesvol geplaatste blok. Het valt dus in feite weer terug op de analogiestrategie. In het playrooms-experiment krijgt het kind geen herkansing op een onderdeel, dus een dergelijk gang van zaken zit niet in het determinatorenmodel. Het zou er echter makkelijk aan toegevoegd kunnen worden. Als in het blokkenmodel zo'n zelfde analogiestrategie wordt ingebouwd, is daarop terugvallen dus makkelijk te realiseren.

Het tweede deel van de U-vorm – de opgaande lijn in prestatie – is een onderdeel waar veel haken en ogen aanzitten. Zowel in het blokkenmodel als in het determinatorenmodel moet een verfijning van de algemene theorie daarvoor zorgen. Hoe dat zou kunnen gaan, zien we in de volgende subparagraaf.

4.2 Omhoog kruipen uit het dal

Karmiloff-Smith en Inhelder stellen dat het frequent tegenkomen van tegenvoorbeelden alleen niet genoeg is om het gedrag van het kind weer te veranderen. Ze onderscheiden drie interacterende processen die een verandering in de theorie-in-actie mogelijk maken:

- steeds meer regelmatigheid in de tegenvoorbeelden,
- veranderingen in algemene conceptuele vaardigheden van het kind,
- integratie (op een bewustere manier) van voelfeedback in het oplossingsproces.

In de vorige subparagraaf merkte ik al op dat de opgaande lijn in de U-vorm wordt bewerkstelligd door een verfijning van de algemene theorie. Karmiloff-Smith en Inhelder geven aan dat deze verfijning alleen kan plaatsvinden als er eerst een voldoende stevige, strikt toegepaste theorie-in-actie is gevormd. Als het kind deze theorie-in-actie heeft gevormd, heeft het namelijk begrepen dat het moet zoeken naar een overkoepelend iets, dat voor alle blokken opgaat. Pas als het kind de theorie-in-actie dan vervolgens vaak en regelmatig heeft toegepast, is het in staat de regelmaat in de tegenvoorbeelden te vinden. Karmiloff-Smith en Inhelder beschrijven een proces dat gaat van het negeren van tegenvoorbeelden ("Deze blokken zijn gewoon niet in balans te krijgen") via het proberen te vormen van een extra losstaande theorie naar een nieuwe theorie die de oude theorie-in-actie aanpast en verfijnt. Het kind ontdekt de regelmaat in de verdachte gewichtsblokken. De algemene conceptuele ontwikkeling van het kind heeft het mogelijk gemaakt dat het kind op zoek gaat naar een tweede dimensie die misschien van belang kan zijn bij de blokken. In andere situaties heeft het al ervaren dat gewicht soms een essentiële factor is. Nu is het kind dus in staat om een nieuwe theorie-in-actie te vormen, die *gewicht* in aanmerking neemt. Deze uitbreiding van het blikveld zorgt er echter niet voor dat de niet-verdachte gewichtsblokken ook goed aangepakt worden. Pas als het kind doorheeft dat het bij deze blokken weer terug kan vallen op voelfeedback, komt de goede oplossing in zicht. De voelfeedback wordt nu niet alleen gebruikt, maar ook geïncorporeerd in de theorie-in-actie. Nu is het kind in staat de twee ontwikkelde theorieën-in-actie – eentje over lengte en eentje over gewicht – samen te voegen en te komen tot één, nauwer gedefinieerde theorie in actie die inhoudt dat je zowel lengte als gewicht in de gaten moet houden, ook bij blokken waarbij het gewicht niet zichtbaar ongelijk verdeeld is.

Nu gaan we weer over tot de vergelijking met het determinatorenmodel. Ook daarin kruipt de prestatie op het woord *une* weer op uit het dal. Ook hier zien we dat het kind (of het model) de theorie eerst goed moet hebben ontwikkeld en toegepast, voordat het de regelmaat in de tegenvoorbeelden kan ontdekken. De algemene cognitieve ontwikkeling die een voorwaarde vormt, is in dit geval het vermogen naar nog een derde dimensie te zoeken. Daarnaast heeft het kind inmiddels ervaren dat de dingen die in de vorige zin gezegd zijn, of wat er gezegd is voordat de determinator kwam, een voorspelling kunnen geven over de rol van de determinator. Op dezelfde manier heb je immers informatie uit de vorige zin nodig als je een zin als "Hij is aardig." wilt begrijpen. Deze twee ontwikkelingen maken het mogelijk voor het model om de dimensie *focus-voor* te ontdekken en te bepalen. Met deze nieuwe dimensie vormt het model dan weer allerlei nieuwe productieregels. Dit is vergelijkbaar met het ontstaan van een losstaande nieuwe theorie-in-actie. Maar er ontstaan ook nieuwe productieregels, die de eerdere dominante productieregel nauwer maken. Deze nieuwe productieregels zijn dus het laatste stadium in het proces: de tweede, nieuw ontstane theorie-in-actie is samengegaan met de oude theorie-in-actie en er is een succesvollere, sterkere theorie-in-actie uit voortgekomen.

Al met al kunnen we dus concluderen dat ook de opgaande lijn van de U-vorm in het blokkenmodel redelijk analoog aan de opgaande lijn in het determinatorenmodel kan worden geïmplementeerd. In hoofdstuk 4B: *Mogelijke werking van het blokkenmodel* zullen we zien hoe dat dan concreet uitpakt. In dit hoofdstuk gaan we nog even verder met vergelijkingen maken en overeenkomsten zoeken, want Karmiloff-Smith en Inhelder zelf zien ook een link tussen de ontwikkeling in het blokkenexperiment en taalontwikkeling.

4.3 Theorieën-in-actie en theorieën-in-taal

Taalontwikkeling doorloopt volgens de auteurs globaal hetzelfde patroon als hierboven is beschreven voor het blokkenexperiment. Eerst weten kinderen correcte uitingen te doen, die nog niet "in de war gemaakt" zijn door regels. Langzaam aan ontdekken ze patronen in de

linguïstische omgeving en vormen ze *theorieën-in-taal*. Overgeneralisatie maakt dan dat ze tijdelijk fouten gaan maken in taalconstructies die ze eerst wel goed deden. Deze overgeneralisatieperiode maakt dan echter de weg vrij voor het ontdekken van de regelmaat in de tegenvoorbeelden. Als de juiste linguïstische vormen dan weer tevoorschijn komen, dan zijn het geen items die maar buiten beschouwing gelaten worden, maar onderdelen van een meeromvattend systeem. De theorie-in-taal die Karmiloff-Smith hierbij als voorbeeld aanhaalt, is de stam-plus-*ed*-theorie om verleden tijden te vormen (in het Engels). We zagen al in één van de eerdere hoofdstukken dat van deze, wederom U-vormige, ontwikkeling een model in ACT-R is gemaakt door Taatgen en Anderson (2002). In dit model wordt de U-vorm op dezelfde (globale) manier bewerkstelligd als in het determinatorenmodel en in het toekomstige blokkenmodel. In hoofdstuk 5A: *Terug naar de RR-Theorie* zullen we zien wat deze algemene trend in modelopzet ons kan leren over cognitieve ontwikkeling in het algemeen. Maar voordat we daartoe overgaan, zal ik in het volgende hoofdstuk eerst nog een opzet maken voor het blokkenmodel. Zodra er dan tijd en gelegenheid is, kan die opzet gebruikt worden voor het werkelijk bouwen van een blokkenmodel.

4B: Mogelijke werking van het blokkenmodel

1 Bouwstenen

Uit de vergelijking die ik heb gemaakt tussen het determinatorenmodel en het blokkenmodel (en tussen het playrooms-experiment en het blokkenexperiment) blijkt dat er op een abstract niveau overeenkomsten aan te wijzen zijn tussen beide modellen. Om het blokkenmodel op grond daarvan op poten te zetten, onderscheid ik een aantal bouwstenen, waaruit het model opgebouwd kan worden: *de beginsituatie*, *de dimensies die ontdekt moeten worden* en *de achterliggende cognitieve ontwikkeling*. Iedere bouwsteen kunnen we maken door onderdelen van het determinatorenmodel te vertalen naar de wereld van de blokken. Voor iedere bouwsteen zal ik hieronder in een subparagraaf aangeven waar je dan op uitkomt. In paragraaf 5 zullen we zien hoe deze drie bouwstenen bijdragen tot het ontstaan van nieuwe productieregels, die op hun beurt de U-vorm in prestatie moeten verklaren.

2 De beginsituatie

De simulatie begint op het moment dat het kind ieder blok nog afzonderlijk benadert. Ze weten de taak goed uit te voeren, dus zitten ze al op het *behavioral mastery*-niveau. De strategie, die het kind in deze eerste fase gebruikt, zou je als een algoritme weer kunnen weergeven:

1. *Leg het blok op de metalen rand met een willekeurig contactpunt.*
2. *Hou het aan beide uiteinden vast en laat het een klein beetje los.*
3. *Voel welke kant het blok op valt.*
4. *Als het blok geen enkele kant op valt, ben je klaar.*
5. *Als het blok naar een kant dreigt te vallen, pak het dan weer vast.*
6. *Als het blok naar links dreigde te vallen, schuif het blok dan wat naar rechts.
(Het contactpunt komt dan meer naar links op het blok te liggen).*
7. *Als het blok naar rechts dreigde te vallen, schuif het blok dan wat naar links.
(Het contactpunt komt dan meer naar rechts op het blok te liggen).*
8. *Ga terug naar stap 2.*

Hierbij moet je dan wel aannemen, dat deze strategie al bekend is aan het kind op grond van eerdere acties, waarbij het doel ook laten balanceren was. Dit is niet zo'n rare aanname, want uit voorstudies van Karmiloff-Smith en Inhelder blijkt dat de kinderen inderdaad goed in staat zijn om bijvoorbeeld een toren van blikken te bouwen.

We zagen al dat de kinderen zich ook wel laten leiden door eerdere successen, zodra ze een aantal keren succesvolle balanceeracties hebben uitgevoerd. Dus in de eerste fase van het proces wisselen ze het gebruik van het "voel-algoritme" af met een strategie die een eerder succesvol voorbeeld ophaalt. Dit komt overeen met de *instance theory* van Logan (1988). De kinderen onthouden de eerdere acties en hun uitkomsten en zoeken een eerdere succesvolle actie op in het geheugen als beginpunt voor een nieuwe balanceeractie. Als dit niet tot een succes leidt, valt het kind terug op het voel-algoritme. Dit betekent dat we, net als in het determinatorenmodel, voorbeelden moeten onthouden van eerder geslaagde acties. Het model kan dan door middel van een analogieprocedure gebruik maken van deze eerdere acties. Een voorbeeld moet in ieder geval twee slots bevatten: object en contactpunt. In het slot object wordt aangegeven dat het object een blok was en in contactpunt wordt aangegeven welke plek op het blok was gebruikt als contactpunt met de metalen rand. Dit laatste slot bevat eigenlijk een vaag

soort representatie van die plek, bijvoorbeeld in termen van "midden van het blok", "links van het midden", "heel dicht bij het rechteruiteinde". Verder kan in een voorbeeld informatie opgeslagen worden over het soort blok. Deze informatie is in de eerste fase echter nog niet bekend, want het kind deelt de blokken nog niet in in soorten. De analogiestrategie is in deze fase dan vervolgens heel simpel:

Zoek een succesvol voorbeeld op met als object "blok".

Neem de waarde bij het slot contactpunt over voor het huidige doel.

Vervolgens kan het model dan het blok plaatsen. Als er nog gecorrigeerd moet worden, dan kan hij te werk gaan op dezelfde manier als beschreven in het voel-algoritme. De hierboven beschreven analogieregels komen dus in feite in de plaats van de regel *Leg het blok op de metalen rand met een willekeurig contactpunt*. Het model maakt dus nog geen indeling in soorten blokken. Om toch tot een goed resultaat te komen, zal hij dus gebruik moeten blijven maken van de voelfeedback. Hieronder zullen we zien dat deze feedback in een latere fase niet meer gebruikt wordt door het model en dat de prestaties mede daardoor ook teruglopen.

3 De dimensies die ontdekt moeten worden

Een tweede bouwsteen voor ons model wordt gevormd door de dimensies, die in de loop van de tijd worden ontdekt. Deze dimensies geven, net als in het determinatorenmodel, aanleiding tot het indelen van het model in drie situaties, die ik weer situatie A, B en C zal noemen. In situatie A zijn we in de beginsituatie. De relevante dimensies *lengte* en *gewicht* zijn nog niet bekend. Het model gebruikt voelfeedback om het blok te laten balanceren. In situatie B gaat het kind systematisch op de dimensie lengte letten, omdat het nu wel weet dat deze eigenschap van blokken, onafhankelijk van de eigen acties op het blok, invloed heeft op de balans. Dit maakt in eerste instantie de weg vrij voor het gebruik maken van eerdere voorbeelden en het onthouden van contactpunten. Daarna kan deze analogiestrategie geproceduraliseerd worden tot een productieregel, die de theorie-in-actie weergeeft. Hoe deze eruit ziet, vertel ik later.

In situatie C is de dimensie gewicht ook als relevant herkend. Nu begint het model in zijn zoektocht voor systematiek ook de regelmaat in de gewichten van de blokken te zoeken. Hierdoor is het model in staat de blokken in te delen in verschillende soorten en meer geavanceerde analogieregels voor de blokken te gebruiken. Hieruit kunnen dan weer betere productieregels ontstaan. De meer geavanceerde analogieregels zien er dan zo uit:

Bepaal of er aan de ene kant van het blok meer gewicht zit dan aan de andere kant van het blok.

Vraag een voorbeeld op uit het geheugen, waarbij de verdeling van gewicht hetzelfde was (mogelijkheden: uniform, meer gewicht links, meer gewicht rechts).

Neem van dat voorbeeld weer het contactpunt over voor het huidige doel.

4 De achterliggende algemene cognitieve ontwikkeling

Karmiloff-Smith en Inhelder beschrijven dat de kinderen eerst nog helemaal niet door hebben dat het balanceren van blokken geregeld is via een natuurwet, die afhankelijk is van de eigenschappen van het blok en niet alleen van de acties van het kind zelf. Dag in dag uit krijgen ze echter constant te maken met allerlei effecten, die toch wel regelmaat vertonen. Dit leidt tot het ontwikkelen van een zeer algemene strategie, waarbij kinderen de wereld onderzoeken op zoek naar eigenschappen die de regelmatige effecten veroorzaken. Zodra ze deze algemene strategie tot hun beschikking hebben, kunnen ze deze ook gaan toepassen in het blokkenexperiment. Het

blijkt dan ook dat ze nu een soort subdoel hebben aangemaakt, namelijk: onderzoek de eigenschappen van het blok. Als ze nog wat jonger zijn, dan raken ze hier zo van in de ban, dat ze vergeten weer terug te gaan naar het eigenlijke doel: het laten balanceren van het blok. Maar als ze ouder worden weten ze wel dit hoofddoel weer terug te vinden en beginnen ze een theorie-in-actie te ontwikkelen waarop ze hun handelen steeds meer gaan baseren. In het ACT-R model is de invloed van deze algemene cognitieve ontwikkeling terug te vinden in het beschikbaar komen van de dimensie *lengte*. Ze kunnen nu eerdere successen opslaan door het contactpunt van het blok op te slaan als een deel van de lengte van het blok (oftewel een plaats op het blok in de lengterichting). Het proceduralisatieproces zorgt er dan voor dat ze doorkrijgen dat *spatial symmetry* (links en rechts steekt het blok evenveel uit) wel eens de regel zou moeten zijn. Deze regel wordt na zijn ontstaan steeds sterker en steeds vaker toegepast. Maar de ontwikkeling gaat door. Het kind blijft zoeken naar regelmaat en gaat daardoor ook langzaam aan de regelmaat in de uitzonderingen ontdekken. Op grond van andere ervaringen weet het inmiddels dat het ook zo kan zijn dat er een tweede dimensie is, die je ook in aanmerking moet nemen. Specifieke ervaring met dingen als de wip of de weegschaal, zorgen ervoor dat het kind begint in te zien dat ook *gewicht* van belang kan zijn bij het laten balanceren van dingen. Het kind leert onderscheid te maken tussen blokken met een uniforme gewichtsverdeling en blokken met een ongelijke gewichtsverdeling. Hierbij herkennen ze eerst dat de verdachte gewichtsblokken een niet-uniforme verdeling hebben. Pas later ontdekken ze ook de ware aard van de niet-verdachte gewichtsblokken. In het blokkenmodel geven we deze ontwikkeling vorm, door de dimensie *gewicht* beschikbaar te stellen. Vanaf dat moment kunnen er regels vuren die de gewichtsverdeling van een blok beoordelen. Ook kunnen er dan meer geavanceerde productieregels vuren die de gewichtsverdeling van de blokken meeneemt in het zoeken naar een passend voorbeeld. Op deze manier is het model uiteindelijk in staat de blokken in soorten in te delen en voor alle soorten goede regels te hanteren. Hieronder zullen we zien welke regels dat dan zijn.

5 De productieregels die kunnen ontstaan

In situatie A is er maar één strategie en de productieregels die deze strategie uitvoeren zijn al beschikbaar. In situatie B proceduraliseert het model de analogieregels. Dit leidt tot de volgende productieregel, die de theorie-in-actie in die fase voorstelt:

ALS object = blok DAN contactpunt = midden.

Deze regel is dus van toepassing op alle blokken, maar leidt in heel veel gevallen niet tot een goed resultaat. Het model valt bij een mislukking echter niet terug op de strategie met de voelinformatie, maar geeft het gewoon op. Dit heeft tot gevolg dat de prestatie daalt, zodra bovenstaande productieregel meer toegepast gaat worden. Hiermee is het neergaande gedeelte van de U-vorm verklaart.

In situatie C maakt het model bij het trekken van de analogie gebruik van meer kennis, namelijk de kennis over de gewichtsverdeling van het blok. Productiecompilatie leidt dan tot het ontstaan van de volgende nieuwe productieregels:

ALS object = blok EN gewicht = gelijk-verdeeld DAN contactpunt = midden.

ALS object = blok EN gewicht = meer links DAN contactpunt = links-van-het-midden.

ALS object = blok EN gewicht = meer rechts DAN contactpunt = rechts-van-het-midden.

De prestatie neemt nu weer toe (opgaande gedeelte van de U-vorm), want deze regels leiden bij bijna alle blokken tot succes. Alleen de onmogelijke blokken blijven onmogelijk!

6 We zijn er bijna

Nu de bouwstenen voor het blokkenmodel ontworpen zijn, is het model eigenlijk al half gebouwd. Het is jammer dat er niet genoeg tijd is dit model ook werkelijk te bouwen, want dan zouden we de bouwstenen ook aan de werkelijke resultaten van het experiment kunnen toetsen. Wellicht dat in de toekomst ikzelf of iemand anders dit karwei zou kunnen afmaken. Vooralsnog zullen we deze opzet voor het blokkenmodel niet verder uitwerken, maar ook niet laten voor wat het is. We kunnen het namelijk goed gebruiken om conclusies te trekken in het grotere kader van de RR-theorie. Het is tijd om daar weer naar terug te keren!

Hoofdstuk 5: Analyse van de modellen

H O O π D ψ T U K

5

Analyse van de modellen

5A: Terug naar de RR-Theorie

1 Vertaling van de RR-theorie naar ACT-R

1.1 Globale vertaling van de niveaus en de overgangsmechanismen

Nu we twee modellen hebben ontworpen van RR-experimenten, kunnen we op een rijtje zetten hoe we nou eigenlijk een vertaling hebben gemaakt van de RR-theorie naar ACT-R. In wat voor vorm komen de representaties op ieder niveau in ACT-R terug en welke mechanismen veroorzaken de overgangen tussen de niveaus? We beginnen weer met niveau I. De kennis is dan nog impliciet en taakspecifiek. Het gedrag op dit niveau kan, zoals ik al aangaf in hoofdstuk 4, beschreven worden als *instance-based learning* (Logan, 1988). Bij deze vorm van leren maakt de persoon gebruik van twee strategieën: een arbeidsintensief algoritme (bijvoorbeeld tellen) en het zich herinneren van eerdere uitkomsten van specifieke instanties (voorbeelden). Vertaald naar ACT-R betekent dit dat het model specifieke productieregels tot zijn beschikking heeft, die het algoritme representeren en daarnaast productieregels heeft die een geschikt voorbeeld uit het declaratieve geheugen zoeken en dit voorbeeld gebruiken (Lebiere, Wallach & Taatgen, 1998). Het model kan op verschillende manieren gebruik maken van zo'n voorbeeld. Als het voorbeeld identiek is aan het huidige doel, dan kan het model direct het antwoord bepalen. Als dat niet zo is, dan kan het model het voorbeeld als bron voor een analogieproces gebruiken (Taatgen & Anderson, 2002). De representaties op niveau I hebben dus de vorm van voorbeelden in het declaratieve geheugen. De strategie die op deze representaties opereert, is een arbeidsintensieve analogiestrategie.

Op niveau E1 zijn de representaties minder specifiek van vorm. Het cognitieve systeem gebruikt geen losse instanties, maar meer algemeen toepasbare regels. Een combinatie van de analogiestrategie die we al hadden en het productiecompilatiemechanisme van ACT-R leidt tot een mechanisme dat regelmatigheden in voorbeelden probeert te zoeken en dat de instanties transformeert naar nieuwe, algemene productieregels (Taatgen & Anderson, 2002). Het gevolg hiervan is dat de representaties op het E1-niveau in feite die nieuwe productieregels zijn, die door het productiecompilatiemechanisme zijn gebouwd. Maar productieregels zijn een vorm van procedurele kennis. Ze zijn niet voor het systeem zelf toegankelijk. Welke regels het cognitieve systeem heeft en hoe die eruit zien, kan het systeem niet aangeven. Om de overgang naar niveau E2/3 te maken, waarin het systeem de kennis kan verwoorden, moeten de productieregels dus weer worden herschreven tot chunks in het declaratieve geheugen. Deze nieuwe chunks staan dan in een duidelijke relatie tot elkaar. Ze vormen onderdelen van een groter systeem, bijvoorbeeld het taalsysteem van lidwoorden. Ze kunnen onder woorden gebracht worden en zijn ook te gebruiken in andere cognitieve taken.

2 Leren in een U-vorm

2.1 Vergelijking tussen de RR-verklaring en de verklaring van het determinatorenmodel

In hoofdstuk 3 zagen we al hoe Karmiloff-Smith met behulp van de concepten uit de RR-theorie de U-vorm in prestatie op de playroomstaak verklaart. In deze paragraaf zullen we haar verklaring vergelijken met een verklaring op basis van het determinatorenmodel. Op een wat abstracter niveau kunnen we het ontwikkelingsproces van het determinatorenmodel als volgt beschrijven. Tijdens de gehele simulatieperiode gebruikt het model een analogiestrategie om de functie van de determinator te achterhalen. Hiervoor zoekt het steeds actief naar een geschikt voorbeeld. In de

eerste fase zoekt het model nog niet zo gericht naar een bepaald soort voorbeeld. Het vindt gewoon het voorbeeld met de hoogste activatiewaarde. De context en de geactiveerde associaties die het model heeft op grond hiervan zorgen ervoor dat de voorbeelden die het meest bij de huidige context passen, ook meestal de hoogste activatiewaarde hebben. Dit betekent dat jonge kinderen wel al kennis op niveau-I hebben van welke aspecten van de context belangrijk zijn, maar nog niet op een expliciet niveau. In ACT-R kun je dit voor elkaar krijgen door in de slots van een voorbeeld-chunk al te definiëren welke aspecten van de omgeving van belang zijn. Deze liggen vast in slotnamen en op deze slotnamen en hun waarden kan vervolgens een verspreiding-van-activatie-proces plaatsvinden, zodra het kind in een bepaald situatie komt. Anderson & Lebiere (1998) geven een uitgebreide uitleg over *spreading-activation* en associaties in ACT-R. Het gevolg van deze processen is dat het model vaak "toevallig" – maar dus ook weer niet toevallig – een juist soort voorbeeld gebruikt voor de analogie. De twee functies van *une* spelen een rol in verschillende contexten en worden niet door elkaar gehaald. De productieregels die het model leert in deze fase hebben weinig invloed op het gedrag van het model. In de tweede fase, levert de analogiestrategie meer informatie. Ook nu vindt er proceduralisatie plaats, die het ophalen van een voorbeeld overbodig maakt. Er ontstaan nu twee nieuwe productieregels voor *une*, die qua vorm erg op elkaar lijken. Deze regels leiden tot generalisatie, maar ook tot verwarring. Beide regels zijn te breed toepasbaar en daardoor ontstaat overgeneralisatie. Eén van de twee regels leidt tot overgeneralisatie, die niet zo schadelijk is voor het begripproces. Deze wint de competitie. Hij leidt in het dagelijks leven maar tot kleine problemen. In het playrooms-experiment leidt hij echter tot een dramatische daling in prestatie. Het feit dat deze regel nog niet vrij van alle problemen en verwarring is, zorgt ervoor dat het model nog niet stopt met zoeken naar nieuwe dimensies. Fase 3 begint als de dimensie *focus-voor* ter beschikking komt. Nu leert het model expliciet twee verschillende situaties te onderscheiden, een *introduceren*-situatie en een *hoeveelheid-aangeven*-situatie. Gespecialiseerde regels voor iedere situatie ontstaan dankzij het productiecompilatiemechanisme. Nu is het model in staat probleemloos en snel zinnen met *une* te begrijpen en te produceren. De afweging tussen snelheid en correctheid is geoptimaliseerd.

De RR-theorie beschrijft de ontwikkeling die het determinatorenmodel simuleert als een proces van een impliciet niveau naar steeds explicietere niveaus. In ons model is de kennis in de eerste fase impliciet aanwezig in de voorbeelden. De nieuwe productieregels die ontstaan in fase 2 (zie P 5 en P 6 in hoofdstuk 4) veroorzaken een generalisatie en daardoor ook een abstractie naar het E1-niveau. Dit is echter niet het hele verhaal. We kunnen concluderen dat het determinatorenmodel eigenlijk een iteratief RR-proces is. Iedere keer als er nieuwe dimensies beschikbaar komen, probeert het model de nieuwe verbanden die het heeft gevonden te herschrijven. Deze nieuwe verbanden zijn gebaseerd op een nieuwe, meer geavanceerde analogiestrategie. In de eerste fase komt het model nog niet ver met herschrijven en leiden de nieuwe productieregels wel tot een soort van generalisatie, maar niet tot een verandering in gedrag. Er zou wel een verandering in gedrag merkbaar kunnen zijn, wanneer de nieuwe productieregels de overhand zouden krijgen boven de analogiestrategie. Maar in fase 1 komt het niet zo ver. De nieuwe productieregels in fase 2 leiden wel tot een sterke generalisatie. Er treedt zelf overgeneralisatie op. Het model valt nu veel minder vaak terug op de analogiestrategie en daardoor krijgt de *une*-als-telwoord regel vrij spel. In fase 3 kan het representatieproces nog verder doorzetten. Het begint weer met proceduralisatie van de analogiestrategie. Dit maakt een einde aan de overgeneralisatie. Het model heeft nu specifieke regels die de verschillende situaties goed kunnen onderscheiden. Het RR-proces zou nu door moeten gaan totdat de abstractere kennis uit de nieuwe productieregels omgevormd zijn tot chunks in het declaratieve geheugen. Dit gebeurt niet in het model, omdat nog onduidelijk is hoe zo'n omzetting terug naar het declaratieve geheugen in ACT-R in zijn werk zou moeten gaan. Op deze ontbrekende schakel in het proces kom ik verderop in dit hoofdstuk terug.

2.2 Betekenissen van impliciet en expliciet

Uit de vorige paragraaf blijkt, dat de betekenis die Karmiloff-Smith aan de termen *impliciet* en *expliciet* geeft, afwijken van wat doorgaans hieronder verstaan wordt. In de cognitiewetenschappelijke literatuur wordt vaak een verband gelegd tussen impliciete kennis en procedurele kennis. Impliciete kennis heeft dan de vorm van specifieke procedures, die we als een geheel uitvoeren, maar waar we geen meta-cognitieve toegang toe hebben. Voorbeelden hiervan zijn vaardigheden zoals autorijden of lopen. Leren autorijden gaat vaak via expliciete instructies. Door veel oefening automatiseren we de handelingen echter en worden de expliciete instructies omgezet in impliciete kennis. Deze betekenis van impliciete kennis lijkt niet te verenigen te zijn met voorbeelden, die als expliciete chunks in het declaratieve geheugen zijn opgeslagen. Ik interpreteer – in navolging van Karmiloff-Smith – de voorbeelden echter toch als een vorm van impliciete kennis. De kennis waar het om gaat – het verband tussen determinator, aantal, focusverschuiving en functie – is immers *impliciet* aanwezig in de voorbeelden en *expliciet* aanwezig in de nieuw gevormde productieregels.

We zagen al eerder dat het productiecompilatiemechanisme twee opvolgende productieregels aan elkaar breidt en de opgehaalde chunk uit het declaratieve geheugen in de nieuwe regel inbakt. Dit maakt het mechanisme zeer geschikt voor proceduralisatie en automatisering van kennis, bijvoorbeeld de eerder genoemde handelingen bij autorijden. Deze proceduralisatie zou je *specialisatie* kunnen noemen, omdat het leidt tot specifieke productieregels die van toepassing zijn in een specifieke situatie. Als je het productiecompilatiemechanisme combineert met een analogiestrategie heb je echter een tool in handen, die niet zozeer in specialiseert, maar juist generaliseert. Dit is precies het *generalisatie-door-specialisatie-mechanisme* dat ik in hoofdstuk 1 reeds heb beschreven.

2.3 De ontbrekende schakel

In het model hebben representaties op het E1-niveau de vorm van productieregels, die niets uit het declaratieve geheugen opzoeken. Eerder merkte ik al op dat representaties op het E2/3-niveau wel de vorm moeten hebben van declaratieve chunks. Het is echter op het moment onduidelijk hoe de overgang tussen het E1-niveau en het E2/3-niveau dan in zijn werk zou moeten gaan in ACT-R. Als dit wel duidelijk zou zijn, zou het een sluitend verhaal zijn, want de kennis die dan omgeschreven is naar het E2/3-niveau zou dan weer ter beschikking kunnen komen van andere cognitieve taken. De dimensies die in het determinatorenmodel één voor één beschikbaar komen, kun je dan ook als representaties op het E2/3-niveau zien. Die kennis zat dan eerst ingebakken in procedures voor andere linguïstische taken, maar wordt na twee keer herschrijven zo abstract dat het concept van een mogelijk relevante dimensie overblijft. Dit concept wordt dan gebruikt in het determinatorenmodel zodra het beschikbaar is. Dit soort uitwisselen van kennis tussen verschillende taken maakt het mogelijk voor een persoon om zich bewust te worden van een heel systeem van interacterende aspecten, zoals bijvoorbeeld het taalsysteem met daarbinnen weer subsystemen zoals het systeem voor het gebruik van determinatoren. Karmiloff-Smith beschrijft dit door te zeggen dat een kind eigenlijk in de loop van de tijd een kleine taalwetenschapper wordt (en ook een kleine natuurkundige en een kleine psycholoog enz.). Natuurlijk wil dit niet zeggen dat we alle regelmatigigheden van de taal en de grammatica onder woorden kunnen brengen. Meestal is dat niet zo. Maar als een volwassene of een ouder kind met de uitzonderlijke situatie van het playrooms-experiment wordt geconfronteerd, dan weet hij wel de essentiële linguïstische aanwijzing te gebruiken en te benoemen. Een tienjarige gaf bij de playroomstaak bijvoorbeeld de volgende uitleg: "Het moet wel de jongen zijn, want u zei 'de'; als u het tegen het meisje had gehad, had u 'leen me een auto' moeten zeggen, of misschien 'één van je auto's'."

Het overgangsmechanisme van E1 naar E2/3 kan gebaseerd zijn op zelfobservatie of metacognitie. Je hebt verbanden tussen dimensies gevangen in productieregels en een proces van metacognitie zou er dan voor kunnen zorgen dat je zicht krijgt op de onderdelen van deze productieregels. De dimensies zelf worden losse onderdelen van je kennis. Je gaat ze ook plaatsen in een groter verband, in een heel systeem. Je weet dan uiteindelijk per dimensie wat de mogelijke waarden op die dimensie zijn. Je weet ook wat de verbanden tussen de verschillende dimensies zijn en wat de functie van iedere dimensie is in het grotere geheel. Het meta-cognitieproces wat dergelijke representaties zou kunnen veroorzaken, zou op twee manieren kunnen werken. Ofwel het is een kwestie van constant bijhouden wat er allemaal met de representaties gebeurt en daar vervolgens nieuwe representaties uit destilleren. Ofwel het is meer een *mentale simulatie*, die je niet simultaan, maar achteraf uitvoert. Een fout antwoord of een verkeerde interactie met de omgeving is dan de aanleiding voor een soort recapitulatie van wat er zojuist gebeurt is en op grond daarvan wordt meta-cognitieve kennis verworven. Deze manier van inzicht verwerven doet denken aan de manier waarop in de cognitieve architectuur Soar (Laird, Newell & Rosenbloom, 1987) leert: Soar doet vooraf een mentale simulatie van wat hij voor acties kan doen op een bepaald moment en als hij geen actie weet, treedt er een impasse op. Deze impasse wordt vervolgens opgelost doordat het leermechanisme – *chunking* – nieuwe kennis ontdekt en toevoegt aan het systeem. Voor de huidige discussie is het met name van belang dat mentale simulatie een manier zou kunnen zijn om meta-kennis tot stand te laten komen. Hiermee is overigens niet gezegd dat mensen altijd in staat zijn tot mentale simulatie of meta-cognitie. We zagen al eerder dat er heel wat kennis in mensen zit, die nooit op het E2/3-niveau belandt.

Hoe zou een meta-cognitief proces er dan precies uitzien in ACT-R? Deze vraag is niet even snel te beantwoorden, maar we kunnen wel nagaan wat voor richting de RR-theorie ons op stuurt in deze kwestie. Voor het E2/3-niveau is het noodzakelijk dat de namen van slots uit het goal in de productieregels als op zichzelfstaande entiteiten kunnen worden gezien. Deze entiteiten kun je dan in een chunk stoppen, waarbij de naam van het slot de naam van de chunk wordt. De waarde die eerst bij dat slot hoorde, kun je dan in een slot stoppen met de naam *waarde*. In het determinatorenmodel gebeurt dat al met de relevante dimensies. Neem bijvoorbeeld de dimensie *focus-voor*. Deze is in de vorm van een dimensie opgeslagen als chunk met de naam *dimfocusvoor*. Daarnaast worden er steeds chunks aan het declaratieve geheugen toegevoegd, die ik *eigenschappen* noem. Zo'n eigenschap is altijd een eigenschap van een bepaald goal en ziet er bijvoorbeeld zo uit:

Focfact12

ISA	eigenschap
van	goal123
type	focus-voor
waarde	leeg

In focfact12 is de waarde van de dimensie focus-voor dus gebonden aan het huidige goal, in dit geval goal123. Dit soort feiten komen in het declaratieve geheugen door waarneming uit de context. Maar deze waarneming sla je pas op in je declaratieve geheugen als je weet dat focus-voor een relevante dimensie is om op te letten. Als je een groep van dit soort chunks hebt verzameld, die allemaal dezelfde waarde hebben bij het slot *type*, dan zou een soort van zelfobservatieproces ervoor kunnen zorgen dat je dit weer abstraheert tot chunks die een systeem van samenhangende concepten kunnen representeren. In die nieuwe chunks staat dat expliciet opgeslagen wat de mogelijke waarden zoal kunnen zijn op iedere dimensie.

We keren weer even terug naar de productieregels die ontstaan in het determinatorenmodel. Stel dat we het hierboven beschreven proces op deze regels loslaten, dan zou je eigenschaps-chunks kunnen krijgen die er als volgt uitzien:

Detfact1

ISA	eigenschap
van	goal233
type	determinator
waarde	une

Detfact2

ISA	eigenschap
van	goal235
type	determinator
waarde	la

Deze eigenschapschunks zouden dan weer verzameld kunnen worden en geabstraheerd naar de dimensie determinator:

Dimdeterminator

ISA	dimensie
naam	determinator

Eigenlijk zou bij zo'n chunk dan ook nog een slot moeten zitten dat een lijst kan bevatten. Hierin zou je dan een lijst kunnen stoppen van mogelijke waarden op die dimensie. Bij dimdeterminator zou dat dan een lijst zijn met in ieder geval de elementen *une* en *la* erin. In ACT-R kun je dat echter niet met een lijst oplossen, dus zou je extra chunks nodig moeten hebben, die er als volgt uitzien:

Waardeune

ISA	waarde
van	dimdeterminator
naam	une

Wardela

ISA	waarde
van	dimdeterminator
naam	la

Het van-slot geeft dan de relatie weer met de dimensie-chunk. Als je deze chunks eenmaal in je declaratieve geheugen hebt, kun je ze ook onder woorden brengen. Het hierboven geciteerde tienjarige kind had voor zijn uitspraak dergelijke chunks nodig. Over het mechanisme van zelfobservatie (of meta-cognitie) dat dit soort chunk moet produceren is nog weinig te zeggen, behalve dat het kennelijk een proces is van losweken van concepten en deze daarna ordenen in een systeem. Dit lijkt sterk op wat Karmiloff-Smith voor ogen heeft met haar RR-theorie. In het volgende hoofdstuk zullen we zien dat als de ontbrekende schakel in het RR-proces aan ACT-R zou worden toegevoegd, we een zeer krachtige architectuur krijgen, die het begrijpen van de menselijke intelligentie nog een stapje dichterbij brengt.

Hoofdstuk 6: Discussie en Conclusie

H O O T D U K

6

Discussie en conclusie

6A: Discussie en conclusie

1 Terug naar de probleemstelling

1.1 Hypotheses en centrale vraagstelling checken

In het eerste hoofdstuk zijn een aantal vragen en hypotheses geformuleerd. Het is nu tijd om te kijken wat hiervan terecht gekomen is. De centrale vraag was als volgt weergegeven:

1. Hoe ziet een cognitief model er precies uit dat in staat is een echte invulling te geven aan de representaties en de herschrijfmechanismen van de RR-theorie?

Naast deze centrale vraag, hadden we ook nog twee specifieke hypotheses:

2. De productieregels die tot herrepresentatie leiden, ontstaan door middel van het generalisatie-door-specialisatie-mechanisme.

3. De herrepresentatieprocessen in totaal verschillende cognitieve microdomeinen vertonen ook op het gedetailleerde niveau van een computationeel model grote overeenkomsten.

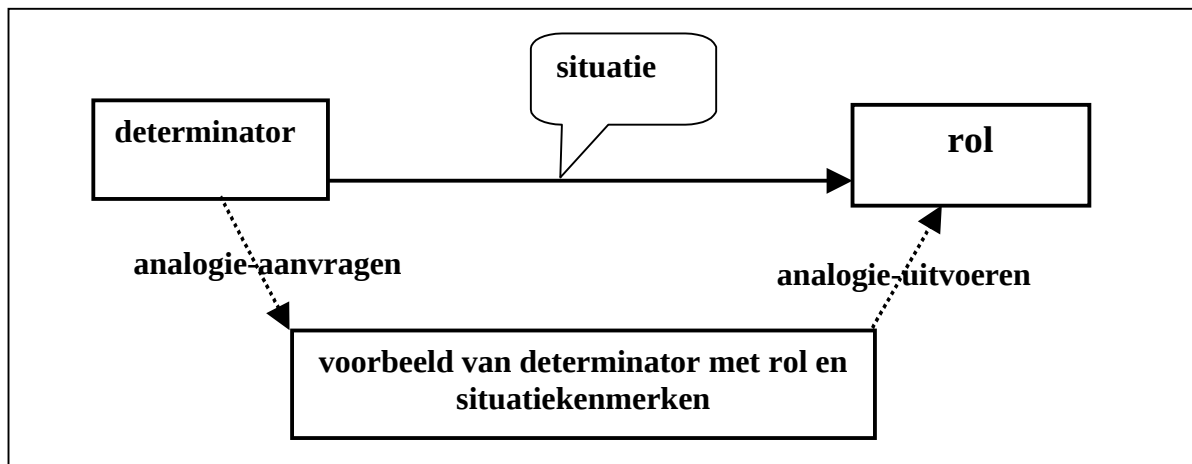
We weten inmiddels dat we met behulp van ACT-R inderdaad een heel eind gekomen zijn met het beantwoorden van de centrale vraag. Het model dat we voor het playrooms-experiment hebben ontwikkeld, is eigenlijk maar een voorbeeld van een model. In hoofdstuk 4 zagen we welke bouwstenen we nu hebben om ook andere RR-experimenten te modelleren. Deze bouwstenen zijn het antwoord op de centrale vraagstelling en ze versterken tevens hypothese 3.

Hypothese 2 is achteraf gezien niet helemaal uitgekomen. De hypothese klopt als het gaat over de herrepresentatie van niveau I naar niveau E1. Voor de tweede herrepresentatieslag – van niveau E1 naar niveau E2/3 – gaat hypothese 2 niet op. We kunnen eigenlijk nog niet zo veel zeggen over deze herrepresentatie, maar het lijkt erop dat er een ander soort vertaling gemaakt moet worden dan generalisatie-door-specialisatie. Generalisatie-door-specialisatie leidt immers altijd tot nieuwe productieregels en de tweede herrepresentatieslag moet niet nieuwe productieregels opleveren, maar nieuwe declaratieve chunks. Gelukkig heeft hypothese 2 ons in eerste instantie wel op het juiste spoor gebracht. Het begrijpen van constructies met determinatoren hebben we opgevat als een functie die van determinator, via de situatie, naar de rol van de determinator loopt. De omzetting van determinator naar rol gebeurt via analogie (zie figuur 8), in twee stappen, voorbeeld aanvragen en analogie uitvoeren. Deze strategie is de uitgangssituatie voor *representational redescription*. Het generalisatie-door-specialisatiemechanisme heeft vervolgens zijn werk gedaan en het bleek inderdaad mogelijk hiermee de resultaten van het experiment te verklaren.

1.2 Analogie trekken als een simpele heuristiek

De vraag die na het checken van de hypotheses nog overblijft is, waar komt de gebruikte analogiestrategie in eerste instantie dan vandaan? Je zou kunnen zeggen, dat deze strategie een instantie is van een hele algemene analogie-heuristiek. Als je een taak wilt uitvoeren en je hebt er geen specialistische productieregels voor, dan probeer je je een eerdere instantie van de taakuitvoering te vinden, die succesvol was en die lijkt op de huidige instantie. Vervolgens doe je hetzelfde als toen, aangepast aan de huidige instantie. Deze heuristiek is heel algemeen

toepasbaar en lijkt sterk op het soort simpele heuristieken dat Todd en Gigerenzer (2000) beschrijven. De analogieregels in het determinatorenmodel kun je zien als een deel van een hele familie van analogieregels. Deze regels zoeken allemaal een chunk uit het declaratieve geheugen op van dezelfde soort als het huidige doel, maar de mate waarin het doel op die chunk moet lijken, is verschillend. Sommige analogieproductieregels zijn heel streng en zoeken chunks die op bijna alle slots dezelfde waarde hebben als het goal, bijvoorbeeld *aanvraag-van-det-focvoor-focna-aantal-naar-rol*. Andere analogieproductieregels zijn soepeler en zoeken chunks die op slechts één slot dezelfde waarde hebben als het goal – afgezien van het ISA-slot – bijvoorbeeld *aanvraag-van-det-naar-focvoor-focna-aantal-rol*. En weer andere regels zitten daar tussenin.



Figuur 8: Determinatoren begrijpen met behulp van analogie

Welke regels gebruikt worden op een bepaald moment, hangt af van de beschikbare informatie. In het determinatorenmodel zien we dat naarmate er meer informatie beschikbaar komt, er steeds strengere analogieregels worden toegepast.

2 Een groter kader: simulatiemodellen van ontwikkeling

2.1 Ecologische rationaliteit

In de ontwerpen voor de modellen van de RR-experimenten valt op dat er een soort interne *drive* is die zoekt naar regelmaat in de omgeving. Deze drive stimuleert het ontdekken van relevante dimensies. Vervolgens wordt het gebruik van de extra informatie die deze dimensies leveren gestimuleert. Laten we dit geheel de *zoek-dimensie-strategie* noemen. Meer en minder geavanceerde productieregels concurreren met elkaar om gebruikt te worden. Meer informatie leidt meestal tot betere antwoorden, dus de meer geavanceerde productieregels winnen. Uit het determinatorenmodel blijkt echter dat meer geavanceerde productieregels die niet naar een beter antwoord leiden, ook – tijdelijk – kunnen winnen. Dit is maar goed ook, anders zou een ontwikkeling in een lokaal maximum kunnen blijven steken. Todd en Gigerenzer (2000) noemen de zoektocht naar regelmaat in de omgeving *ecologische rationaliteit*. De simpele heuristieken die zij beschrijven, maken op een rationele manier gebruik van de structuur van de omgeving. In eerdere hoofdstukken zagen we een soortgelijke rationaliteit in onze modellen: het model zoekt naar relevante dimensies in de omgeving, maar alleen als dat genoeg voordeel oplevert. Het maakt een afweging tussen snelle verwerking met weinig zoeken en een grote kans op een fout en langzamere verwerking met meer zoeken, maar een kleinere kans op een fout. Deze afweging

vind zowel op een microtijdsschaal als op een macrotijdsschaal plaats, dus zowel in de taakuitvoering als in de ontwikkeling. In de taakuitvoering weegt het model af van welke dimensies, die hij op dat moment kent, hij de waarde in de huidige context gaat bepalen. In de ontwikkeling weegt het model af of het nodig is nog naar een nieuwe dimensie te gaan zoeken, of dat de reeds bekende dimensies voldoende zijn om tot een bevredigend resultaat te komen. De *zoek-dimensie-strategie* is dus een rationele strategie, die gebruik maakt van de structuur van de context. Dit is dezelfde soort rationaliteit die aan ACT-R zelf ten grondslag ligt. Anderson (1990) ontwikkelde ACT-R aan de hand van dezelfde uitgangspunten over rationaliteit. De term die Anderson in dit verband gebruikt is *evolutionary optimization*.

Ook in de RR-theorie vind je een afweging die te maken heeft met de structuur van de omgeving. Nu gaat het echter om de vorm van de representaties. Karmiloff-Smith (1992) merkte al op dat lang niet al onze kennis uiteindelijk op het E2/3-niveau komt. We hebben een interne *drive* tot herrepresentatie, maar of en hoe vaak we daartoe overgaan, hangt af van de taak waar het om gaat. Als we de twee herrepresentatiestappen nemen, dan beschikken we over kennis, die goed uitwisselbaar is met andere microdomeinen of taken, maar in hoeverre deze vorm van representatie nodig is, is afhankelijk van in hoeverre er in het microdomein *zelf* (de omgeving dus) verbanden liggen met elementen uit andere microdomeinen of taken. Aan de ene kant heb je specifieke (motorische) vaardigheden, die weinig overeenkomst vertonen met andere bezigheden of situaties. Deze kunnen prima op het I-niveau blijven. Denk hierbij aan vaardigheden als pirouettes draaien bij ballet. Juist op het I-niveau kun je zo'n taak accuraat en snel uitvoeren. Aan de andere kant van het spectrum zitten allerlei meer cognitieve taken, zoals bijvoorbeeld rekenen. Kennis voor deze taken kan juist de grenzen van de microdomeinen overstijgen en herrepresentatie naar E1 en soms ook nog naar E2/3 is dan wel zinvol. Je kunt prima vermenigvuldigen, door de tafels uit je hoofd te leren. Maar pas als je die kennis herschreven hebt tot representaties die meer abstract zijn, maar die wel aangeven wat vermenigvuldigen nou eigenlijk precies inhoudt, ben je in staat deze vermenigvuldigingskennis ook te gebruiken voor machtsverheffen. In de volgende subparagraaf zullen we zien dat juist deze uitwisseling van kennis tussen verschillende taken en microdomeinen de RR-theorie zo waardevol maakt.

2.2 Een leidraad voor simulatiemodellen van ontwikkeling

Het determinatorenmodel is een simulatie van een zeer specifieke taak in een klein microdomein. De gesimuleerde periode beslaat negen jaar, dus het is een model op een macrotijdsschaal. De uitdaging bij dit soort modellen van ontwikkeling is het afbakenen van de grenzen van het model en het zoeken van het juiste niveau van abstractie. Om de grenzen van een model te bepalen, moet je antwoord geven op de vraag: *Welke kenniscomponenten moeten ontstaan uit de simulatie en welke kun je al kant-en-klaar erin stoppen?* De RR-theorie heeft ons gedwongen precies te definiëren welke kennis op welk moment en in welke vorm aanwezig was in het model. Nadat we deze kennis hadden gedefinieerd, werd het een stuk simpeler om de grenzen van het model aan te geven. Naar aanleiding van de RR-theorie en de vertaling daarvan in ACT-R-termen heb ik een algemene leidraad voor het ontwikkelen van cognitieve modellen van ontwikkeling opgesteld in de vorm van een formulier. Het ziet er als volgt uit:

Microdomein:

.....
Taak:

.....
Beschikbare dimensies (of andere declaratieve kennis) aan het begin van de simulatie:

.....
Beschikbare strategieën (of productieregels) aan het begin:

.....
Dimensies die later beschikbaar komen (in volgorde van verschijnen):

.....
Nieuwe strategieën (of productieregels) die door het model geleerd worden:

.....
Nieuwe dimensies (of andere declaratieve chunks) die door het model geleerd worden:

.....

Als je dit formulier hebt ingevuld voor een bepaalde taak, ben je eigenlijk al halverwege het ontwikkeltraject van een cognitief model van deze taak. Dit invulformulier, het generalisatie-door-specialisatiemechanisme en de zoek-dimensie-strategie kunnen beschouwd worden als kant-en-klare bouwstenen voor cognitieve modellen. Deze bouwstenen hebben twee voordelen. Behalve dat ze de ontwerper op weg helpen een bepaalde cognitieve taak te formaliseren, zorgen ze er ook voor dat verschillende modellen van specifieke taken gecombineerd kunnen worden. De representaties die in een bepaald model geleerd worden, kunnen immers weer als input dienen voor een ander simulatiemodel. De op deze manier opgebouwde modellen kunnen dan gezien worden als onderdelen van een groter geheel en ze zouden dan makkelijk ingeplugd kunnen worden in een meer algemeen cognitief model van ontwikkeling. Dat zou zeker een stap vooruit betekenen op weg naar een geünificeerde theorie van ontwikkeling en leren!

3 De mogelijkheden van ACT-R

In de vorige paragraaf hebben we gezien dat de ACT-R architectuur zich goed leent om cognitieve modellen van ontwikkeling mee te maken. ACT-R heeft echter ook een aantal tekortkomingen en eigenaardigheden, die in modellen van ontwikkeling moeten worden omzeild op manieren, die niet altijd recht doen aan de psychologische werkelijkheid. Ik bespreek de meest opvallende hieronder.

3.1 Eigenschappen uit de context waarnemen

Het determinatorenmodel hoort een constructie met een determinator en gaat vervolgens op zoek naar de waarden van relevante dimensies in de context. De drie dimensies worden één voor één waargenomen of uit het geheugen opgevraagd. In werkelijkheid gaat het natuurlijk niet zo op het rijtje af. De *focus-voor*, bijvoorbeeld, bepaal je aan de hand van de vorige zin en aan de hand van je verwerking van de huidige zin tot nu toe. Dat is dus een continu proces van *on-line* verwerking. Op grond van deze *on-line* verwerking kun je dan een voorspelling doen voor de *focus-na*. Wanneer je in dit hele proces de uniekheid (en dus de waarde bij de dimensie *aantal*) van het gehoorde object bepaalt is niet precies aan te geven, mede omdat het hele gebeuren ook ontzettend snel gebeurt. De vaste volgorde waarin het determinatorenmodel de dimensies evalueert, is dus een versimpeling van de werkelijkheid, die niet erg plausibel is. ACT-R biedt echter geen mogelijkheden voor een lossere, meer *on-line* registratie van de dimensiewaarden, dus is een ingebouwde volgorde onontkoombaar.

Alle architecturen, die net als ACT-R op een symbolische manier werken, hebben dergelijke problemen, in tegenstelling tot connectionistische modellen. Clark & Karmiloff-Smith (1993) gaan ook op deze algemene connectionisme-symbolisme-kwestie in. Ze menen dat de RR-theorie aangeeft dat we cognitieve modellen alleen succesvol kunnen ontwerpen in connectionistische modellen – die dus alle voordelen van parallelle verwerking in zich hebben – die verrijkt zijn met een soort "toplaag" die symbolische verwerking mogelijk maakt. ACT-R lijkt hier trouwens al behoorlijk op, want ACT-R is een symbolische architectuur met een soort van connectionistische onderlaag.

3.2 Productieregels hebben een richting

We komen nog een probleem tegen dat samenhangt met de symbolische manier van verwerken van ACT-R. Productieregels leggen verbanden tussen concepten, maar die verbanden lopen wel altijd een bepaalde kant op. Het determinatorenmodel leert nieuwe productieregels die verbanden leggen tussen determinatoren, de omstandigheden waarin ze werden uitgesproken en de rollen van de determinatoren. Ook deze productieregels hebben dus een richting, ofwel van determinator, via omstandigheden naar rol (begriprichting) ofwel juist van rol via omstandigheden naar determinator (productierichting). Het is echter ook denkbaar is dat de verbanden tussen determinator en rol niet zozeer een richting hebben, maar meer als een soort onderdeel van een semantisch netwerk in het cognitieve systeem gerepresenteerd zijn. Je kunt je immers voorstellen, dat als je al vaak voorbeelden hebt gehoord van *la*-zinnen en het verband hebt ontdekt tussen *la* en unieke objecten, die nieuw in het gesprek worden geïntroduceerd, dat je dan zelf ook *la* op de juiste manier gaat gebruiken. In het determinatorenmodel kan deze omkering van de richting alleen via een omweg, namelijk door een analogie te trekken en daarbij een voorbeeld te gebruiken, dat in de andere richting is ingevuld. Pas na uitvoeriger psychologisch onderzoek zouden we vast kunnen stellen of mensen inderdaad in staat zijn de verbanden tussen determinatoren en hun rollen zo direct om te draaien. Wat wel bekend is uit de psychologie, is dat mensen vaak de neiging hebben om ALS-DAN-regels, die dus een strikte richting hebben, op te vatten als regels met een dubbele richting (Johnson-Laird, 2001). Ook wat betreft deze materie zijn connectionistische modellen in het voordeel, omdat de verbanden in dergelijke modellen altijd twee kanten op gaan.

Er is nog een tweede manier waarop het feit dat productieregels een richting hebben beperkend werkt. Als we ons de verbanden tussen de dimensies in het determinatorenmodel voorstellen als lijnen in een netwerk, dan zien we dat de beïnvloeding allerlei kanten op zou moeten en kunnen gaan. Niet alleen van *determinator* via *aantal* naar *rol* en van *rol* via *aantal* naar *determinator*, maar bijvoorbeeld ook van *aantal* naar *determinator* (en *rol*). Op die manier zou je een concurrentie kunnen krijgen tussen *une* als telwoord en *la*, omdat beide woorden van toepassing zijn in een context met een uniek object. Een dergelijke concurrentie is niet onvoorstelbaar, maar op het moment dus niet mogelijk in ACT-R.

3.3 De eerste voorbeelden

We zagen zojuist dat productie en begrip elkaar via het declaratieve geheugen kunnen beïnvloeden. Kleine kinderen leren taal grotendeels door napraten. Horen ze veel *une-des*-voorbeelden in een korte periode, dan zullen ze ook vaak *une-des* gaan gebruiken als ze zelf een lidwoord moeten produceren en de analogiestrategie gebruiken. Andersom kunnen ze voorbeelden van hun eigen uitspraken, en dus ook hun eigen foute constructies, gebruiken voor begrip. Het is allemaal leuk en aardig dat productie en begrip invloed op elkaar kunnen hebben, maar er blijft wel een opstartprobleem over. Je kunt immers alleen maar analogie toepassen als je minimaal één voorbeeld ter beschikking hebt. Hoe komen die voorbeelden er dan in eerste

instantie? Aan het begin van iedere nieuwe fase heb je dit probleem opnieuw: waar komen de eerste voorbeelden vandaan die de nieuwe informatie al bevatten? In het determinatorenmodel is van het volgende principe uitgegaan: er zijn soms situaties waarin de waarden uit de omgeving zo overduidelijk te bepalen zijn, dat het kind, zodra het bekend is met de juiste dimensies, heel makkelijk de link kan leggen tussen de gehoorde determinator en de omgevingswaarden. Als het dan om een functie gaat, die het kind eerst nog niet kende, dan slaat het kind deze gegevens op als een nieuw soort voorbeeld. In het determinatorenmodel zijn alle slotwaarden strings van letters, dus wordt voor de nieuwe rol een nieuwe waarde ingevuld, die om de leesbaarheid van het model te vergroten, semantisch dicht bij de naam van de functie ligt (bijvoorbeeld *hoeveelheid-aangeven* voor de numerieke functie). Dit is een niet geheel bevredigende oplossing. Het idee, dat het kind in extreem duidelijke situaties, soms direct een voorbeeld uit de omgeving weet te vissen, is echter niet ondenkbaar. De (linguïstische) omgeving zit vol met redundantie en dat kan de hendel zijn, die het hele analogieproces weet aan te zwengelen.

3.4 Vaste slotnamen

In een eerdere paragraaf is al opgemerkt dat de gebruikte analogieregels een soort specialisaties zijn van meer algemene analogieregels. De zoek-een-voorbeeld-op-en-vul-de-ontbrekende-slots-van-het-goal-in-acties van de analogieregels, zou je best kunnen definiëren, zonder precies de slotnamen te gebruiken van het goal en het voorbeeld. In ACT-R is dit helaas niet mogelijk, omdat slotnamen geen variabelen kunnen zijn. Deze beperking maakt het haast onmogelijk om in een cognitief model gebruik te maken van heel breed inzetbare heuristieken. Ofwel je moet deze brede heuristieken eerst met de hand vertalen naar de concrete situatie van het huidige model, of je moet een extra proceduralisatieproces in het model inbouwen, die deze vertaling zelf uitvoert. Dit laatste is de oplossing van Van Rijn et al. (in press). Zij combineren dit met generieke slotnamen (bijvoorbeeld *slot1*, *slot2* enz.) Dit maakt hun model wel een stuk minder makkelijk te begrijpen. Om die reden, en om me meer op de leerprocessen te kunnen concentreren, heb ik gekozen voor de andere aanpak: de analogieregels alvast specialiseren naar de huidige taak.

4 Verder onderzoek

De leidraad uit de vorige paragraaf geeft al een mooie voorzet voor toekomstig onderzoek. In deze paragraaf wordt ingegaan op de wisselwerking tussen simulatiemodellen en empirisch onderzoek en hoe deze interactie er in de toekomst uit zou kunnen zien.

4.1 De relatie tussen simulatiemodellen en empirisch onderzoek

Simulatiemodellen hebben een innige verhouding met empirisch onderzoek. Dat blijkt wel uit het determinatorenmodel. Over het algemeen is de gang van zaken als volgt: empirisch onderzoek levert experimentele resultaten. Er wordt een cognitief model gemaakt dat deze resultaten repliceert en op grond daarvan worden conclusies getrokken over de cognitieve processen, die zich in het hoofd van de proefpersonen afspelen. Meestal blijft het hierbij. Met het determinatorenmodel is dat ook zo. De ambities in het werkveld van het cognitief modelleren reiken echter verder. Om een cognitief model te maken moet je ontzettend veel aannames doen en vaak gaat er een hoop formalisatie en theorievorming aan het ontwerpproces vooraf. Soms is er al een formalisatie bekend, die min of meer aan de psychologische werkelijkheid is getoetst. Een voorbeeld hiervan zijn de regels van Siegler, die Van Rijn et al. (in press) gebruiken voor hun model van de taak met de balansschaal. Meestal is zo'n formalisatie echter niet aanwezig of lang niet gedetailleerd genoeg. Het zou mooi zijn als de formalisatie die gebruikt is in een bepaald cognitief model, gebruikt kan worden als input voor de psychologie. Het model doet voorspellingen

voor bepaalde meetbare uitkomsten en die kunnen dan vervolgens gecheckt worden met behulp van proefpersonen. Op die manier krijg je een echte wisselwerking tussen simulatiemodellen en empirisch onderzoek. Pas als een model resultaten redelijk succesvol repliceert en daarnaast voorspellingen doet, die blijken te kloppen met naderhand uitgevoerde experimenten, kun je echt spreken van een succesvol model. In een dergelijke situatie kun je hardere en meer overtuigende uitspraken doen over de achterliggende cognitieve processen. Het is echt een wisselwerking: experimenten sturen het modelleerproces en de modellen geven vervolgens weer richting aan nieuw empirisch onderzoek.

Het determinatorenmodel komt niet ver met deze hoogdravende ambities. Maar het leent zich er wel uitstekend voor. Het model kan immers veel meer dan de playroomstaak. Het kan ook lidwoorden op een normale manier verwerken, telwoorden verwerken en zelf lidwoorden en telwoorden produceren. Het geeft dus zeker aanleiding tot allerlei voorspellingen. Vooral de productiekant is interessant. Karmiloff-Smith heeft namelijk ook een productie-experiment gedaan met de experimentele opzet van de speelkamers (1979a, experiment 1). Om de werkwijze van het model met deze resultaten te vergelijken, is slechts een kleine uitbreiding nodig van het determinatorenmodel. Het enige wat toegevoegd zou hoeven te worden is een setje regels die normale productie van lidwoorden aanpast voor productie van lidwoorden in de experimentele context. Verder onderzoek in deze richting zou dus zonder veel extra moeite wel veel extra resultaten opleveren. Wat helemaal mooi zou zijn, is dat uitgebreide determinatorenmodel dan weer verder uit te breiden, met behulp van de leidraad uit de vorige paragraaf, zodat het model ook verwante taken zou kunnen uitvoeren, zoals de verwerking van persoonlijke voornaamwoorden. Pas dan zou de interactie tussen taken, zoals de RR-theorie die beschrijft, werkelijk zichtbaar worden.

4.2 Ecologische rationaliteit en cognitieve modellen

Eerder in dit hoofdstuk werd al de link gelegd tussen de strategieën die het determinatorenmodel en het blokkenmodel gebruiken en de simpele heuristieken (*fast and frugal heuristics*) die Todd en Gigerenzer (2000) bespreken. Deze onderzoekers geven aan dat ze hun theorie over simpele heuristieken graag zouden willen toepassen op cognitieve taken, die wat ingewikkelder zijn, zoals planning en probleemoplossen. De hierboven besproken leidraad zou ook daarvoor wel eens heel handig kunnen zijn. Als we simpele heuristieken gebruiken voor het uitvoeren van taken, dan is het ook zeer waarschijnlijk dat we vergelijkbare simpele heuristieken gebruiken voor het aanleren van deze taken. Ook zagen we al dat de ecologische rationaliteit die Todd en Gigerenzer beschrijven, duidelijke verbanden heeft met de zoek-dimensie-strategie en met generalisatie-door-specialisatie. Volgens Todd en Gigerenzer is het nog onduidelijk in wat voor "taal" ecologische rationaliteit beschreven kan worden. Cognitieve modellen kunnen wellicht, in navolging van het determinatorenmodel en het blokkenmodel, meer licht werpen op hoe regelmatigheden in de omgeving worden uitgebuit door het cognitieve beslissingsapparaat.

Dit onderzoek zou dan wel weer ondersteund moeten worden door psychologisch onderzoek. Immers, de manier waarop het determinatorenmodel op zoek gaat naar nieuwe relevante dimensies is een behoorlijke versimpeling van de werkelijkheid. Het model zoekt min of meer met voorbedachte rade. In werkelijkheid is dat natuurlijk niet zo. Het is juist zo razend knap van mensen dat ze in de loop van hun ontwikkeling steeds beter in staat zijn orde te scheppen in de chaos die de omgeving op het eerste gezicht lijkt te zijn. Ze krijgen door wanneer ze op welke aspecten in de omgeving moeten letten en hoe ze die moeten interpreteren, zonder dat ze veel aanknopingspunten hebben in welke richting ze het moeten zoeken!

5 Conclusie

Wat is intelligentie precies? Deze vraag stelde ik aan het begin van de scriptie en deze vraag zou ik nu weer kunnen stellen. Ook nu, een heleboel bladzijden later, hebben we nog steeds geen duidelijk antwoord op deze vraag. Waar we nu wel wat meer over weten, is hoe het ontwerpen van cognitieve modellen ons dichterbij het antwoord zou kunnen brengen. Het gaat dan met name om cognitieve modellen van *ontwikkeling*. Immers, als we begrijpen hoe het cognitieve systeem zich ontwikkelt, dan weten we ook meer over hoe de cognitie zelf in elkaar zit.

De *representational redescription* theorie beschrijft de ontwikkeling van menselijke intelligentie. De intelligentie die dieren bezitten is beperkt. Bijen hebben bijvoorbeeld een vrij ingewikkelde dans waarmee ze aan elkaar kunnen doorgeven waar bloemen te vinden zijn. Deze dans verloopt echter volgens een vast stramien en kan alleen maar gebruikt worden om de locatie van bloemen aan te geven. Mensen ontwikkelen in hun leven een veel minder beperkte intelligentie, die overigens ook wel zijn grenzen heeft. Wij gaan voorbij vaste communicatiepatronen en handelingen. *Representational redescription* zorgt er onder andere voor dat mensen op vele manieren en over vele onderwerpen met elkaar kunnen communiceren, niet alleen over bloemen!

Dit afstudeeronderzoek heeft de *representaties* op de verschillende niveaus van de RR-theorie echt vorm gegeven. Ook over de overgangsmechanismen, de *redescriptions*, weten we nu meer. Het eerste overgangsmechanisme (van niveau I naar niveau E1) is concreet gemaakt en gebruikt in de modellen. Het tweede overgangsmechanisme (van niveau E1 naar niveau E2/3) is nog niet in dat stadium, maar de modellen geven wel aanknopingspunten voor de invulling van dit mechanisme. Al met al kunnen we concluderen dat het hier beschreven onderzoek een brug heeft gebouwd tussen de RR-theorie en ACT-R en daarmee weer een steentje heeft bijgedragen aan de zoektocht naar de ware aard van menselijke intelligentie.

6B: Referenties

- Anderson, J.R. (1990). *The adaptive character of thought*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Anderson, J.R., & Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Clark, A., & Karmiloff-Smith, A. (1993) The cognizer's innards: A psychological and philosophical perspective on the development of thought. *Mind & Language*, 8(4), 487-519.
- Halford, G.S., Smith, S.B., Campbell Dickson, J., Mayberry, M.T., Kelly, M.E., Bain, J.D., & Stewart, J.E.M. (1995). Modeling the development of reasoning strategies: The roles of analogy, knowledge, and capacity. In: T.J. Simon en G.S. Halford (eds.), *Developing Cognitive Competence*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Johnson-Laird, P.N. (2001). Mental models and deduction. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(10), 434-442.
- Karmiloff-Smith, A. (1979a). *A functional approach to child language: A study of determiners and reference*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Karmiloff-Smith, A. (1979b). Micro- and macro-developmental changes in language acquisition and other representational systems. *Cognitive Science*, 3, 81-118.
- Karmiloff-Smith, A. (1979c). Problem-solving procedures in children's construction and representation of closed railway circuits. *Archives de Psychologie*, 1807, 37-59.
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34, 57-83.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*. Cambridge, MA: MIT/Bradford Books.
- Karmiloff-Smith, A. (1994). Précis of Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 693-745.
- Karmiloff-Smith, A., Grant, J., Sims, K., Jones, M.-C., & Cuckle, P. (1996). Rethinking metalinguistic awareness: Representing and accessing knowledge about what counts as a word. *Cognition*, 58, 197-219.
- Karmiloff-Smith, A., & Inhelder, B. (1974/75). If you want to get ahead, get a theory. *Cognition*, 3, 195-212.
- Laird, J.E., Newell, A., & Rosenbloom, P.S. (1987). Soar: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, 33, 1-64.
- Lebiere, C., Wallach, D., & Taatgen, N.A. (1998). Implicit and explicit learning in ACT-R. In Frank Ritter & Richard Young (eds.), *Proceedings of the Second European Conference on Cognitive Modelling*. Nottingham, UK: Nottingham University Press.
- Logan, G.D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492-527.
- McClelland, J.L. (1995). A connectionist perspective on knowledge and development. In: T.J. Simon en G.S. Halford (eds.), *Developing Cognitive Competence*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Reeves, L.M., & Weisberg, R.W. (1994). The role of content and abstract information in analogical transfer. *Psychological Bulletin*, 115, 381-400.
- van Rijn, H., van Someren, M., & van der Maas, H. (in press). Modeling developmental transitions on the balance scale task. *Cognitive Science*.
- Shultz, T.R., Schmidt, W.C., Buckingham, D., & Mareschal, D. (1995). Modeling cognitive development with a generative connectionist algorithm. In: T.J. Simon en G.S. Halford (eds.), *Developing Cognitive Competence*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Siegler, R.S. (1981). Developmental sequences within and between concepts. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 46(2), 1-74.
- Simon, T.J., & Halford, G.S. (1995). Computational models and cognitive change. In: T.J. Simon en G.S. Halford (eds.), *Developing Cognitive Competence*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Simon, T.J., & Klahr, D. (1995). A computational theory of children,s learning about number conservation. In: T.J. Simon en G.S. Halford (eds.), *Developing Cognitive Competence*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Taatgen, N.A. (2000). *Proceduralization in ACT-R* (Tech. Rep.). Groningen University, The Netherlands. (Retrieved from World Wide Web: <http://www.ai.rug.nl/~niels/proceduralization.html>)
- Taatgen, N.A., & Anderson, J.R. (2002). Why do children learn to say "Broke"? *Cognition*, 86(2), 123-155.
- Todd, P.M., & Gigerenzer G. (2000). Précis of Simple heuristics that make us smart. *Behavioral and Brain Sciences*, 23, 727-780.