
Samenvatting

Hoe denken mensen?



Een van de nog grotendeels onbeantwoorde vragen in de wetenschap is hoe het komt dat mensen zo slim zijn als ze zijn. Hoe is het mogelijk dat mensen zich kunnen handhaven in alle ingewikkelde situaties die het dagelijks leven aan ze voorschotelt? Tegenwoordig wordt deze vraag bestudeerd door de cognitiewetenschap, een inter-disciplinaire wetenschap die voortgekomen is uit psychologie, filosofie, kunstmatige intelligentie, neurowetenschap en taalkunde. Elk van deze disciplines heeft een eigen beginpunt voor de beantwoording van deze vraag. In dit proefschrift

staan de benaderingen van de psychologie en de kunstmatige intelligentie centraal, met hier en daar wat verwijzingen naar de andere drie.

De invalshoek van de kunstmatige intelligentie is die van het oplossen van complexe problemen. Aanname is, dat menselijke intelligentie hierin maximaal tot uitdrukking komt. De nadruk van het onderzoek naar de aard van de intelligente processen ligt hierbij vooral op het resultaat: het vinden van een computerprogramma dat een bepaald probleem zo efficiënt mogelijk kan oplossen. De kunstmatige intelligentie ziet denken als een combinatie van *zoeken* en *kennis*. Een probleem is als het ware een soort doolhof. Ergens in het doolhof ligt de oplossing van het probleem. Om deze oplossing te bereiken, moet telkens gekozen worden tussen verschillende paden. Dit is het zoek-aspect van probleemoplossen. De *kennis* die iemand over een probleem heeft bepaalt hoe het doolhof er precies uitziet. Iemand met weinig kennis moet door

Samenvatting

een ingewikkeld doolhof, terwijl iemand met veel kennis slechts een eenvoudig doolhof hoeft te bewandelen. Dit komt doordat voor degene met veel kennis veel van de doodlopende wegen niet bestaan.

Als theorie van menselijke cognitie heeft de zoeken-en-kennis benadering een probleem. Aangezien mensen leren, is hun kennis niet statisch, maar continu aan verandering onderhevig. Het doolhof verandert als het ware terwijl iemand er door heen loopt. Op zich hoeft dit niet zo erg te zijn: de wetenschap kan niet alles tegelijk onderzoeken. Een mogelijkheid is, om eerst het zoeken-en-kennis aspect goed in kaart te brengen, en later het aspect van leren toe te voegen. Een voorbeeld van een dergelijke benadering is de benadering van de expert-systemen. Expert-systemen hebben de pretentie het redeneren van een expert na te bootsen. Aangezien experts mensen zijn met al heel veel kennis, is de aanname dat leren geen invloed meer heeft op het redeneren van een expert. Het tot nu toe geringe succes van expert-systemen doet de vraag rijzen of deze aanpak wel klopt. Is het wel zo dat experts niet meer leren, en dat menselijk redeneren los van leren bestudeerd kan worden? Het antwoord op deze vraag is ontkennend. Voor complexe problemen geldt, dat ze in het algemeen niet efficiënt oplosbaar zijn met een computerprogramma, hetgeen met behulp van de complexiteitstheorie kan worden aangetoond. Complexe problemen maken deel uit van het dagelijks leven: niet alleen het maken van ingewikkelde roosters is een complex probleem, maar ook het kunnen interpreteren van alledaagse taal. De conclusie is, dat redeneren en leren onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn, en dat ze niet goed los te bestuderen zijn.

In de psychologie is het onderzoek naar leren lange tijd gedomineerd door experimenten, waarbij proefpersonen een lijst woorden of andere dingen moesten onthouden, die ze later in het experiment weer moesten reproduceren of herkennen. Hoewel dit belangrijke inzichten verschafte in de werking van het geheugen, presenteerde deze manier van onderzoek ook het beeld van een leerproces dat los staat van het redeneren. Pas de afgelopen vijftien jaar is er belangstelling ontstaan voor leren tijdens het uitvoeren van een taak, het zogenaamde *impliciete leren*. In de experimenten die in het kader van dit soort onderzoek worden uitgevoerd verbetert de prestatie van proefpersonen zonder dat ze kunnen aangeven welke kennis ze hebben geleerd. Leren blijkt ook vanuit psychologisch oogpunt een continu proces te zijn, dat niet ophoudt als de leerfase voorbij is.

Een theorie over menselijk redeneren



Om tot een theorie over menselijk redeneren te kunnen komen, is meer nodig dan de zoeken-en-kennis theorie van de kunstmatige intelligentie. De ontbrekende component, het leren, moet geïntegreerd zijn in de theorie, en niet als component later toegevoegd zijn. Het onderzoek naar architecturen voor cognitie probeert zo'n geïntegreerde theorie te formuleren. Een architectuur voor cognitie is een theorie die tegelijk ook een simulatieprogramma is.

In dit proefschrift staat de ACT-R (Adaptive Control of Thought, Rational) architectuur centraal. Als theorie stelt het, dat menselijk denken een rationele grond heeft. Rationeel in de ACT-R visie is een soort economische rationaliteit: de hersenen zijn zo georganiseerd dat bij het maken van elke keuze een kosten-baten analyse gemaakt wordt. Welke keuze levert het meeste op bij zo min mogelijk risico en zo laag mogelijke kosten? Verder stelt de ACT-R theorie dat mensen over twee soorten geheugen beschikken: een geheugen voor feitenkennis (het z.g. declaratief geheugen) en een geheugen voor procedures (het z.g. procedureel geheugen), met kennis over hoe dingen gedaan moeten worden. De inhoud van deze geheugens is continu aan verandering onderhevig: niet alleen worden er dingen toegevoegd, maar ook wordt de waardering en ordening van de kennis telkens veranderd onder invloed van ervaring en context.

Behalve een theorie is ACT-R ook een simulatieprogramma. Voor een gegeven psychologische taak is het mogelijk begin-kennis in de simulatie te brengen, en het programma voorspellingen te laten maken over menselijk gedrag. In die zin is het dus een theorie die niet alleen achteraf verklaringen kan geven voor bepaalde verschijnselen, maar ook voorspellingen kan doen. Wat we dus eigenlijk doen is aspecten van menselijk denken nabootsen op een computer, om ze zo beter te begrijpen. Hierbij moet niet meteen gedacht worden aan een "denkende computer" maar meer aan een programma dat voorspellingen kan doen over hoe snel mensen dingen kunnen doen, wat voor soort fouten ze maken, en welke keuzes in welke omstandigheden worden gemaakt. Voor een echt denkende computer zou het nodig zijn om alle kennis van een bepaald individu in ACT-R te brengen, niet alleen feitenkennis, maar ook kennis over hoe je dingen moet doen (procedures).

In praktijk maken we zogenaamde modellen in ACT-R, hetgeen simulaties zijn van hoe mensen zich gedragen in een specifieke context, namelijk de context van een bepaald psychologisch experiment. Dit proefschrift bevat een groot aantal voorbeelden van dergelijke modellen. Een voorbeeld van zo'n taak is "free-recall", waarbij proefpersonen een lijstje woorden moeten leren, waarvan ze er later zo veel mogelijk moeten herinneren. Het model van free-recall bevat kennis over het lezen van woorden, het mentaal repeteren van deze woorden, en het reproduceren ervan. Ook bevat

Samenvatting

het uiteraard de woorden zelf. Dit model kan een aantal zaken verklaren die in experimenten gevonden zijn. Zo is bekend uit de literatuur dat de eerste woorden uit de lijst en de laatste woorden uit de lijst beter herinnerd worden dan de woorden uit het midden van de lijst. Dit worden het primacy-effect en het recency-effect genoemd. Beide effecten zijn normaal aanwezig, maar kunnen in bepaalde varianten van het experiment verdwijnen. Zo verdwijnt het primacy-effect als proefpersonen een bepaalde instructie krijgen over hoe ze woorden moeten repeteren. Het recency-effect verdwijnt als er tijd zit tussen het leren van de lijst en het reproduceren. Als deze tijd lang is, kan het recency effect zelfs negatief worden, wat betekent dat de laatste woorden uit de lijst zelfs slechter herinnerd worden. Het ACT-R model kan al deze verschijnselen nabootsen en verklaren.

Bovenstaand voorbeeld illustreert een aantal belangrijke aspecten van een model. Het feit dat het model een lijstje woorden kan reproduceren is op zich niet zo interessant. Waar het om gaat is dat de specifieke effecten die gevonden worden in het experiment, primacy en recency, voorspeld kunnen worden, en dat ook de omstandigheden kunnen worden nagebootst waarin beide effecten niet optreden.

Maar hoe zit het dan met echt complexe problemen?



Bij het voorbeeld van free-recall mogen we aannemen dat mensen over de kennis beschikken die ze nodig hebben om het experiment te doen, zoals woorden lezen, ze mentaal repeteren en later reproduceren. Bij echt complexe problemen moeten mensen echter nog uitzoeken hoe deze in elkaar zitten, en wat de methoden zijn om ze op te lossen. Een voorbeeld van zo'n complex probleem is roosteren. Roosteren is een probleem dat volgens de complexiteitstheorie in zijn algemeenheid onoplosbaar is voor computers. Als mensen roosterproblemen moeten oplossen, dan moeten ze dit eerst leren.

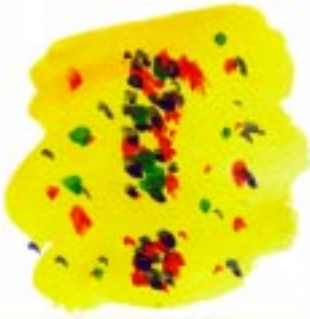
Om beter inzicht in dit proces te krijgen, heb ik een experiment gedaan waarin proefpersonen roosterproblemen moesten oplossen. Tijdens het oplossen moesten ze hardop denken. Bij het begin van het experiment krijgen ze instructies, maar deze zijn onvoldoende om het probleem op te lossen. Dus moeten proefpersonen een beroep doen op kennis die ze al hebben, en moeten ze door dingen te proberen het probleem in de vingers krijgen.

Uit het experiment bleek, dat proefpersonen soms heel erg vast kwamen te zitten in een probleem. Dit wordt wel een impasse genoemd. In een aantal gevallen kwamen proefpersonen vervolgens met een nieuwe idee, een nieuw inzicht om het probleem op te lossen. Ook bleek dat als proefpersonen zich eenmaal zo'n inzicht hadden verworven, ze dit bij latere problemen ook gingen toepassen. Behalve dit verwerven van inzichten zijn er nog een aantal interessante verschijnselen uit het experiment te

halen. Zo moest in één versie van het experiment alles uit het hoofd gedaan worden, met als gevolg dat proefpersonen hun aandacht moesten verdelen over enerzijds het repeteren van de al gevonden oplossing, en anderzijds het redeneren hierover.

Al met al wijst het roosterexperiment erop dat er een breed scala van leerverschijnselen plaatsvindt bij het verwerven van een complexe vaardigheid. Proefpersonen interpreteren instructies en stippelen op grond hiervan een strategie uit, tijdens het experiment ontdekken ze nieuwe strategieën, en ook worden ze beter in de meer elementaire stappen van het proces, zoals de coördinatie van het repeteren van deeloplossingen. De conclusie moet dus zijn, dat prestatieverbeteringen niet aan één leereffect toe te schrijven zijn, maar aan een aantal. Om beter inzicht te krijgen in de leereffecten die een rol spelen, is het nuttig om deze effecten afzonderlijk te bestuderen.

Impliciet en expliciet leren



In de psychologische literatuur wordt vaak het onderscheid gemaakt tussen impliciet en expliciet leren. Impliciet leren is het “leren door te doen”. Zonder actief bezig zijn met het leerproces, en vaak ook onbewust, worden mensen beter in het uitvoeren van een taak. Bij expliciet leren daarentegen zijn mensen actief bezig met iets te leren, zoals het leren van een lijst woorden, of het uitdenken van een strategie voor een moeilijk probleem. Psychologische experimenten hebben uitgewezen dat er interessante verschillen zijn tussen beide soorten leren. Zo is impliciet leren veel robuuster dan expliciet leren: de geleerde kennis

wordt minder snel vergeten, zowel kinderen, ouderen, en minder intelligente individuen zijn even goed in impliciet leren als ieder ander. Zelfs mensen die leiden aan geheugenverlies (amnesie) kunnen nog wel impliciet leren. Bij expliciet leren zijn er wel grote verschillen tussen individuen, en de geleerde kennis wordt soms weer snel vergeten. Op grond van deze verschillen wordt door een aantal onderzoekers aangenomen dat impliciet en expliciet leren daarom plaatsvindt in verschillende hersendelen. Dit wordt de systems-theorie genoemd.

Hoewel deze systems-theorie vrij aannemelijk klinkt, kent hij toch een aantal problemen. Zo kan deze theorie niet goed verklaren waarom impliciet leren zoveel robuuster is dan expliciet leren, dus waarom het eigenlijk bijna nooit voorkomt dat mensen nog wel expliciet kunnen leren, maar niet impliciet. Ook kan de theorie niet verklaren, waarom er zoveel individuele verschillen zijn in expliciet leren, maar niet in impliciet leren. In dit proefschrift behandel ik een alternatieve theorie. Eerst laat ik door middel van een model zien, dat het verschil tussen impliciet en expliciet leren ook prima met behulp van één geheugensysteem verklaard kan worden, namelijk het declaratief geheugen van ACT-R. Het verschil tussen impliciet en expliciet leren in

dit model is, dat impliciet leren verklaard kan worden vanuit de leermechanismen die in de ACT-R architectuur verankerd zijn. Je zou ze dus kunnen vergelijken met de leerprocessen die deel uitmaken van onze hersenen. Expliciet leren kent echter specifieke leerdoelen. Een eenvoudig voorbeeld van een leerdoel is het onthouden van een lijstje woorden door ze te repeteren. Door dit repeteren zet je als het ware de impliciete leermechanismen van de hersenen aan het werk, net als wanneer je door te trainen je spieren sterker maakt. Leerdoelen kunnen ook complexer zijn, zoals het bedenken van een nieuwe strategie voor een complex probleem. Al deze leerdoelen hebben als gemeenschappelijk kenmerk, dat je kennis nodig hebt om ze te kunnen vervullen. Het blijkt bijvoorbeeld, dat kinderen niet of anders lijsten repeteren dan volwassenen. Aangezien expliciet leren gebaseerd is op kennis, zijn er daarom ook veel grotere verschillen tussen individuen. Ook is het daarom minder robuust: als de kennis om leerdoelen uit te voeren vergeten wordt, of door hersenbeschadiging verloren is gegaan, werkt het expliciet leren niet meer, terwijl de basiseigenschappen van de hersenen die ten grondslag liggen aan impliciet leren niet zomaar veranderen.

Hoe werken dan die leerstrategieën, en hoe komen we eraan?



Aangezien impliciet leren al onderdeel is van de architectuur, is het met name interessant om te kijken naar het expliciete leren, waarvoor kennis nodig is. Hoe ziet zo'n leerstrategie er in praktijk uit? En wanneer is het nuttig om zo'n strategie toe te gaan passen? En hoe leren we de leerstrategieën zelf? Om een beter inzicht in deze materie te krijgen is het nuttig om naar de cognitieve ontwikkeling van kinderen te kijken. Immers, als expliciet leren bestaat uit aangeleerde kennis, hebben jonge kinderen minder van deze kennis dan oudere kinderen en volwassenen. Een aantal theorieën over ontwikkeling lijken deze

visie te ondersteunen. Jonge kinderen hebben grote moeite om om te gaan met abstracte begrippen. Volgens de theorie van Fischer, bijvoorbeeld, gaan kinderen door een aantal stadia waarin ze over steeds complexere structuren en concepten kunnen redeneren. Een voorbeeld hiervan is dat jonge kinderen nog niet kunnen redeneren over een concept als "rood". Ze kunnen wel zien dat een bepaald object rood is, maar ze kunnen nog niet over "rood" als abstract begrip, dus los van een object, redeneren. Gevolg hiervan is, dat ze zich anders gedragen dan volwassen in een experiment waarbij zowel abstraheren als niet-abstraheren tot een oplossing leidt (het z.g. discrimination-shift experiment). In ACT-R is dit goed te modelleren door twee leerstrategieën te definiëren. Met beide leerstrategieën gedraagt het model zich als een volwassene, terwijl het zich met een van beide leerstrategieën als een kind gedraagt.

Wanneer gebruiken we een leerstrategie eigenlijk? Uiteraard zijn we niet de hele dag bezig met het stellen van leerdoelen. Deze moeten alleen gesteld worden op momenten dat dat nodig is. Een mogelijke theorie hierover is die van meta-cognitie. Deze theorie veronderstelt dat we een “gewoon” redeneersysteem hebben en een systeem dat over het gewone redeneersysteem waakt, het meta-systeem. Het meta-systeem houdt het gewone systeem in de gaten en grijpt in wanneer dat nodig is. Het meta-systeem kan dus bijvoorbeeld een leerdoel stellen op het moment dat het gewone redeneersysteem vast loopt.

De meta-cognitietheorie heeft echter een aantal problemen. Het toevoegen van een extra systeem aan een theorie is wetenschappelijk gezien nooit zo’n aantrekkelijke optie, omdat het de theorie zwakker maakt. Maar ook is het de vraag waardoor het meta-systeem dan gecontroleerd wordt. Een meta-meta-systeem? Gelukkig is een meta-systeem niet echt nodig, hetgeen te zien is aan de hand van een zogenaamd dynamisch-groeimodel dat gebaseerd is op de kosten-baten analyse uit ACT-R. Het centrale idee in dit model is dat er een competitie plaatsvindt tussen het denkproces dat gewoon de taak wil uitvoeren en het denkproces dat een leerdoel wil stellen. Beide processen hebben kosten en opbrengsten: taakuitvoeringsprocessen hebben meestal lage kosten en leiden meestal tot de oplossing van een probleem. Leerdoelen kosten meestal meer tijd op uit te voeren, en leiden slechts indirect tot een oplossing van een probleem. Normaal gesproken is het uitvoeren van de taak aantrekkelijker. Als dit proces echter regelmatig fout loopt, doordat de kennis niet klopt of het proces te omslachtig is, zal de kosten-baten analyse van de taakuitvoeringsprocessen niet meer zo gunstig uitvallen, en zullen de leerstrategieën de competitie winnen.

De vraag die blijft liggen is hoe leerstrategieën zelf geleerd worden. Leerstrategieën zelf zijn ook vaardigheden. Een mogelijkheid is dat leerstrategieën net zo geleerd worden als andere vaardigheden, maar dan op een langere tijdschaal. In dit proefschrift zal ik hiervan echter geen concrete voorbeelden behandelen.

De rol van het formuleren van regels en het onthouden van voorbeelden



Wat is precies nieuwe kennis voor een nieuw probleem? Het gebruikelijke idee is, dat mensen algemeen geldige regels proberen af te leiden. Een algemene regel zou bijvoorbeeld kunnen zijn: “als je een voorwerp in de lucht houdt en het loslaat, dan valt het op de grond”. Deze regel is algemeen, omdat deze voor elk voorwerp geldig is. Je zou een dergelijk regel kunnen afleiden op grond van het feit dat je al een aantal voorbeelden hebt gezien van voorwerpen die op de grond vallen, en nog (bijna) nooit een, die in de lucht blijft hangen. Er is echter ook een alterna-

tieve theorie, die stelt dat we helemaal geen algemene regels leren, maar voornamelijk voorbeelden onthouden. Deze voorbeelden kunnen we gebruiken voor nieuwe

Samenvatting

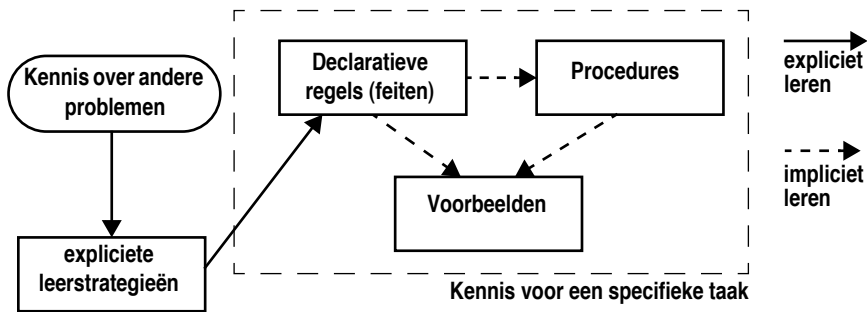
voorspellingen. Als je dus moet voorspellen of een bal valt als je hem loslaat, zou je je een voorbeeld kunnen herinneren van het vallen van een steen. Deze strategie van het onthouden van voorbeelden is zeer krachtig. Uit een experiment waarin proefpersonen een suikerfabriek moeten besturen blijkt bijvoorbeeld, dat hun gedrag volledig verklaard kan worden door het feit dat ze voorbeelden onthouden. Dit blijkt uit een ACT-R model van deze taak, dat uitsluitend voorbeelden onthoudt en weer terughaalt, en hetzelfde gedrag vertoont als proefpersonen. Een mogelijke verklaring voor het feit dat de prestaties zo aan voorbeelden toe te schrijven zijn, is dat de suikerfabriek zo in elkaar zit dat het bijna onmogelijk is om de echte regel achter de fabriek te ontdekken.

Om een betere afweging te maken tussen de regel- en de voorbeeldtheorie, is een taak nodig waarbij zowel het afleiden van regels als het onthouden van voorbeelden een mogelijke strategie is, en waarbij de keuze in de resultaten terug te vinden is. De Fincham-taak voldoet aan deze criteria. In deze taak krijgen proefpersonen een gebeurtenis en een tijdstip, en moeten ze voorspellen wanneer de gebeurtenis nog een keer plaatsvindt. Dit kan zowel geleerd worden door het onthouden van voorbeelden ("Als hockey of maandag is, dan is het de tweede keer op woensdag.") als het afleiden van regels. ("De tweede keer hockey is altijd twee dagen na de eerste keer.") Uit de resultaten van de experimenten met deze taak en het ACT-R model is af te leiden, dat mensen van beide strategieën gebruik maken, dus zowel van regels als van voorbeelden. De keuze van strategie hangt wederom af van een kosten-baten analyse: als een bepaald voorbeeld vaker voorkomt, zal de voorbeeld-strategie vaker worden gekozen. Voorbeelden worden echter ook weer snel vergeten, dus als er een dag tussen de testafnames zit, dan wordt het gedrag aan het begin van de volgende dag gedomineerd door de regel-strategie. Ook hier blijkt, net als bij de keuze tussen gewoon redeneren en het stellen van leerdoelen, dat de kosten-baten analyse die in ACT-R is ingebouwd een goede voorspeller is van gedrag.

Alle puzzelstukjes weer bij elkaar



De verschillende modellen van verschillende aspecten van leren kunnen worden samengebracht in één model, dat gebruikt kan worden voor een model van roosteren. Dit model is weliswaar nog niet zo slim als mensen in het oplossen van roosterproblemen, maar vertoont wel een groot aantal kenmerken die ook in menselijk leren worden aangetroffen. Zo probeert het model in eerste instantie om regels te formuleren die het probleem oplossen (zie figuur bovenaan de pagina). Deze regels worden in eerste instantie gewoon opgeslagen als feiten in het declaratief geheugen. Hierbij wordt gemaakt van een expliciete leerstrategie, die probeert analogieën te vinden tussen de gezochte kennis en andere kennis waarover



het model al beschikt. Het model weet bijvoorbeeld niet zoveel af van roosters, maar wel van het maken van lijsten. Een mogelijkheid is dus om kennis over lijsten te gebruiken voor het maken van roosters. Declaratieve regels zijn heel flexibel, maar hebben als nadeel dat ze de volle aandacht vereisen om ze te kunnen gebruiken. Bovendien kunnen ze ook makkelijk weer vergeten worden. Daarom worden deze regels langzaam omgezet in procedures in het procedureel geheugen. Daardoor worden ze veel sneller, en worden minder snel fouten gemaakt. Naast regels onthoudt het model ook voorbeelden van hoe iets is opgelost, die later weer gebruikt kunnen worden. Tussen de bedrijven door moet het model ook nog de tussenresultaten repeteren die het tot dan toe heeft afgeleid.

Het moge duidelijk zijn dat er nogal wat mis kan gaan in dit proces, en dit gebeurt ook in het model. Het aardige hiervan is, dat de fouten die het model maakt, overeenkomen met het soort fouten dat proefpersonen maken. Tevens is het vóórkomen van fouten een bron van individuele verschillen: sommige individuen hebben veel problemen met het onthouden van tussenresultaten, en andere veel minder. Deze verschillen kunnen gerelateerd worden aan verschillen in de capaciteit van het werkgeheugen. Het model laat echter zien, dat deze verschillen slechts tijdelijk zijn: na voldoende oefening zijn de prestaties van individuen met een klein werkgeheugen bijna net zo goed als die van individuen met een groot werkgeheugen.

Hoewel het model van roosteren nogal uitgebreid is, biedt het veel aanknopingspunten voor generalisatie. In tegenstelling tot veel cognitieve modellen is de kennis niet echt voorgeprogrammeerd, en slechts indirect beschikbaar in de vorm van feitenkennis. Het model leert dus zelf de benodigde regels. Door de feitenkennis van het model te veranderen wordt ook het gedrag veranderd, en kan hetzelfde model ook heel andere taken uitvoeren.

Conclusies



Menselijk leren van nieuwe vaardigheden is een complex cognitief fenomeen, dat niet met een enkelvoudige theorie in kaart te brengen is. Niettemin is het mogelijk op grond van de modellen uit dit proefschrift een redelijk consistent totaalbeeld te schep- pen, dat goed aansluit op bestaande ideeën in de cognitiewetenschap. Ook maakt deze theorie bepaalde constructies overbodig, zoals meta-cognitie en aparte impliciete en expliciete geheugensyste- men. Wel is duidelijk dat het menselijk leervermogen geen gesloten systeem is: het is altijd mogelijk

nieuwe leerstrategieën te ontdekken of van iemand anders te leren. Het precies in kaart brengen van hoe leerstrategieën zelf geleerd worden is een uitdaging voor met name de ontwikkelingspsychologie.

De gepresenteerde theorie van het leren van nieuwe vaardigheden kent ook ruime mogelijkheden voor het in kaart brengen van individuele verschillen. Niet alleen verschillen individuen in beschikbare leerstrategieën, maar ook in eigenschappen die betrekking hebben op de onderliggende architectuur, zoals de capaciteit van het werkgeheugen. Het is daarom niet zo verwonderlijk dat elke proefpersoon com- plexe problemen als roosteren weer anders oplost.

Hoewel het onderzoek in dit proefschrift voornamelijk theoretisch van aard is, zijn er een aantal toepassingsvelden mogelijk. In de cognitieve ergonomie kan het inzicht van hoe nieuwe vaardigheden worden geleerd gebruikt worden in het ontwerp van computerprogramma's. Deze inzichten zijn om dezelfde reden van belang in het ontwikkelen van computer-ondersteund onderwijs.

Een geünificeerde theorie van leren?



In dit proefschrift heb ik een theorie van leren geschetst, die bestaat uit delen van bestaande theorieën, aangevuld met verbindende elementen die met name geïnspireerd zijn door de rationele theorie achter ACT-R. Vooral nog bestaat deze theorie uit een algemeen verhaal en een verzameling computermode- llen die deelaspecten illustreren. Het roostermodel levert daarnaast een voorbeeld van de theorie in zijn geheel. Een echte geünificeerde theorie van leren is echter nog wat concreter: daarvoor is een simulatie- programma nodig dat alle elementen uit de theorie bevat. Een dergelijk programma zou een uitbreiding op ACT-R moeten zijn, en zou in staat moeten zijn uit instruc- ties zelf de kennis te leren die nodig is voor het uitvoeren van een taak. Wellicht kan dit proefschrift een eerste stap zijn in de ontwikkeling van zo'n theorie.