

Learning without Limits

From problem solving towards a unified theory of learning

Beoordelingscommissie:

Prof. dr. J.R. Anderson

Prof. dr. J.A. Michon

Prof. dr. P.L.C. van Geert

Paranimfen:

Alwin Visser

Hans van Ditmarsch

Druk:

Universal Press

Rijksuniversiteit Groningen

Learning without Limits

From Problem Solving
towards a Unified Theory of Learning

Proefschrift
ter verkrijging van het doctoraat in de
Psychologische, Pedagogische en Sociologische Wetenschappen
aan de Rijksuniversiteit Groningen
op gezag van de
Rector Magnificus, dr. D.F.J. Bosscher
in het openbaar te verdedigen op
donderdag 24 juni 1999
om 14.15 uur
door
Niels Anne Taatgen
geboren op 6 mei 1964
te Enkhuizen

Promotores:

Prof. dr. G. Mulder

Prof. dr. G. R. Renardel de Lavalette

ISBN: 90-367-1061-8

Voorwoord

Een van de momenten die ik me nog kan herinneren van toen ik nog heel klein was, is het moment waarop ik heb leren lezen. Ik moet een jaar of vijf zijn geweest, ik zat thuis (we woonden op een boot) en was bezig met het bestuderen van een boek. Ik begon uiteraard niet met een blanco lei: ik kende alle letters, en ook kon ik al een aantal woorden lezen (die kende ik gewoon uit mijn hoofd). Maar ik kon nog niet zomaar een willekeurig woord lezen. Terwijl ik zo bezig met het uitspreken van woorden die ik al kende en het uitspreken van klanken bij letters die ik nog niet kende, werd mij plotseling duidelijk wat de bedoeling was. Als ik de klanken van de letters van een woord snel uitsprak, en tegelijkertijd naar mezelf luisterde, dan kon ik het woord dat op papier stond verstaan, en dus lezen! Zo verguld was ik met deze ontdekking, dat ik prompt het hele boekje heb uitgelezen (het was een kinderboek, dus dat viel nog wel mee).

Deze herinnering heeft een aantal opmerkelijke kenmerken. Een eerste kenmerk is natuurlijk, dat ik me een gebeurtenis van zo lang geleden nog kan herinneren. Maar voor mij was het dan ook een belangrijk punt in mijn leven: de mogelijkheid te kunnen lezen opent zoveel nieuwe mogelijkheden, dat het beginpunt daarvan natuurlijk memorabel is. Maar een tweede, nog opmerkelijker kenmerk is het alles-of-niets karakter van de gebeurtenis. In luttele minuten beschikte ik over een complexe vaardigheid die ik daarvoor nog niet had. Uiteraard was er wel wat voorwerk nodig om dit moment te kunnen bereiken: de kennis van de letters, het kunnen lezen van enkele woorden, en natuurlijk de vaardigheid om taal te kunnen spreken en te kunnen verstaan. Maar het kwam wel samen in dat ene moment.

Voorwoord

Dit proefschrift gaat over dit soort momenten, momenten waarna we opeens veel meer kunnen dan ervoor. Het zijn deze momenten die ons mensen in staat stellen om bijna alles wat maar leerbaar is ook te leren. En dat maakt het onderzoek ernaar zo fascinerend, maar tegelijk ook zo moeilijk.

Mijn interesse voor het begrijpen van menselijk denken heeft een lange geschiedenis. Het is allemaal begonnen met Lego, waarmee je alles kon bouwen wat je fantasie je ingaf. Geleidelijk kwamen hier motortjes, schakelaars en lichtgevoelige cellen bij, en voor ik het wist was mijn interesse verschoven naar electronica. Via electronica kwam ik bij de eerste microcomputers terecht, toen nog dingen die uit een printplaat bestonden en geprogrammeerd werden door het intypen van getallen. Nadat ik mijn eerste computer had gekregen (een Commodore PET 2001), was mijn computertijdperk definitief begonnen. Tijdens mijn studie informatica werd mijn interesse gevangen door iets dat nóg ingewikkelder is dan de computer: de menselijke hersenen. Uiteindelijk heeft mij dit via psychologie bij de oprichting van Technische Cognitiewetenschap terecht doen komen, een tak van wetenschap die alles combineert wat mij interesseert.

Vele mensen hebben, direct of indirect, bijgedragen aan het tot stand komen van dit proefschrift. John Anderson wil ik bedanken voor wellicht de belangrijkste bijdrage aan dit proefschrift, de ACT-R theorie. Ook ben ik erg blij dat hij lid is van de beoordelingscommissie en bereid is voor mijn promotie naar Groningen te komen. Een ander lid van de beoordelingscommissie, John Michon, heeft niet alleen aan de wieg gestaan van de studie Technische Cognitiewetenschap, maar heeft ook in de beginperiode van mijn promotieonderzoek en daarvoor mijn afstudeeronderzoek een belangrijke invloed gehad om mijn denken over cognitie. Ik ben blij dat hij nu, aan het einde van het project, er wederom bij betrokken is. Paul van Geert mag ik in dit kader zeker ook niet vergeten te bedanken, met name omdat hij, ondanks zijn vele verantwoordelijkheden als onderzoeksdirecteur, de tijd heeft gevonden om met name mijn beweringen over de ontwikkelingspsychologie kritisch tegen het licht te houden.

Om tot een goed wetenschappelijk product te komen is het belangrijk om regelmatig met mensen te discussiëren die met hetzelfde bezig zijn als jezelf. Alexander van den Bosch, ook een Groninger ACT-R-er van het eerste uur, is een belangrijk voorbeeld van zo iemand. Daarnaast waren ook anderen uit de ACT-R groep uit Groningen een belangrijk klankbord: Mark Dekker, Ritske de Jong, Hedderik van Rijn, Pieter de Vries en Alan White. Ook wil ik in deze context Aladin Akyürek noemen, die in de beginperiode van mijn onderzoek een belangrijke discussiepartner was. Aladin was vaak zo kritisch dat ik er soms bijna moedeloos van werd. Vooral ook omdat hij meestal gelijk had. Dieter Wallach, die ik in het kader van de ACT-R workshop in Pittsburgh heb ontmoet, bleek eveneens een goede partner in het onderzoek: delen van hoofdstuk 6 zijn mede van zijn hand.

Niet alleen onderzoeksgenoten hebben belangrijke bijdragen geleverd aan mijn onderzoek. Met name ook de andere Technische Cognitiewetenschappers zijn door het creëren van een goede werksfeer onontbeerlijk gebleken. Tjeerd Andringa en Petra Hendriks, collega's van het eerste uur, maar ook Tinie Alma, Rineke Verbrugge, Gerard Vreeswijk, Ronald Zwaagstra, Esther Stiekema, Ben Mulder, Henk Mastebroek, Frans Zwarts en niet te vergeten Hans van Ditmarsch, die tijdens zijn vakantie het hele manuscript doorgelezen en becommentarieerd heeft, een taak die vooruitloopt op zijn functie van paranimf. Ook vallen in deze categorie de collega's van de sectie Experimentele en Arbeidspsychologie.

Studenten spelen in veel promotieonderzoeken een belangrijke rol. Annelies Nijdam, Richard Vos en Thijs Cotteleer hebben elk hun bijdrage geleverd. Daarnaast zijn er natuurlijk alle TCW-studenten, die met hun enthousiasme, nieuwsgierigheid en motivatie voor een continu positief achtergrondgeluid zorgen.

Niet alleen collega's, maar ook vrienden zijn van belang. Evelyn van de Veen heeft op het laatste moment binnen twee weken het hele manuscript op taalfouten gecontroleerd, en heeft daarbij een van de laatste hobbels op weg naar de drukker weggenomen. Alwin Visser, een van de paranimfen, is al tien jaar lang samen met mijn roeiploeg "Wrakhout" een belangrijke sportieve steun.

Dan kom ik nu bij Linda Jongman. Linda, je valt eigenlijk in alle categorieën. Niet alleen ben je voor mij persoonlijk heel belangrijk, je hebt ook nog een inhoudelijke bijdrage geleverd aan dit proefschrift (het experiment op pagina 192-193). Bovendien was jij altijd de eerste die mijn schrijfwerk aan een kritische blik onderwierp, en mij waarschuwde als ik met al te onbegrijpelijke schema's dingen juist onduidelijker in plaats van duidelijk maakte.

Tenslotte wil ik mijn promotoren, Bert Mulder en Gerard Renardel de Lavalette bedanken voor de tijd die ze in mijn begeleiding hebben gestoken. De gezamenlijke gesprekken waren voor mij altijd een bron van inspiratie. Met name voor Bert, die ondanks zijn ziekte nog al mijn hoofdstukken nauwkeurig bekeken heeft, heb ik grote bewondering.

Mijn taak zit erop, het is nu aan de lezer om mijn voetstappen in onderzoeksland na te lopen. Voor degenen die niet de volle tocht willen ondernemen, wil ik de verkorte route in de vorm van de Nederlandse samenvatting achter in het proefschrift aanbevelen, aangezien ik mijn best heb gedaan daar een zo begrijpelijk mogelijk verhaal van te maken.

Groningen, 23 april 1999

Niels Taatgen

Voorwoord

Contents

CHAPTER 1

Introduction 1

The weak method theory of problem solving 2

Problems of the weak-method theory 4

Problem solving from the viewpoint of skill learning 6

How to study learning in complex problem solving? 9

NP-complete problems 12

The consequences of intractability 15

Examples of NP-complete problems 16

Examples in Planning 16

Language 18

Puzzles and games 20

Mathematics 21

The limits of task analysis, or: why is learning necessary for problem solving? 21

Overview of the rest of the thesis 23

CHAPTER 2

Architectures of Cognition 25

What is an architecture of cognition? 26

An architecture as a theory 27

Judging the success of an architecture 30

Matching model predictions with experimental data 32

An overview of current architectures 34

Contents

	<i>Soar</i>	34
	<i>ACT-R</i>	39
	<i>EPIC</i>	45
	<i>3CAPS</i>	47
	<i>A summary of the four architectures</i>	47
	Neural network architectures	49
	Machine learning	50
	Conclusions	55
	Appendix: The ACT-R simulation system	55
CHAPTER 3	<i>Scheduling</i>	59
	Introduction	60
	Experiment	61
	<i>Method</i>	63
	<i>Analysis of the results</i>	64
	Analysis of solution times	64
	<i>An informal analysis</i>	64
	<i>An analysis using multilevel statistics</i>	66
	<i>Analysis of the first part of the experiment</i>	67
	<i>Analysis of the second part of the experiment</i>	70
	Conclusions	70
	Analysis of verbal protocols	71
	<i>Analysis of participant 2</i>	72
	<i>Quantitative analysis</i>	83
	Conclusions	85
	<i>Maintaining the current problem context</i>	86
	<i>The role of insight and rule learning</i>	87
	Appendix: Proof of NP-completeness of fully-filled precedence constrained scheduling	87
CHAPTER 4	<i>Implicit versus Explicit Learning</i>	91
	Introduction	92
	A model of the dissociation experiment	96
	An ACT-R theory of implicit and explicit learning	101
	A model of rehearsal and free recall	103
	<i>A model of free recall in ACT-R</i>	105
	<i>Simulation 1</i>	106
	<i>Simulation 2</i>	107
	<i>Simulation 3</i>	108

<i>Simulation 4</i>	108
<i>Simulation 5</i>	109
<i>Discussion</i>	111

CHAPTER 5 *Strategies of learning* **113**

Introduction	114
Search vs. Insight	115
A dynamic growth model	116
<i>The model</i>	117
<i>Results</i>	120
The nature of learning strategies	122
<i>Piaget's stage theory</i>	123
<i>Fischer's levels</i>	124
<i>Karmiloff-Smith's representational redescription</i>	129
<i>Siegler's overlapping-waves theory</i>	130
<i>Discussion</i>	131
Modeling explicit learning strategies in ACT-R	133
An ACT-R model of a simple explicit strategy	135
<i>The beam task</i>	135
<i>Simulation results</i>	137
<i>Discrimination-shift learning</i>	140
Discussion	141

CHAPTER 6 *Examples versus Rules* **143**

Introduction	144
Learning strategies	146
<i>Instance-based learning</i>	147
<i>Learning production rules</i>	148
Sugar Factory	152
<i>The Task</i>	152
<i>The models</i>	153
<i>Retrieving instances</i>	154
<i>Theoretical Evaluation</i>	155
<i>Empirical Evaluation</i>	155
<i>Conclusion</i>	157
The Fincham task	157
<i>The ACT-R model</i>	158
<i>Empirical evaluation of the model</i>	163
<i>Experiment 1</i>	163

Contents

Experiment 2 166
Experiment 3 167
Discussion 169

CHAPTER 7

Models of Scheduling 173

Introduction 174
Generalized abstractions 175
 Representation of an abstraction 175
 Chaining abstractions 177
 Proceduralizing abstractions 178
A first model 178
 Storing elements in a list and doing rehearsal 178
 Abstractions that implement a simple strategy 179
 Verbal protocol 179
 Results of the model 179
 Protocol of first problem 181
Learning new abstractions 182
The second model 183
 Example verbal protocol 184
 Results of the model 186
 Individual differences 187
 Is proceduralization necessary for mastering complex skills? 189
Some empirical evidence for the scheduling model 192
Discussion 193
Appendix: Implementation of abstractions in ACT-R 195
 The basic generalized abstraction 195
 Chaining abstractions 200
 Proceduralizing abstractions 201
 Building lists and doing rehearsal 201
 Learning new abstractions 204

CHAPTER 8

Concluding remarks 207

The skill of learning 208
Processes involved in skill learning 210
Individual differences 213
Evaluation of ACT-R 215
 Production compilation 216

<i>Chunk types</i>	216
<i>Base-level decay</i>	217
<i>Production-strength learning</i>	217
<i>Assessing model fits</i>	218
<i>A look back at Soar</i>	218
Practical implications	219
<i>Application in the domain of expert systems</i>	219
<i>Application in the domain of cognitive ergonomics</i>	219
<i>Application in the domain of education</i>	220
A Unified Theory of Learning?	220
<i>Web documents and Publication list</i>	221
<i>References</i>	223
<i>Samenvatting</i>	231
<i>Hoe denken mensen?</i>	231
<i>Een theorie over menselijk redeneren</i>	233
<i>Maar hoe zit het dan met echt complexe problemen?</i>	234
<i>Impliciet en expliciet leren</i>	235
<i>Hoe werken dan die leerstrategieën, en hoe komen we eraan?</i>	236
<i>De rol van het formuleren van regels en het onthouden van voorbeelden</i>	237
<i>Alle puzzelstukjes weer bij elkaar</i>	238
<i>Conclusies</i>	240
<i>Een geïnficeerde theorie van leren?</i>	240
<i>Index</i>	241

Contents