

TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

48

# KENNISSYSTEMEN IN DE INDUSTRIE

ir. J.J.S.C. de Witte, drs. A.Y.L. Kwee



SAMSOM

## KENNISSYSTEMEN IN DE INDUSTRIE

H. J. J. G. ...

Technische  
Afdeling  
van de



The main body of the document contains several paragraphs of text, which are significantly faded and difficult to read. The text appears to be a formal report or technical document, likely containing the author's name, affiliation, and the title of the work.



stichting  
toekomstbeeld  
der techniek

De Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), in 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, heeft als doel:

- het van de ingenieurswetenschappen uit bestuderen van mogelijke toekomstige technische ontwikkelingen, in samenhang met andere maatschappelijke ontwikkelingen
- het op ruime schaal bekend maken van de resultaten van die studies om daarmee bij te dragen tot het verkrijgen van een meer integraal beeld van de toekomstige Nederlandse samenleving.

STT richt zich daarbij tot het bedrijfsleven, de overheden, het onderwijs en – uiteraard – de geïnteresseerde staatsburger.

Het adres van STT is Prinsessegracht 23, Postbus 30424, 2500 GK 's-Gravenhage, telefoon (070) 91 99 00.

# KENNISSYSTEMEN IN DE INDUSTRIE

ir. J.J.S.C. de Witte, drs. A.Y.L. Kwee

1988

Samsom Alphen aan den Rijn/Brussel



*Omslagontwerp:* Rob Eckhardt

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Witte, J.J.S.C. de

Kennissystemen in de industrie / J.J.S.C. de Witte, A.Y.L. Kwee. – Alphen aan den Rijn [etc.]: Samsom. – III. – (Toekomstbeeld der techniek; 48)

Met lit. opg.

ISBN 90-14-03758-9

SISO 527.8 UDC 681.3: [002:338.45] NUGI 859

Trefw.: expertsystemen; industrie.

© MCMLXXXVIII Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 's Gravenhage  
D/MCMLXXXVIII/087  
ISBN 90 14 03758 9

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this work may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Voor de reproductie(s) zoals bedoeld in art. 16b en 17 van de Auteurswet 1912 (ten bate van eigen oefening, studie enz. en/of ten bate van organisaties, instellingen enz.) van een of meer pagina's is een vergoeding verschuldigd. Voor inlichtingen betreffende de hoogte en afdracht van de vergoeding kan men zich wenden tot de Stichting Reprorecht te Amstelveen.

---

# Inhoud

<b>1. Inleiding</b>	7
<b>2. Waarom kennissystemen?</b>	9
2.1 De markt vraagt erom	9
2.2 Beter gebruik van kennis	9
2.3 Investering in nieuwe techniek	11
2.4 Een logische stap in de automatisering	11
2.5 Investering en terugverdientijd	12
2.6 Leereffect	13
<b>3. AI, kennistechniek en kennissystemen</b>	14
3.1 Onderzoek naar artificiële intelligentie	14
3.2 De eerste kennissystemen	14
3.3 Een model voor probleemoplossing	17
3.4 Structuur en werking van kennissystemen	20
3.5 Traditionele computerprogramma's en kennissyste- men	30
3.6 Stand van zaken en vooruitzichten	33
<b>4. Kennissystemen en flexibele fabricagesystemen</b>	39
4.1 Inleiding	39
4.2 Ordergerichte assemblage	40
4.3 Flexibele fabricage van onderdelen	47
4.4 Simulatie van fabricagesystemen	56
<b>5. Kennissystemen voor machines en installaties</b>	59
5.1 Inleiding	59
5.2 Technische ondersteuning bij reparatie, onderhoud en procesbewaking	59
5.3 Automatische procesbesturing	69
5.4 Robots	71
<b>6. Kennissystemen en het ontwerpen</b>	85
6.1 Waarom kennissystemen?	85

6.2	Ontwerpsystemen	88
6.3	Gebruikersvriendelijkheid en integratie van CAD-systemen	102
6.4	Onderzoek en ontwikkeling in Nederland	107
<b>7.</b>	<b>Ontwikkeling, gebruik en onderhoud</b>	<b>110</b>
7.1	Aanzet, bemanning en probleemkeuze	110
7.2	Systeemontwikkeling en kennisverwerving	113
7.3	Keuze van programmatuur en modaliteit	119
7.4	Integratie in het bedrijf	122
7.5	Vier fasen van invoering	123
7.6	Gebruik, beheer en onderhoud	125
<b>8.</b>	<b>De aanpak in de Nederlandse industrie</b>	<b>129</b>
8.1	Koninklijke/Shell Groep	129
8.2	Hoogovens Groep	132
8.3	Akzo	135
8.4	Unilever	137
8.5	DSM	139
8.6	Papierindustrie	140
8.7	Océ-van der Grinten	143
8.8	Comprimo	145
8.9	HCS Technology	147
8.10	Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium	150
8.11	TNO	153
8.12	Het MIKEP-project	155
8.13	ESPRIT II	158
<b>9.</b>	<b>Sociaal-organisatorische aspecten</b>	<b>160</b>
9.1	Beperkingen en mogelijkheden van kennissystemen	160
9.2	Organisatorische aspecten	162
9.3	Sociale aspecten	163
	<b>Bijlage Gereedschappen</b>	<b>168</b>
B.1	Programmatuur	169
B.2	Apparatuur	175
<b>Literatuur</b>		<b>180</b>
<b>STT-publikaties</b>		<b>197</b>



---

# 1. Inleiding

Dit boek behandelt de essentie, stand van zaken en vooruitzichten van kennistechniek voor toepassingen op technische en organisatorische gebieden in de industrie. Het boek richt zich vooral tot lezers die op zoek zijn naar praktisch toepasbare informatie en willen profiteren van de ervaringen van de pioniers die kennistechniek reeds toepasten in hun bedrijf. Daarnaast is het boek geschikt als eerste oriëntatie voor studenten in de techniek en bedrijfskunde. Met deze publikatie wordt een serie van vier boeken voltooid. De andere delen gaan over kennissystemen in het onderwijs [1], kennissystemen en medische besluitvorming [2] en kennissystemen in de dienstensector [3].

Evenals in de andere boeken komen achtereenvolgens theorie, techniek en toepassingen aan bod. In hoofdstuk twee worden veel voorkomende motieven voor de toepassing van kennistechniek beschreven. Het derde hoofdstuk geeft een inleiding in de kennistechniek.

Hierna worden in afzonderlijke hoofdstukken toepassingen van kennistechniek beschreven voor drie deelgebieden van de techniek:

- planning en besturing van flexibele fabricageprocessen;
- onderhoud, reparatie en besturing van complexe technische systemen;
- ontwerpen.

In de hoofdstukken 7 en 8 staat de praktische aanpak centraal. Deze hoofdstukken bieden praktische informatie over methoden en technieken voor ontwikkeling, invoering en onderhoud van kennissystemen. Wie als lezer wil profiteren van ervaringen van anderen vindt daarvoor in hoofdstuk 8 voorbeelden van beleid, aanpak en conclusies bij vooraanstaande Nederlandse bedrijven.

Over sociaal-organisatorische gevolgen van kennistechniek op langere termijn bestaat veel onzekerheid. Men kan echter wel kritische vragen stellen en aangeven welke aspecten in dit verband aandacht behoeven. Dit gebeurt in hoofdstuk 9.

In een bijlage wordt tenslotte een overzicht gegeven van in Nederland verkrijgbare gereedschappen waarmee men kennissystemen kan ontwikkelen.

Bij de totstandkoming van deze publikatie kreeg STT veel steun van de leden van de stuurgroep en de werkgroepen van het project en van



een groot aantal deskundigen die op individuele basis hebben bijgedragen.

De stuurgroep van het project bestond uit prof.dr.ir. J.H. van Bommel, prof. dr. G.A.M. Kempen, prof. J.M. van Oorschot, prof. dipl.ing. F.J. Schramel, ir. W.P. Wapenaar, ir. A.W. Zijlker.

Speciale vermelding verdienen de werkgroepen 'Discrete producten' en 'Industrieel ontwerpen', die ettelijke malen bijeenkwamen voor de voorbereiding en bespreking van dit boek. De eerste werkgroep bestond uit ir. J.C. Emond, dr.ir. A.H. van 't Erve, ir. B. Furth, prof.dr.ir. H.J.J. Kals, ir. A. Kikkert, ir. M.W. McGillivray, ir. A.H. Meijer, prof.dr.ir. J.C. Wortmann. De tweede werkgroep bestond uit ir. A.P. Bremer, mw. ir. J.C. Donker, dr.ir. C. van Leeuwen, K.H. Oey, ir. F. Roode, ir. N.F.M. Roozenburg, ir. H.A. Schaap, drs. E.P.C. van Utteren. Daarnaast hebben de volgende individuele auteurs en anderen meegewerkt aan de totstandkoming van deze publikatie: ir. J. de Boer, ing. S. v.d. Bosch, ir. A. Bouwhuis, drs. F. Eckhard, ir. J.W.J. Geenen, ir. A.P. Gelsing, ir. J.J. Gerbrands, ir. F.O. Gerdes, drs. P.J.W. ten Hagen, prof.ir. G. Honderd, ir. P.P. Jonker, ir. W.L. Kalmijn, dr.ir. E.J. van de Kraats, prof.ir. F.J. Kylstra, ir. J.W. Lubberhuizen, ir. C. Mulder, prof.ir. O. Rademaker, drs. M. Reijnhoudt, mw. drs. A. Schaafstal, ir. B. Sessink, prof.ir. M.P.J. Stevens, dr.ir. J.P.M. Stienen, ir. N. Tholen, ir. G.H. Tuinzaad, prof. A. Tzonis, ir. A.J.M. Veltmeijer, prof.ir. H. Wagter, ir. L.S. Wierda.

Aan al deze medewerkers en adviseurs is STT veel dank verschuldigd. Rosemarijke Otten van STT verleende medewerking bij de organisatie van de studie en de verwerking van de tekst tot deze publikatie.

---

## 2. Waarom kennissystemen?

### 2.1 De markt vraagt erom

Kennissystemen zijn gebruikersvriendelijke computertoepassingen, die kunnen worden gebruikt als hulpmiddel bij probleemoplossing en managementvraagstukken. In dit boek wordt aangegeven voor welke toepassingen en toepassingsgebieden in de industrie kennissystemen worden gebruikt en ontwikkeld. In de andere publikaties van STT over kennissystemen is datzelfde aangegeven voor de dienstensector, het onderwijs en de medische besluitvorming.

Menige organisatie wordt geconfronteerd met een toenemend aantal steeds ingewikkelder problemen en veeleisende klanten. De markt vraagt om voortdurende produktinnovatie en snelle levering van produkten op maat. Terwijl de besturingsmogelijkheden door automatisering toenemen, neemt ook de complexiteit toe.

Om in staat te blijven kwaliteit te leveren zonder dat daardoor de kosten te sterk oplopen, dienen de interne organisatie en de gehanteerde werkwijzen voortdurend op peil te worden gehouden. Automatisering speelt daarbij een grote rol en kennissystemen krijgen daarin een duidelijke plaats. Omdat computers steeds meer kunnen voor minder geld, kunnen met automatisering steeds complexere problemen worden aangepakt. Daarvoor zijn geavanceerde methoden en hulpmiddelen voor systeemontwikkeling nodig. Kennistechniek levert enkele daarvan. Daarom zien veel bedrijven toepassing van kennistechniek, in combinatie met andere innovaties in organisatie en automatisering, als een belangrijke factor voor het behoud van de concurrentiepositie en het tevredenstellen van de klanten.

### 2.2 Beter gebruik van kennis

De complexiteit van produkten en diensten neemt toe en het wordt steeds moeilijker de informatiestromen te overzien en te beheersen. Produktkennis verouderd snel. Daardoor beschikken bijvoorbeeld verkopers of onderhoudsmonteurs vaak over onvoldoende actuele kennis.

Kennissystemen kunnen fungeren als hulpmiddel bij *behoud en overdracht van kennis*. Niet iedere specialist kan zijn kennis zodanig



onder woorden brengen dat anderen daarvan kunnen leren. Bovendien blijven deskundigen slechts een beperkte tijd voor een organisatie werken en is er weinig tijd beschikbaar voor kennisoverdracht. Met kennissystemen kan worden voorkomen dat er problemen ontstaan bij pensionering, vertrek of onvoldoende beschikbaar zijn van deskundigen. Bovendien kan kennis in kennissystemen worden vermenigvuldigd en gedistribueerd, zodat beschikbare kennis beter kan worden gebruikt.

Een nieuwe medewerker zal zijn taak sneller goed kunnen uitvoeren met de adviezen van een kennissysteem waarin de kennis van zijn voorgangers is vastgelegd. De gebruiker van zo'n kennissysteem kan zich na verloop van tijd een deel van de door het systeem gehanteerde kennis eigen maken. Men zou kunnen zeggen dat de gebruiker leert door over de schouder van de 'expert' mee te kijken. Daardoor hoeft bij kennissystemen met een dergelijke toepassing niet te veel aandacht te worden besteed aan onderhoud. Na verloop van tijd heeft de gebruiker zich de in het systeem vastgelegde kennis eigen gemaakt en kan het systeem worden afgeschaft.

Een andere strategische toepassing van kennissystemen komt voort uit de behoefte bepaalde oplossingsmethoden te standaardiseren. Van de gebruikers van een dergelijk systeem wordt verwacht dat zij volgens de richtlijnen van het systeem handelen. Het zal duidelijk zijn dat bij deze toepassingen organisatorische aspecten van vitaal belang zijn voor succesvol gebruik.

Kennistechniek kan worden gebruikt om de specifieke kracht van de computer, het snel en zonder fouten uitvoeren van grote hoeveelheden bewerkingen, te gebruiken ter ondersteuning van de *probleemoplossende vaardigheden* van de mens. Mens en computer vullen elkaar aan. Mensen kunnen slechts met een beperkt aantal begrippen tegelijk redeneren [4]. Bij complexe problemen kunnen redenerende systemen, die deze beperking niet hebben, ondersteuning bieden.

Wanneer fouten ernstige consequenties hebben (bijv. kosten, risico's of uitstel van andere processen) en wanneer toestanden zoals stress, gevaar en snelle veranderingen het de mens steeds moeilijker maken foutloos te werken, kan worden gepoogd de menselijke taken te ondersteunen met kennissystemen. Daarin kan kennis worden vastgelegd van beproefde oplossingen voor problemen die zich in de praktijk kunnen voordoen. Veelbelovende toepassingen liggen op die gebieden waar de combinatie van menselijke en computervermogens kan leiden tot betere oplossingen. De computer levert de brute kracht, de mens zorgt voor besturing, inzicht, creativiteit en de uiteindelijke beslissing. Mensen zijn nog steeds beter in staat de relatieve ernst van situaties of de onafhankelijkheid van symptomen te beoordelen. Ook

kunnen mensen begrijpen wat er in een organisatie van hen wordt verlangd of wat een opdrachtgever werkelijk bedoelt.

Kennissystemen kunnen bijdragen tot betere oplossingen, meer consistentie van gekozen oplossingen, snellere oplossingen en andere belangrijke baten. In de praktijk resulteert dit niet alleen in besparingen en hogere winsten, maar ook in verhoging van produktiviteit en omzet. Distributie van kennis in de vorm van kennissystemen kan dienstverlening en kwaliteit mogelijk op een hoger niveau brengen. Verkopers kunnen maatwerk aanbieden en snel inspelen op veranderende wensen van de klant. In vele bedrijfstakken kan dit concept van klantgerichtheid en maatwerk worden ondersteund door kennissystemen.

### 2.3 Investering in nieuwe techniek

Kennistechniek is het geheel van methoden en technieken waarmee kennissystemen kunnen worden gebouwd. In de praktijk worden onder de verzamelnaam kennistechniek ook de bijbehorende gereedschappen gerekend (zie bijlage). Na een aantal jaren van voornamelijk academische en militaire belangstelling is kennistechniek in het begin van de jaren tachtig ook commercieel interessant geworden. In 1986 had in de Verenigde Staten reeds de meerderheid van de 'Fortune-500' bedrijven fikse bedragen in kennistechniek geïnvesteerd. Ook in Japan en Europa is eenzelfde beeld te zien [5]. Een opinie-onderzoek onder de directies van de 250 grootste bedrijven en instellingen in Nederland heeft uitgewezen dat ruim 45% in 1986 geld heeft uitgegeven aan de ontwikkeling van kennissystemen of aan onderzoek naar de mogelijkheden [6]. De bedragen liepen uiteen van enkele duizenden gulden tot vele miljoenen. Op de vraag naar de plannen voor de komende jaren werd een sterke stijging van de investeringen aangekondigd, die in 1987 en 1988 onder andere resulteerde in een toename van het aantal produkten, leveranciers en gebruikers in Nederland. De eerste Nederlandse kennissystemen zijn in 1987 in dagelijks gebruik genomen (LEASE van de NMB-Bank, TARIEFINFORMATIE van de Nederlandse Spoorwegen (zie [3])). Een voorbeeld uit de industrie is gegeven in 8.6.

### 2.4 Een logische stap in de automatisering

Voor veel bedrijven zijn kennissystemen een logische stap in de automatisering. Marktonderzoekers voorspellen een groei van het aandeel van kennissystemen in de uitgaven voor automatisering van enkele procenten in 1983 tot tientallen procenten in 1990 [5].



In gebieden waar automatisering reeds een grote rol speelt, bijvoorbeeld de procesindustrie, kunnen nieuwe ontwikkelingen eerder worden opgepakt dan daar waar de meeste werkzaamheden met de hand gebeuren. Veelbelovende toepassingsgebieden zijn daarom te vinden in domeinen waar automatisering reeds een grote rol speelt, of daar waar de toepassing goed kan worden afgebakend en problemen op een methodische wijze kunnen worden opgelost. Een voorbeeld van het laatste geven de vele kennissystemen die zijn ontwikkeld als hulpmiddel bij storingsdiagnose.

## 2.5 Investering en terugverdientijd

Sommige van deze redenen kunnen ook worden gebruikt om methodisch werken en automatisering in het algemeen te rechtvaardigen. Kennistechniek maakt ondersteuning van menselijke taken door de computer mogelijk op gebieden die zich niet lenen voor traditionele computertechnieken. Kennissystemen zijn complexe informatiesystemen. Zij zullen daarom veel worden geïntegreerd in andere systemen die de bedrijfsvoering ondersteunen. Maar zoals iedere nieuwe techniek, verdient ook de kennistechniek nog speciale aandacht. De beschikbare gereedschappen zijn nog niet uitontwikkeld. De techniek is nog niet rijp. Er zijn nog geen standaardoplossingen. Er zijn nog geen algemeen toepasbare methoden voor de ontwikkeling van kennissystemen. Er zijn nog nauwelijks kant en klare kennissystemen te koop. Kortom, kennissystemen zijn veelal nog volledig maatwerk, dat alleen kan worden gebruikt op de plaats waar het is ontwikkeld. Toch hebben vele bedrijven besloten nu al over te gaan tot ontwikkeling van kennissystemen. Zij hebben de bijbehorende investeringen daar ruim voor over. Hoewel de markt voor kennistechniek sinds 1982 sterk is gegroeid en marktonderzoekers tot ver in de jaren negentig een sterke groei blijven voorspellen, zijn momenteel de kosten voor de ontwikkeling van een kennissysteem hoog. De technische aspecten worden steeds beter beheersbaar, maar organisatorische aspecten van ontwikkeling, invoering en gebruik vereisen bijzondere aandacht. Wie verzuimt tevoren rekening te houden met de daarbij behorende kosten, kan ernstige problemen verwachten. Afhankelijk van de complexiteit van de toepassing, kunnen de kosten voor ontwikkeling en invoering van een eerste kennissysteem uiteenlopen van honderdduizend tot vele miljoenen guldens. De terugverdientijd kan uiteenlopen van een half jaar tot vele jaren. Hoe groter het systeem, hoe groter de mogelijke besparingen, maar hoe groter ook de investeringen moeten zijn. Besparingen van vele miljoenen dollars werden echter in 1987 al regelmatig gerapporteerd [7].

Vanwege de hoge investeringen die voor grote systemen nodig zijn,

beginnen veel bedrijven met de ontwikkeling van kleine systemen, niet alleen voor de mogelijke besparingen of produktiviteitsverhogingen, maar ook als vingeroefening voor de ontwikkeling van grote geïntegreerde kennissystemen. Om zoveel mogelijk van het leereffect te profiteren, zal een bedrijf ook moeten investeren in eigen onderzoek naar mogelijkheden en haalbaarheid van kennissystemen in de eigen praktijk. De ontwikkeling van kleine prototypen met behulp van geavanceerde gereedschappen blijkt daaraan een goede bijdrage te leveren.

## 2.6 Leereffect

Kennis in huis halen over de mogelijkheden en beperkingen van kennissystemen en de manier waarop deze systemen worden ontwikkeld, is meestal de belangrijkste reden in kennistechniek en de ontwikkeling van systemen te investeren. De ontwikkeling van kennissystemen gebeurt in een aantal fasen. Na een oriëntatiefase en een haalbaarheidsonderzoek wordt meestal een demonstratieprototype ontwikkeld. Pas daarna wordt begonnen aan de ontwikkeling van een kennissysteem voor gebruik in de praktijk. Met de opgedane ervaring wordt de ontwikkeling van een tweede en een derde systeem daarna een stuk gemakkelijker. Er is een duidelijk leereffect. Wie te klein begint of een irrelevant toepassingsgebied kiest, loopt het risico weinig te leren. Wie te ambitieus begint, zal zonder externe ondersteuning grote praktische problemen tegenkomen. Gelukkig kan men zich spiegelen aan de pioniers die in deze publikatie worden gepresenteerd. Hun beleid en aanpak, hun keuze van gereedschap en de systemen die zij hebben ontwikkeld, bieden de lezer voldoende aanknopingspunten voor een eigen beleid en een maximaal leereffect.



---

## 3. AI, kennistechniek en kennissystemen

### 3.1 Onderzoek naar artificiële intelligentie

De vraag of machines kunnen denken, werd al gesteld voordat er computers waren. In de jaren dertig schreef de Engelse wiskundige Turing over de mogelijkheid machines te bouwen die intelligent gedrag vertonen. Voor de beantwoording van de vraag 'Can machines think?' bedacht hij een experiment, bekend als de Turing-test, dat zou moeten uitwijzen in hoeverre dergelijk gedrag bij een machine kan worden aangetoond.

In 1956 gaf McCarthy het verschijnsel dat computers in staat zou stellen menselijk gedrag te vertonen de naam 'artificiële intelligentie' (AI). AI kan worden omschreven als de tak van wetenschap die zich ten doel stelt machines handelingen te laten uitvoeren die, als zij door de mens worden uitgevoerd, intelligentie vereisen. Dit trachten AI-onderzoekers te bereiken door computers te laten werken met symbolische, niet-algoritmische redeneerprocessen en met representatie van kennis. Definiëring van het begrip intelligentie blijft daarbij meestal achterwege.

Onderzoek naar AI kan worden verdeeld in twee gebieden:

- onderzoek van het menselijk denken;
- onderzoek en ontwikkeling van 'intelligente' computersystemen.

In het eerste gebied dienen computersystemen als model en proefsysteem voor simulatie van het denken van de mens als informatieverwerkend systeem. In het tweede gebied worden computerprogramma's ontwikkeld voor moeilijke taken zoals verwerking en synthese van natuurlijke taal en spraak, beeld- en patroonherkenning, robotica, automatisch programmeren en probleemoplossing.

### 3.2 De eerste kennissystemen

Een van de klassieke onderzoekgebieden van de AI is de oplossing van problemen. In veel onderzoekprojecten staat daarvoor het schaakspel model. Filosofische problemen en spelletjes zijn eveneens geliefde proefterreinen voor AI-onderzoek. Maar ook andere goed afgebakende gebieden lenen zich voor bestudering van de inzetbaarheid van de computer als probleemoplosser. In laboratoria zijn microwerelden

gecreëerd, waarin robots werden aangezet tot intelligent gedrag, zoals het op verzoek opstapelen van gekleurde blokken [8].

Aanvankelijk werd gestreefd naar de ontwikkeling van redenerende systemen die algemeen inzetbaar zouden moeten zijn [9]. In de jaren zeventig kwam men tot het inzicht dat de mens bij het oplossen van problemen behalve redeneervermogen ook specifieke kennis over een probleemgebied gebruikt. De aandacht verschoof van algemeen toepasbare oplossingsmethoden en microwerelden naar systemen die gebaseerd zijn op kennis over specifieke, goed afgebakende probleemgebieden in de werkelijkheid. Overigens wordt het onderzoek naar algemene probleemoplossende systemen wel voortgezet [10].

De nadruk op domeinkennis leidde tot de begrippen kennissysteem ('knowledge based system' of 'knowledge system'), kennistechniek ('knowledge engineering') en kennisanalist ('knowledge engineer'). Kennistechniek is de systematische toepassing van artificiële intelligentie voor praktische doeleinden. In eerste instantie lag daarbij de nadruk op de kennis van experts, die immers schaars en moeilijk toegankelijk is. Vastlegging van expertkennis in kennissystemen gebeurde aanvankelijk door kleine groepen vooraanstaande wetenschappelijk onderzoekers.

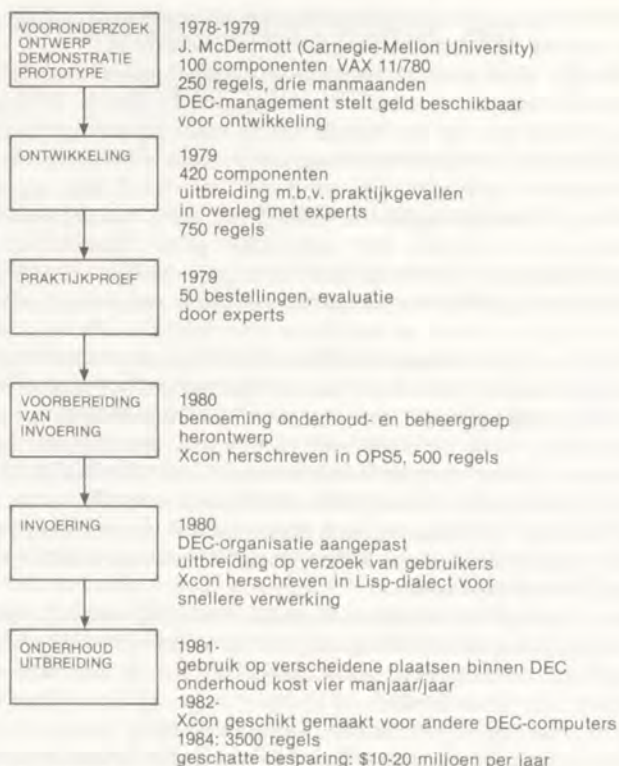
Een van de eerste kennissystemen, MACSYMA [11], ontwikkeld in de jaren zestig, functioneerde zo goed dat het commercieel kon worden toegepast en ook nu nog wordt gebruikt. Het is een interactief programma dat onderzoekers en technici helpt bij het oplossen van complexe wiskundige problemen. De ontwikkeling vroeg een grote inspanning. Een schatting in 1985 wees uit dat het programma sinds de eerste ontwikkelingen in 1968 ongeveer honderd manjaar aan ontwerp- en programmeeractiviteiten heeft gekost.

Ook XCON, het systeem dat DEC en Carnegie-Mellon University hebben ontwikkeld [12], wordt al jaren met succes toegepast en regelmatig uitgebreid (zie afb. 3.1).

De meeste systemen bleven echter binnen de muren van de universiteiten en onderzoekcentra waar zij waren ontwikkeld. Praktische of commerciële toepassingen werden belemmerd door de lange ontwikkelingstijd van de eerste systemen en de krachtige computerapparatuur die zij vereisten. Bovendien hielden de eerste bouwers van kennissystemen zich meer bezig met de vraag of het mogelijk was kennis vast te leggen in computersystemen, dan met het mogelijke praktische nut van dergelijke systemen.

Pas in de jaren tachtig ontstond een doorbraak naar het praktische gebruik. Deze doorbraak werd vooral mogelijk gemaakt door ontwikkelingen op het gebied van programmatuur en apparatuur. Zo kwamen programmeeromgevingen beschikbaar die het ontwikkelen van kennissystemen kunnen versnellen. Er zijn *lege* kennissystemen





Afb. 3.1 Ontstaan van XCON [12, 13, 14].

('empty shells') gemaakt, waarvan de structuur en het redeneermechanisme reeds geheel zijn voorgeprogrammeerd. De toekomstige gebruiker hoeft slechts kennis in te voeren. De ontwikkelingen in de micro-elektronica zorgden voor krachtige computers tegen betrekkelijk lage prijzen. Bovendien werden specifieke computers gebouwd waarmee ontwikkeling en gebruik van kennissystemen drastisch konden worden verbeterd. In de bijlage staat een overzicht van deze gereedschappen.

Een belangrijke stimulans voor wereldwijde ontwikkelingen ging uit van het in 1981 begonnen Japanse tienjarenplan, waarin overheid, universiteiten en bedrijfsleven gezamenlijk 'vijfde generatie'-computersystemen willen ontwikkelen. In dit plan wordt de ontwikkeling van kennissystemen gekoppeld aan de ontwikkeling van geavanceerde computers, gebaseerd op parallelle verwerking. In West-Europa en de Verenigde Staten zijn als reactie op het ambitieuze Japanse initiatief eveneens samenwerkingsverbanden en projecten opgezet,

waaronder ALVEY (Programme for Advanced Information Technology) [15], ESPRIT (European Strategic Programme for R & D in Information Technology) [16], MCC (Microelectronics and Computer Corporation [17] en SCI (Strategic Computing Initiative). In [18] staat een tussentijdse evaluatie van deze projecten. Ook de commerciële ontwikkeling werd hierdoor sterk gestimuleerd. In 1982 haalde AI de voorpagina van Business Week [19]. In 1983 waren al diverse AI-bedrijfs actief.

### 3.3 Een model voor probleemoplossing

Kennissystemen zijn computersystemen die beschikken over expliciete kennis van een specifiek probleemgebied en over een mechanisme waarmee deze kennis kan worden gebruikt om problemen in dit gebied op te lossen. De scheiding tussen kennis en methoden om die kennis toe te passen, is een fundamentele eigenschap die kennissystemen onderscheidt van traditionele informatiesystemen.

Van kennissystemen kan ook worden gezegd dat zij de manier simuleren waarop de mens bepaalde problemen oplost. Deze simulatie is gebaseerd op een model van menselijk probleemoplossen. Dit model wordt hier kort uitgewerkt.

#### Het oplossen van problemen

Een probleem kan worden beschouwd als het verschil tussen een toestand die iemand ervaart en de toestand die hij zich wenst. In het model worden deze toestanden *begintoestand* en *doeltoestand* genoemd. De vraag 'hoe lost de mens problemen op?' wordt vervangen door de vraag 'hoe vindt de mens een verbinding tussen begin- en doeltoestand?'. Volgens de kennistechniek gebruikt de mens daarbij kennis die bestaat uit *operatoren*. Deze operatoren kunnen probleemtoestanden omzetten in andere probleemtoestanden, waardoor uiteindelijk een keten van toestanden ontstaat die begin- en doeltoestand verbindt. Voorbeelden van operatoren zijn de regels van het schaakspel, wiskundige formules of door ervaring verworven vuistregels. Andere operatoren die bij het oplossen van problemen kunnen worden toegepast, drukken uitspraken uit over de werkelijkheid of over definities. Het kan bijvoorbeeld gaan over relaties tussen begrippen (benzeen is een koolwaterstof) of om causale relaties die aan verschijnselen ten grondslag liggen (afname van volume in een gesloten vat met een ideaal gas leidt bij gelijkblijvende temperatuur tot toename van druk).

De verzameling van alle toestanden die kunnen worden bereikt met de operatoren waarover de probleemoplosser beschikt, wordt de



*probleemruimte* genoemd. Het oplossen van een probleem kan worden beschreven als het doorlopen van de probleemruimte tot een opeenvolging van probleemtoestanden is gevonden die begin- en doelttoestand verbinden.

### Goed en slecht gestructureerde problemen

De basis voor het succesvol oplossen van problemen is het herkennen van patronen in probleemtoestanden. Met die patronen kunnen handelingen worden geassocieerd waarmee de probleemruimte doeltreffend kan worden verkleind. De aan deze handelingen verbonden ervaringskennis is verworven door oefening.

In het gunstigste geval worden de patronen van begintoestand en doelttoestand als geheel herkend en in direct verband gebracht met de juiste opeenvolging van operatoren. Men spreekt dan van *goed gestructureerde* problemen. De meeste problemen zijn echter niet goed te structureren. In die gevallen kan de mens, binnen de tijd waarin een probleem moet worden opgelost, niet over alle informatie en kennis beschikken die nodig zijn om de probleemruimte volledig in kaart te brengen. Bovendien is de beschikbare informatie vaak gebaseerd op schattingen of veronderstellingen. De probleemoplosser zal dus veelal slechts gedeelten van begin- of doelttoestand herkennen.

Sommige problemen zijn zelfs fundamenteel niet te structureren, bijvoorbeeld omdat men de doelttoestand niet kan definiëren. Men denke in dit verband aan ontwerpproblemen waarvan men tevoren slechts in grote lijnen het doel kan formuleren, maar waarvan de definitieve vorm tot het laatst onzeker blijft. Andere problemen laten zich kenmerken door een voortdurende verandering van de begintoestand, zoals het weer of de stemming op de effectenbeurs.

Bij *slecht gestructureerde* problemen moet de probleemoplosser uit de schaarse of vage patronen die hij herkent zijn weg zoeken in de probleemruimte. Vaak spelen intuïtie en 'kennis van de wereld' daarbij een grote rol. Een verstandige keuze van de te verwerken invoer kan leiden tot een sterke afname van het aantal zoekstappen. Uiteraard is deze keuze steeds afhankelijk van de situatie die zich voordoet. Soms weet de probleemoplosser zo weinig van het probleemgebied dat hij slechts proefondervindelijk te werk kan gaan. Vaak kan hij echter voldoende kennis over een probleemgebied of kennis over probleemoplossing in het algemeen (gezond verstand) mobiliseren om de probleemruimte op effectieve wijze in te perken. Kenmerkend voor slecht gestructureerde problemen is dat de probleemoplosser niet zeker weet of zijn oplossing optimaal is. Hij zal slechts één of meer bevredigende of mogelijke oplossingen kunnen vinden.

### Vormen van kennis

Naarmate de probleemoplosser in een bepaald domein meer ervaring heeft, zal hij – zo hebben psychologische experimenten uitgewezen – complexere patronen kunnen herkennen en daarmee effectievere combinaties van operatoren kunnen associëren. Het vermogen complexe problemen effectief op te lossen, is dus vooral verankerd in kennis die door ervaring is opgedaan. Men spreekt in dit verband vaak van *heuristische kennis* [20, 21].

Vaak wordt heuristische ervaringskennis aangeduid als *ondiepe kennis*, omdat aan een heuristische regel een veelheid van operatoren ten grondslag kan liggen. Zo kan een bepaalde vuistregel van een automonteur zijn gebaseerd op diverse thermodynamische processen. Deze onderliggende kennis wordt aangeduid met *diepe kennis* [22]. Diepe kennis kan een mens zich door studie eigen maken. Heuristische kennis leent zich vaak goed voor probleemoplossing; diepe kennis is nodig om de gevonden oplossing aan een buitenstaander te kunnen verklaren of om op terug te vallen wanneer ondiepe kennis tekort schiet.

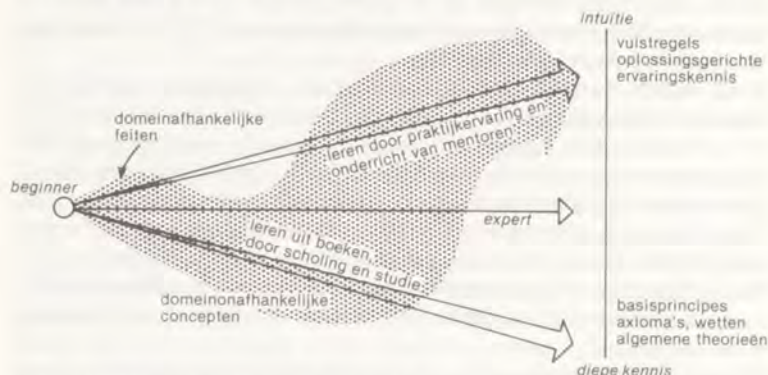
De mens is zich overigens in vele gevallen onbewust van het hanteren van operatoren bij het oplossen van problemen. Hij handelt vaak intuïtief. Het is niet bekend of de mens bij intuïtief handelen onbewust nog steeds afzonderlijke vuistregels hanteert, of op een fundamenteel andere wijze tot een inzicht komt. Er wordt al jaren gediscussieerd over de aard van intuïtie en het aandeel van intuïtie in het denken. Deze discussie heeft uiteraard ook betrekking op de geldigheid van het hier besproken model van probleemoplossing. Aangezien dit model ten grondslag ligt aan de werking van kennissystemen, bestaat er geen consensus over de toekomstige mogelijkheden van kennissystemen als probleemoplossers. De vraag of achter intuïtief handelen kennis schuilgaat die kan worden vastgelegd in een computer, is doorslaggevend voor toekomstige uitbreidingsmogelijkheden en toepassingen van kennissystemen in veel domeinen waarin nog geen successen zijn geboekt. Kritische kanttekeningen over wat computers mogen en kunnen, worden bijvoorbeeld gemaakt in [23, 24, 25]. Ook in [26, 27] wordt hierover van diverse filosofische standpunten uit geargumenteed.

### Leren

Beginners redeneren langs stap voor stap opgebouwde redematiekens. Daarbij gebruiken zij feiten, concepten en diepe, theoretische kennis uit handboeken. Naarmate zij meer ervaring krijgen, zullen zij hun denkstappen meer en meer samenvatten in doelmatige en doelgerichte vuistregels. Naarmate zij meer expertise verwerven, gaat



het expliciet hanteren van vuistregels over in intuïtief handelen. Uiteraard krijgt ook een expert soms te maken met complexe problemen waarmee hij weinig ervaring heeft. In zo'n situatie zal ook een expert terugvallen op analytisch redeneren met basisprincipes en andere diepe kennis [13, 22]. Afb. 3.2 geeft de ontwikkeling van beginner naar expert schematisch weer.



Afb. 3.2 Van beginner naar expert [13, 22].

### 3.4 Structuur en werking van kennissystemen

#### Componenten

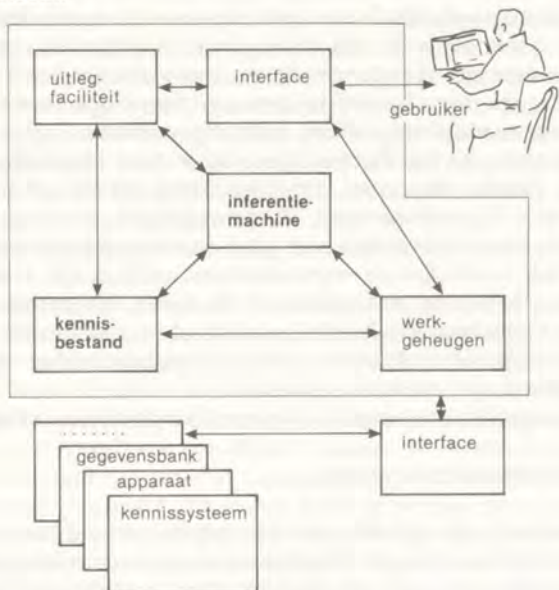
De meeste kennissystemen bestaan uit de volgende componenten (zie afb. 3.3):

- één of meer *kennisbestanden* waarin kennis expliciet is vastgelegd;
- een *werkgeheugen* waarin informatie over probleemtoestanden wordt opgeslagen;
- een *inferentiemachine*, het mechanisme dat de redenering bestuurt.

Voor het effectief functioneren van een kennissysteem zijn verder enige ondersteunende componenten van groot belang. Voor raadpleging door de gebruiker is er een faciliteit voor communicatie, de *gebruikersinterface*. Een andere belangrijke component is de *uitlegfaciliteit* waarmee de redenatiestappen van het systeem kunnen worden toegelicht. Voor optimaal gebruik is het nuttig dat het systeem enige kennis heeft over de gebruiker. De technieken die men hiervoor heeft ontwikkeld, worden echter in de meeste kennissystemen nog niet toegepast.

Kennissystemen zullen overigens niet alleen communiceren met gebruikers. Bij de meeste industriële toepassingen zullen kennissystemen gekoppeld zijn aan informatiesystemen zoals databanken, rekenprogramma's, andere kennissystemen of sensoren.

Afb. 3.3 geeft een schematisch overzicht van de componenten van een kennissysteem.



Afb. 3.3 Componenten van een kennissysteem.

In een *schoolbordarchitectuur* ('blackboard architecture') zijn verschillende kennisbestanden (kennisbronnen) in één systeem verenigd met een gezamenlijk werkgeheugen (schoolbord) [28, 29]. Deze kennisbestanden kunnen verschillende taken hebben. Daarmee is het mogelijk kennis van diverse gebieden of abstractieniveaus in één systeem te laten samenwerken. Dat kan nodig zijn voor toepassingen waarbij snelheid een grote rol speelt. Vandaar dat veel onderzoek wordt gedaan naar combinaties van de schoolbordarchitectuur en parallelle verwerking, waarbij ieder kennisbestand een eigen processor tot zijn beschikking heeft.

In par. 6.3 wordt een voorbeeld gegeven van de toepassing van schoolbordarchitectuur bij kennissystemen voor het ontwerpen.

### Kennisrepresentatie

Representatie van kennis is de essentie van kennissystemen. In het kennisbestand is kennis vastgelegd in *symbolen* en *symboolstructuren*. De symbolen geven begrippen weer waarmee bepaalde objecten, kwaliteiten of kwantiteiten kunnen worden beschreven (bijv. 'destilleerkolom', 'smeerolie', 'verbrandingsmotor', 'temperatuur', 'veel').



Een symbool kan de vorm hebben van een woord, een graaf (zoals in schema's) of een andere niet-talige vorm (bijv. bij beeldherkenning). Omdat symbolen slechts in hun onderlinge relatie een kennisinhoud bezitten, dienen ook de relaties tussen de symbolen expliciet te worden vastgelegd. Hierdoor ontstaan *symboolstructuren*.

Het vastleggen van kennis in een kennissysteem wordt in het algemeen aangeduid met de term *kennisrepresentatie*. Er zijn technieken (formalismen) van kennisrepresentatie voor verschillende vormen van kennis. De eerste kennissystemen waren gebaseerd op representatie in *productieregels*, of kortweg *regels*. Sommige vormen van kennis lenen zich echter niet goed voor representatie in regels. Andere veel voorkomende representatietechnieken zijn *semantische netwerken*, *frames* en technieken uit de *logica*. De keuze van een passende representatietechniek is essentieel voor de bruikbaarheid, de begrijpelijkheid en daarmee ook de toepasbaarheid en de onderhoudbaarheid van een kennissysteem.

Meer over kennisrepresentatie is onder andere te vinden in [30, 31, 32].

#### *Kennisrepresentatie met regels*

Productieregels zijn geschikt om vuistregels, causale verbanden of voorschriften vast te leggen. Regels bestaan uit een *conditie*, (premissie of voorwaarde: als ...) en een *conclusie* (dan ...), of een *actie* (dan doe ...) (zie afb. 3.4). Daarmee kan op relatief eenvoudige wijze een *productiesysteem* ('rule-based system') worden ontwikkeld, bestaande uit regels en een inferentiemechanisme dat de werking van de regels bestuurt ('rule-interpreter').

ALS motor niet start	ALS ideaal gas
EN benzinetank niet leeg	EN gesloten vat
EN bougies schoon zijn	EN volume neemt af
DAN controleer carburateur	EN temperatuur blijft gelijk
	DAN druk neemt toe

Afb. 3.4 Productieregels.

Zolang het aantal regels overzichtelijk is, is het eenvoudig nieuwe regels toe te voegen. Daarbij kan echter na verloop van tijd een lappendeken ontstaan. Daarom is het gebruikelijk regels te groeperen en daarmee structuur aan te brengen in het kennisbestand.

Er is daardoor nogal verschil tussen regels in het ene en regels in het andere systeem. Door structurering van een kennisbestand en het aanbrengen van niveaus van kennis kan het aantal regels sterk worden gereduceerd. Veel systemen zijn in de loop van hun ontwikkeling een aantal malen herschreven. Het aantal regels nam daarbij af, terwijl omvang en reikwijdte van de vastgelegde kennis gelijk bleven of zelfs toenamen. Het aantal regels geeft daarom geen juiste indruk van de complexiteit van een kennissysteem.

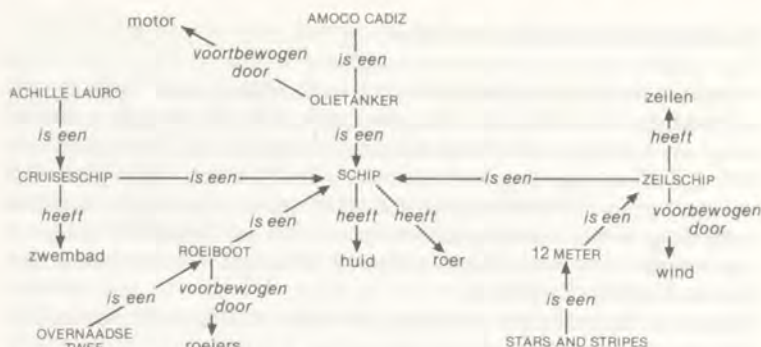


*Kennisrepresentatie met netwerken*

In een semantisch netwerk worden eigenschappen en relaties van objecten, gebeurtenissen, concepten, toestanden of acties gerepresenteerd als knooppunten ('nodes') die door pijlen zijn verbonden (zie afb. 3.5). Sommige kennis leent zich bij uitstek voor deze grafische weergave, bijvoorbeeld in gebieden waarin gegevens een groot aantal onderlinge relaties hebben. Een voordeel van een dergelijke weergave van kennis is de natuurlijkheid van de representatie. Een mens kan zich er iets bij voorstellen.

Meer over semantische netwerken is onder andere te vinden in [33, 34].

Een bijzonder gestructureerde vorm van semantische netwerken zijn 'frames'. Deze hebben een hiërarchische structuur waarin bij elkaar behorende knopen zijn gegroepeerd (zie afb. 3.9). Objecten kunnen in frames worden beschreven als een specialisatie of generalisatie van een ander object of objectklasse. Een frame bundelt eigenschappen (attributen of 'slots') van een object, concept of situatie. Eigenschappen kunnen expliciet worden vastgelegd, bijvoorbeeld als een standaardwaarde ('default'), die alleen hoeft te worden veranderd wanneer een specifieke andere waarde bekend is. Zo is de standaardwaarde van het aantal wielen van een auto '4', maar er zijn natuurlijk uitzonderingen. Deze dienen expliciet te worden aangegeven. Ook kan bij een eigenschap een bereik zijn vastgelegd, bijvoorbeeld 'een geheel getal tussen -10 en 10', of 'één of meer uit de opsomming 'a, ab, abc, abcd, x''. Tenslotte kan een eigenschap aan een frame zijn verbonden in de vorm van een *procedure* of *methode* ('demon'). Een procedure is een functie, formule of programma, waarin staat hoe de waarde van een eigenschap kan worden afgeleid uit de waarden van andere eigenschappen of daarop van invloed kan zijn. Dit kan geschieden door berekening uit waarden die in het frame beschikbaar zijn, maar ook door het vragen van gegevens aan een ander frame. Ook kan in een procedure zijn vastgelegd dat onder bepaalde omstandigheden gegevens naar een ander frame moeten worden verstuurd. Frames zijn daardoor bijzonder geschikt voor *object-georiënteerde* programmering. Objecten kunnen daarin onderling boodschappen uitwisselen, zonder dat daar een strikte besturing van bovenaf aan te pas komt [35]. Object-georiënteerde weergave biedt een basis voor systemen die door hun overeenkomst met de werkelijkheid beter begrijpelijk zijn dan traditionele informatiesystemen. Dit komt goed tot uiting in de grafische gebruikersinterface van werkstations en computers zoals de Apple Macintosh. Meer over frames is te vinden in [36].



Afb. 3.5 Semantisch netwerk.

### Logica

Een beschrijving van de representatiemogelijkheden van *logica* en de daarop gebaseerde taal PROLOG is te vinden in [37, 38, 39, 40]. Hier worden slechts enkele principes toegelicht. 'Predikatenlogica' maakt het mogelijk formele afleidingen te maken uit feiten (proposities). Deze afleidingen kunnen worden vastgelegd in regels, waarmee op ondubbelzinnige wijze nieuwe feiten kunnen worden afgeleid uit reeds bekende. De toepassing van de regels is gebaseerd op vormkenmerken, niet op inhoud. Op logica gebaseerde systemen werken met hypothesen; zij proberen die hypothesen te bewijzen of te verwerpen met behulp van de beschikbare gegevens.

### Representatie van onzekerheid

Onzekerheid kan worden veroorzaakt door een aantal factoren. Onzekerheid over waargenomen feiten kan worden veroorzaakt doordat signalen onderhevig zijn aan storingen die de inhoud maskeren (ruis). Onzekerheid kan echter ook ontstaan doordat men waarden niet kwantitatief, maar kwalitatief uitdrukt. Iemand wordt bijvoorbeeld 'oud' gevonden, of een afstand 'groot'. Men spreekt in dit verband ook wel van zachte waarden. Een derde bron van onzekerheid is onvolledigheid. De beschikbare gegevens kunnen onvolledig zijn door tijdgebrek of omdat gegevens worden achtergehouden. Tenslotte kan er onzekerheid bestaan over de toepasbaarheid van operatoren.

Kennissystemen moeten kunnen omgaan met deze vormen van onzekerheid. Hoewel men daarbij gebruik maakt van complexe formules, hebben deze nog geen wiskundige onderbouwing. De meeste gehanteerde methoden zijn empirisch; zij hebben in beperkte domeinen hun waarde bewezen, maar bieden geen garantie voor

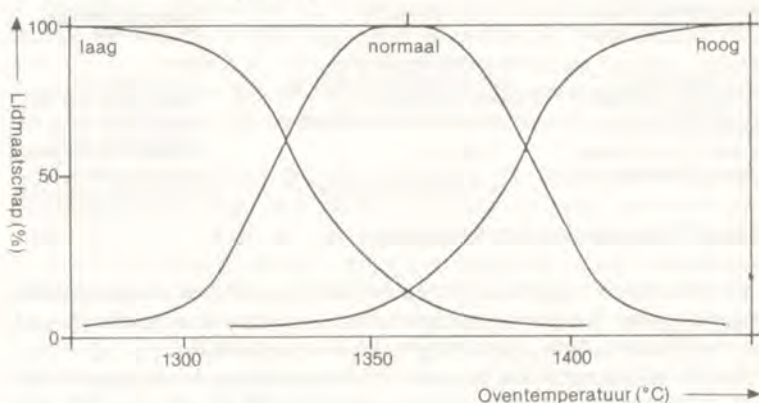


bruikbaarheid in complexe systemen. Het toekennen van *zekerheidsfactoren* aan intuïtieve schattingen kan tot een onverantwoorde suggestie van nauwkeurigheid leiden. Het zelfde geldt voor het formaliseren van zachte waarden met *vage logica* ('fuzzy logic'). Ook het gebruik van statistische methoden in kennissystemen is omstre- den, omdat deze methoden berusten op een bepaalde kansverdeling en op onafhankelijkheid van de parameters. Deze factoren zijn vrijwel nooit uit de beschikbare gegevens te verkrijgen.

Aangezien er nog geen algemeen toepasbare techniek is voor repre- sentatie van onzekerheid, wordt in het ideale geval voor ieder systeem de methode gekozen die het beste bij het gegeven domein past. In veel gevallen kiest men voor een wijze van kennisrepresentatie waarbij representatie van onzekerheid tot een minimum wordt beperkt.

Er zijn diverse methoden ontworpen voor de omgang met niet-exacte feiten en kennis. Veel onderzoek op dit gebied is gedaan door de ontwikkelaars van medische kennissystemen. Een uitgebreide be- schrijving is onder andere te vinden in [41, 42, 43]. Hier wordt alleen vage logica behandeld.

In de traditionele logica is een stelling waar of niet waar. Zo zal een uitspraak als 'de temperatuur is hier 25 graden Celsius' waar of niet waar zijn. Voor representatie van 'de temperatuur is hoog' is vage logica nodig. Vage logica werkt niet met exacte getallen, maar met begrippen als 'veel', 'groot' enz. Om deze te representeren, heeft men het begrip *vage verzameling* geïntroduceerd. Vage verzamelingen hebben geen strikte grenzen. Daardoor bestaat er bijvoorbeeld overlap tussen situaties die worden beschreven met 'lage, normale en hoge temperatuur'. Afb. 3.6 laat zien hoe men vage verzamelingen weergeeft door zogenaamde *lidmaatschapscurven*. Een nadere uitwer- king is te vinden in [44, 45].



Afb. 3.6 Vage verzamelingen.



## Inferentie

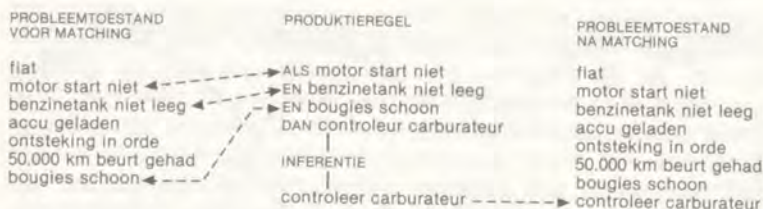
Inferentie is het redeneren met kennis onder besturing van een inferentiemechanisme, ook wel *inferentiemachine* genoemd. Deze besturing kan zijn gebaseerd op vuistregels en algoritmen, die de koers aangeven bij het zoeken van een pad in de probleemruimte.

Het inferentiemechanisme zorgt voor besturing van het oplossingsproces door symbolen en symboolstructuren in het werkgeheugen en in het kennisbestand met elkaar te vergelijken. Gevolgtrekkingen, wijzigingen van de probleemtoestand door toepassing van operatoren, kunnen tot stand komen als symboolstructuren in het kennisbestand overeenkomen met symboolstructuren in het werkgeheugen. Het proces van vergelijken en associëren van symboolstructuren wordt in de Engelstalige literatuur aangeduid met *matching*. De gewijzigde probleemtoestand wordt bijgeschreven in het werkgeheugen, waarna een volgende operator kan worden geactiveerd.

### *Inferentie met produktieregels*

Afb. 3.7 laat zien hoe bij een denkbeeldig, op produktieregels gebaseerd kennissysteem inferentie tot stand komt.

De gewijzigde probleemtoestand kan vervolgens opnieuw één of meer produktieregels activeren. Als dit proces zich herhaalt, ontstaan *inferentieketens*, ook *oplossingspaden* genoemd, die probleemtoestanden met elkaar verbinden. Deze ketens splitsen zich telkens als een probleemtoestand meer dan één operator kan activeren. Eén of meer paden zullen uiteindelijk begin- en doelttoestand verbinden en dus één of meer oplossingen voor het probleem geven.

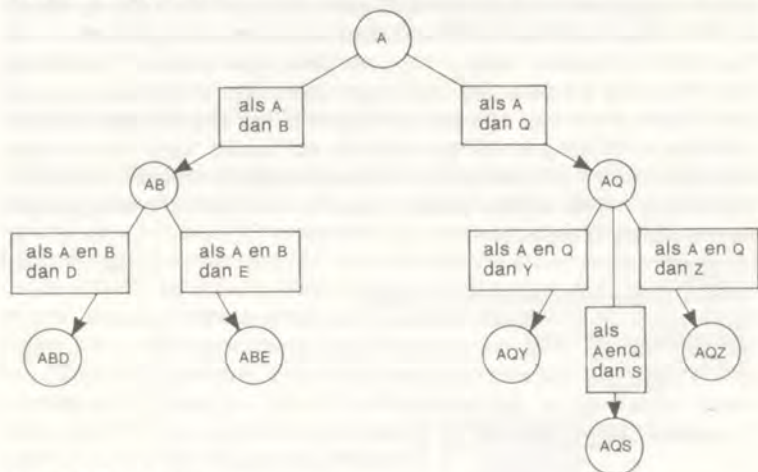


Afb. 3.7 Inferentie met produktieregels.

De verzameling van mogelijke inferentieketens die uit een bepaalde begintoestand kunnen ontspruiten, wordt vaak weergegeven als een boomstructuur. Men spreekt dan van een *zoekboom*.

Afb. 3.8 laat een zoekboom zien bij een kennissysteem dat uit een probleemtoestand A een oplossing zoekt. D, E, Y, S en Z zijn mogelijke conclusies die dit kennissysteem uit A kan afleiden.

De sturing van het kennissysteem kan *voorwaarts* of *achterwaarts* worden uitgevoerd.



Afb. 3.8 Zoekboom.

Voorwaarts redeneren (ook wel bekend als 'forward reasoning', 'forward chaining' of 'bottom up reasoning') werkt van de begintoeestand naar een doeltoeestand toe. Daarbij wordt uitgegaan van de beschikbare gegevens, vandaar ook aanduidingen als 'data driven' of 'event driven reasoning'.

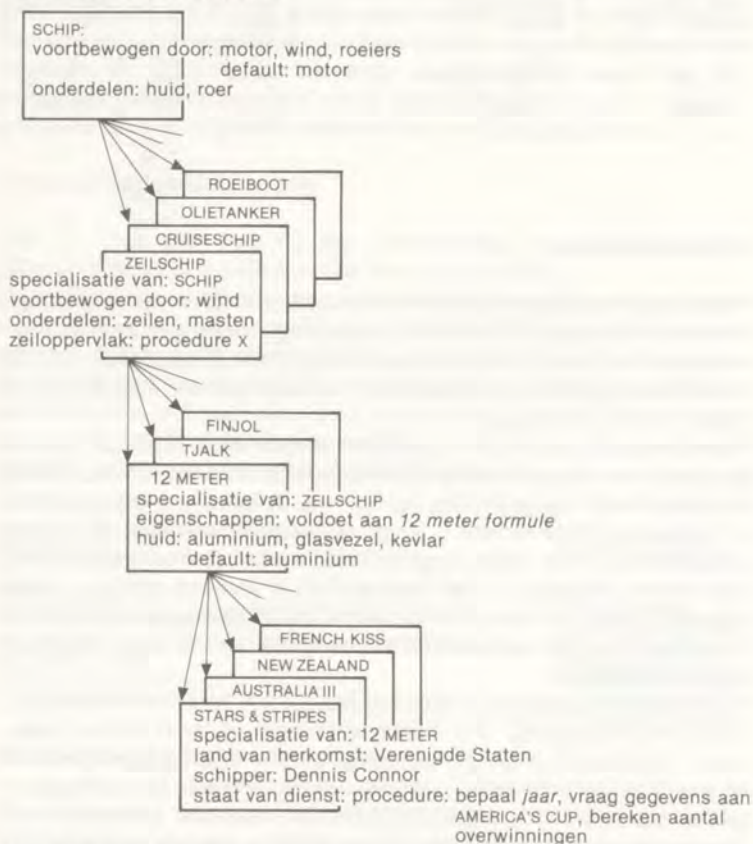
Vooruit redeneren is vooral geschikt wanneer de zoekruimte convergeert naar een beperkt aantal doelt toestanden. Ook bij een toepassing als interpretatie van gegevens, ligt het voor de hand met deze gegevens te beginnen ('data driven'). Voor ontwerp toepassingen is vooruit redeneren vaak de enige mogelijkheid, omdat de doeltoeestand nog niet tevoren bekend is. Om toch gericht te kunnen werken, wordt vooruit redeneren vaak gecombineerd met programmeertechnieken die gebruik maken van randvoorwaarden waarmee de zoekruimte kan worden ingeperkt.

Achterwaarts redeneren is ook wel bekend als 'backward chaining', 'backward reasoning', 'top down reasoning' of 'goal driven reasoning'. Volgens dit mechanisme wordt een doeltoeestand geselecteerd en wordt onderzocht welke combinaties van feiten in het werkgeheugen en regels in het kennisbestand tot deze toestand kunnen leiden. Terug redeneren is vooral geschikt wanneer er slechts weinig begintoestanden zijn. Dit mechanisme kan goed worden toegepast wanneer wordt uitgegaan van een te bereiken doel of een hypothese, bijvoorbeeld bij een diagnostische toepassing.

In probleem domeinen met grote zoekruimten kan vaak zinvol gebruik worden gemaakt van een combinatie van vooruit en terug redeneren.

### Inferentie met netwerken en frames

Het belangrijkste mechanisme bij inferentie met netwerken en frames is *overerving* ('inheritance'). Zoals kinderen eigenschappen erven van hun ouders, kunnen knopen in netwerken eigenschappen erven van voorafgaande knopen. Bij object-georiënteerde technieken kunnen individuen erven van objecten en objecten van objectklassen. Meervoudige overerving treedt op wanneer een frame 'kind' is van meer dan een 'ouder' (dit aantal is in theorie ongelimiteerd). Selectieve overerving vindt alleen plaats wanneer aan tevoren vastgelegde voorwaarden is voldaan.



Afb. 3.9 Inferentie met frames.

Bij het programmeren moet principieel worden voorkomen dat sterk aan verandering onderhevige gegevens en feiten worden vastgelegd.

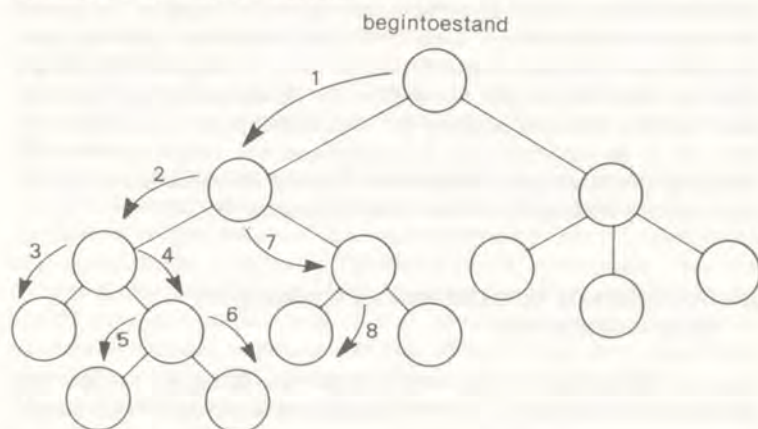


Die zouden namelijk veel bewerkingen vergen om actueel te blijven. Het is dan handiger deze gegevens ten tijde dat zij nodig zijn, af te leiden uit basisgegevens die minder variabel zijn. Dit principe komt goed tot uiting in het overervingsmechanisme dat in afb. 3.9 is weergegeven.

### Sturing van het inferentieproces

In vele eenvoudige kennissystemen wordt alle kennis uit het kennisbestand uitputtend gebruikt om de paden te zoeken die tot één of meer oplossingen leiden. Deze systemen doorlopen blindelings alle mogelijke probleemtoestanden die met operatoren uit de begin- of uit de doeltoestand kunnen worden verwezenlijkt. Het inferentieproces wordt gestuurd door algoritmen waarmee de probleemruimte altijd volgens dezelfde procedures wordt doorlopen. Men spreekt wel van een *blind zoekalgoritme*. Een blind zoekalgoritme kan bijvoorbeeld zo worden ontworpen dat het de probleemruimte 'in de diepte' doorzoekt naar de juiste inferentieketen(s). In de Engelstalige literatuur spreekt men over 'depth first search'.

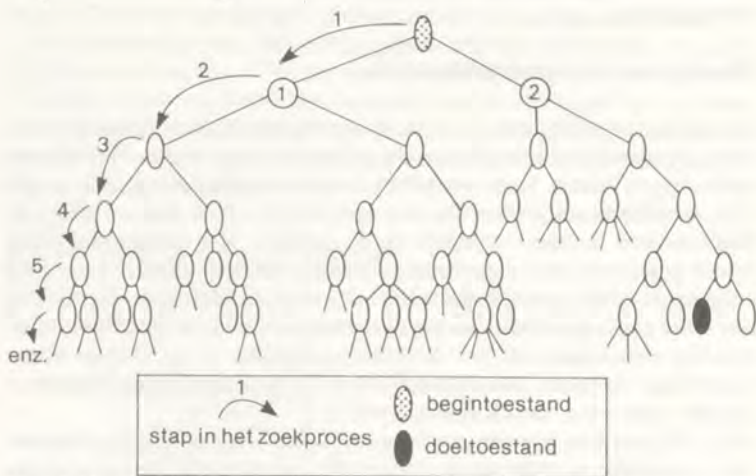
Afb. 3.10 laat zien hoe een op diepte gericht zoekproces kan verlopen. Alle mogelijke probleemtoestanden die een bepaald kennisstelsel uit de begintoestand kan ontwikkelen, zijn afgebeeld. Pijlen geven de volgorde aan waarin de eerste acht probleemtoestanden volgens het zoekalgoritme worden bereikt.



Afb. 3.10 Diep zoekproces.

Een belangrijk nadeel van blind zoeken is de kans dat het systeem veel tijd verliest aan de ontwikkeling van lange inferentieketen(s) die niet tot een juiste oplossing leiden. Afb. 3.11 laat zien hoe blindelings zoeken

veel tijd kan kosten voordat de gewenste doeltoestand is bereikt. Als het programma opereert volgens een op diepte gericht zoekalgoritme zal het eerst alle afgeleiden van toestand 1 ontwikkelen voordat het in de juiste vertakking voor de doeltoestand terecht komt.



Afb. 3.11 Ondoelmatigheid van een blind zoekproces.

Geavanceerde kennissystemen trachten – evenals de mens – de probleemruimte snel in te perken door gebruik te maken van kennis over het probleemdomein. Deze systemen beschikken over een goed gestructureerd kennisbestand en één of meer strategieën die doelgericht van deze kennis gebruik maken om de ontwikkeling van lange doodlopende oplossingspaden zo veel mogelijk te voorkomen. De lezer zal in de volgende drie hoofdstukken een aantal voorbeelden van dergelijke strategieën aantreffen. Zij die zich verder in zoekstrategieën willen verdiepen, worden verwezen naar [39, 40].

### 3.5 Traditionele computerprogramma's en kennissystemen

Goed te structureren problemen kunnen worden opgelost met een *algoritme*. Een algoritme is een procedureel werkvoorschrift waarin de operatoren die nodig zijn om een probleem in een eindig aantal stappen op te lossen, in de juiste volgorde zijn vastgelegd. In een algoritmisch computerprogramma is het algoritme vertaald in een programma dat bestaat uit instructies die door de computer kunnen worden uitgevoerd. Bij het maken van zo'n programma moet de programmeur voor iedere probleemtoestand de operatoren overzien



die nodig zijn om het probleem op te lossen. Ook moeten alle mogelijke combinaties van operatoren expliciet in het algoritme worden vastgelegd.

Naarmate problemen complexer worden, zal het meer moeite kosten de juiste operatoren te vinden en de problemen zodanig te structureren dat de operatoren in een algoritme kunnen worden gevat. Daarbij neemt het aantal uitzonderingen, waarvoor een aparte oplossing moet worden vastgelegd, toe. De kans neemt ook toe dat de veronderstellingen op grond waarvan het probleem werd gestructureerd, onvoldoende overeenstemmen met de werkelijke probleemsituatie. Tevens wordt de kans groter dat veronderstellingen na verloop van tijd hun geldigheid verliezen.

De complexiteit stelt dus grenzen aan problemen waarvoor men een algoritmisch computerprogramma zou willen ontwikkelen. In vele gevallen is het niet haalbaar het probleem zo diepgaand te analyseren dat een bruikbaar algoritme kan worden ontwikkeld.

De scheiding tussen kennis en inferentiemachine bij kennissystemen leidt tot de constructie van overzichtelijke modulaire programmatuur, die ook bij complexe problemen kan worden ingezet. Aangezien de operatoren pas tijdens de uitvoering van het programma worden gecombineerd, hoeven niet alle mogelijke combinaties tevoren te worden vastgelegd. Dit bemoeilijkt beproeving en validatie, maar vereenvoudigt de ontwikkeling.

Andere voordelen ten opzichte van traditionele programmatuur liggen in het ongedaan maken van redenatiestappen, presentatie van tussentijdse oplossingen, het geven van uitleg, specifieke aanpassing aan de gebruiker en kiemen van leervermogen. Deze mogelijkheden gaan echter in de praktijk vaak ten koste van de snelheid, zodat in praktische systemen alleen de noodzakelijke opties zullen zijn uitgewerkt.

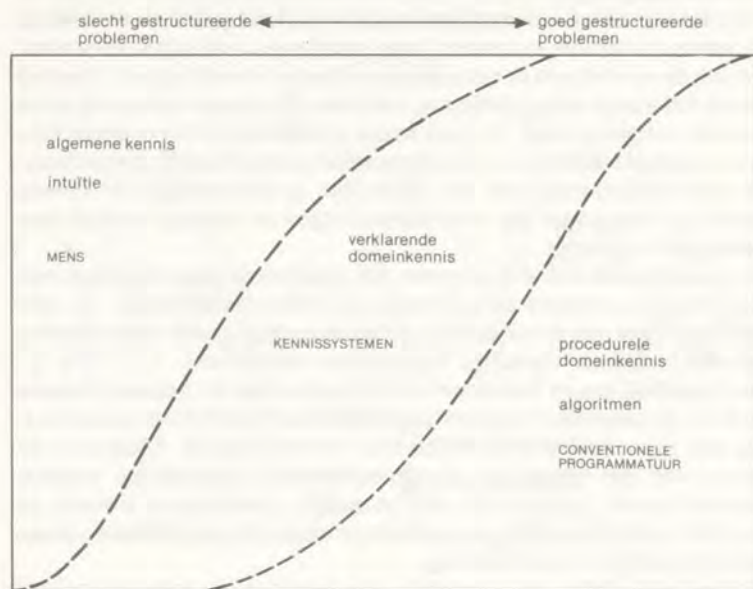
Wil men computerprogramma's ontwikkelen voor complexe probleemgebieden waarin oplossingen omvangrijke combinaties van operatoren vergen, dan bieden kennissystemen betere mogelijkheden dan traditionele computerprogramma's. De combinatie van een relatief eenvoudig algoritme in de vorm van de inferentiemachine en een daarvan gescheiden bestand met operatoren is gemakkelijker te ontwikkelen en aan te passen dan een complex algoritme waarin alle mogelijke combinaties van deze operatoren zijn vastgelegd.

Als een traditioneel computerprogramma dezelfde problemen kan oplossen als een kennissysteem, zal het traditionele programma dit echter sneller doen. Dat komt omdat zo'n programma de opeenvolging van bewerkingen direct volgens het expliciet vastgelegde algoritme uitvoert, terwijl kennissystemen eerst in het kennisbestand naar de juiste operatoren moeten zoeken.

Afb. 3.12 laat zien welke plaats kennissystemen bij het oplossen van



problemen kunnen innemen tussen de mens enerzijds en de traditionele programmatuur anderzijds.



Afb. 3.12 De plaats van kennissystemen bij het oplossen van problemen.

Als problemen zeer slecht zijn gestructureerd, zal de mens vooral een beroep moeten doen op zijn algemene kennis. Van ondersteuning door kennissystemen kan dan niet of nauwelijks sprake zijn. Dat komt in de eerste plaats omdat kennissystemen onwenselijke afmetingen krijgen als zij de algemene kennis van een mens bevatten. Bovendien wordt deze kennis vooral intuïtief gehanteerd en rijst dus de vraag of deze kennis ooit volledig symbolisch is weer te geven.

Als het probleemgebied beter is gestructureerd, zal de mens meer verklarende kennis over het probleemdomein bezitten. Dan kunnen kennissystemen een ondersteunende rol gaan spelen. Naarmate de structurering van het probleemgebied toeneemt, zal meer kennis in procedures kunnen worden gerepresenteerd en worden er mogelijkheden voor conventionele programma's geopend.

Naarmate men over een probleemgebied meer kennis vergaart, nemen de mogelijkheden van computerondersteuning toe. Eerst door kennissystemen, vervolgens door volledig algoritmische programma's.

### 3.6 Stand van zaken en vooruitzichten

De competentie van menselijke experts is beperkt tot een bepaald domein. Dit geldt nog sterker voor kennissystemen, die maar een fractie van de kennis van menselijke experts omvatten. Om dit probleem te ondervangen, wordt onderzoek gedaan naar kennissystemen met zeer grote kennisbestanden, waarin zowel feitenkennis (complete encyclopedieën) als huis-tuin-en-keuken-wetenschap (elementaire kennis over natuurkunde, scheikunde en andere praktische wetenschappelijke disciplines voorzover zij zich in het dagelijks leven manifesteren) worden ondergebracht. Ook worden systemen ontwikkeld die kwalitatief redeneren over structuren en verschijnselen (kwalitatieve fysica [46, 47, 48, 49]).

Om het redeneervermogen te verbeteren, kan kennis worden toegevoegd over analogieën en associaties. Ook kan onderzoek naar algemeen toepasbare redenerende systemen bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe kennissystemen [10].

Om de communicatie met de gebruiker te verbeteren, wordt veel onderzoek gedaan naar invoer en presentatie met combinaties van spraak, natuurlijke taal en driedimensionaal beeld.

Voor beter gebruiksgemak wil men in de systemen kennis vastleggen over de wijzen waarop mensen samenwerken en communiceren en wat zij van kennissystemen verwachten. Ook zullen systemen zelfkennis nodig hebben, vooral over hun eigen beperkingen. Dit moet leiden tot beter functionerende systemen, wellicht met leervermogen. Ook kan deze extra kennis worden gebruikt voor betere uitleg en onderwijzende taken.

Voor hogere verwerkingssnelheid wordt veel verwacht van nieuwe microcomputers met snelle en specifieke processoren. Een belangrijke verbetering van de snelheid zal ook worden bereikt door toepassing van parallele computers. Deze zijn sinds 1986 op beperkte schaal commercieel verkrijgbaar. In parallele systemen kunnen delen van de probleemruimte gelijktijdig worden doorlopen. In vele onderzoekcentra worden omvangrijke projecten uitgevoerd waarbij het onderzoek naar parallele computersystemen samengaat met het onderzoek naar effectievere AI-technieken. De programmatuur voor parallele systemen staat echter nog in de kinderschoenen [50].

Aangezien het hier veelal om langlopende onderzoekprojecten gaat, zal naar verwachting de competentie van kennissystemen pas in de jaren negentig op een hoger niveau kunnen worden gebracht. Tot die tijd dient de gebruiker te beseffen wat de beperkingen zijn en dat de systemen slechts een zeer beperkte weergave van de werkelijkheid bieden.



## Beperkingen

Bij de ontwikkeling van kennissystemen worden uit kostenoverwegingen vaak beperkingen aangebracht. Een deel van deze beperkingen heeft ook een technische achtergrond. Zo worden bij de meeste eenvoudige kennissystemen gevolgtrekkingen te sterk bepaald door de ordening van het kennisbestand. In systemen die worden toegepast op computers met kleine geheugens, zoals microcomputers, is slechts plaats voor een beperkte hoeveelheid kennis. Daarbij wordt soms een afweging gemaakt tussen oppervlakkigheid en lange wachttijden. Behalve technische beperkingen zijn er ook beperkingen van methodologische aard. Het ontbreekt nog aan algemeen toepasbare methoden voor de ontwikkeling van kennissystemen. Daardoor treden er ook organisatorische beperkingen op. Kennisverwerving, de verzameling van kennis voor vastlegging in kennissystemen, kennisonderhoud, kennisvalidatie en verwante gebieden moeten het nog stellen zonder complete theorieën en methoden, zodat de ontwikkeling van kennissystemen een moeizaam doe-het-zelfproces is (zie hoofdstuk 7).

### *De diepgang is beperkt*

De eerste generatie kennissystemen bevatte alleen heuristische kennis. Deze systemen waren wel in staat problemen op te lossen, maar konden daarover geen uitleg geven aan mensen die niet goed op de hoogte waren met de in het systeem vastgelegde kennis.

De diepgang van een kennissysteem wordt beperkt door drie factoren. De eerste factor is de beschikbare domeinkennis, de tweede ligt in de beperkingen van de huidige gereedschappen, de derde is de beschikbare tijd waarin kennis kan worden verzameld en een werkend systeem dient te worden ontwikkeld.

Vaak is in het kennisbestand een gelaagdheid aangebracht, waarin kennis op een aantal abstractieniveaus is gerepresenteerd. In sommige oudere systemen is alle kennis echter op een hoop geveegd, zodat het niet eenvoudig is te achterhalen waar zich eventuele hiaten bevinden.

Kennissystemen met alleen ondiepe kennis in de vorm van produktieregels, kunnen voldoen in domeinen waar men de problemen traditioneel met vuistregels oplost. Daar is meestal nog geen algemeen toepasbare theorie of algoritmische oplossingsmethode voorhanden, zodat slechts een beroep kan worden gedaan op ervaring. Die ervaring kan worden vastgelegd in systemen zonder fundamentele kennis van het probleemdomein.

Om heuristische kennis (vuistregels) te kunnen aanvullen, moet men theoretische of empirische modellen met verklarende kennis over



structuren of processen kunnen vastleggen. De huidige representatietechnieken bieden echter nog slechts beperkte mogelijkheden complexe modellen zodanig vast te leggen dat zij bij het redeneren effectief kunnen worden gehanteerd. De effectieve representatie van tijd, ruimte, materie en causale relaties vergt nog veel onderzoek (zie bijv. [49, 51, 52]). Het zelfde geldt voor inferentietechnieken die efficiënt en effectief met meer dan één kennisbestand kunnen omgaan. In ESPRIT II (zie par. 8.13) is dit laatste een van de belangrijke onderzoekgebieden.

Beperkingen in apparatuur en gereedschappen hebben vooral betrekking op de omvang van kennisbestanden met een grote diepgang. Hiervoor zijn, behalve grote geheugens, ook snelle processen en processoren nodig om van al die kennis gebruik te maken.

#### *De kennis is begrensd*

De reikwijdte van een kennisstelsel beperkt het domein waarin het kan worden toegepast. Een breed domein is vaak slecht te combineren met een grote diepgang en andersom. Een structurele oplossing voor dit dilemma is misschien te vinden in systemen met een schoolbordarchitectuur, waarin een aantal kennisstelsels samenwerkt aan de oplossing van een probleem, waarvoor kennis uit verschillende domeinen of op verschillende niveaus nodig is.

Omdat de meeste probleemgebieden niet geheel gesloten zijn, maar invloed ondergaan van een veranderende omgeving, is nooit precies vast te stellen welke kennis nodig is om in deze gebieden problemen op te lossen. Toch is de kennis in een kennisbestand duidelijk begrensd. In de meeste systemen ontbreekt echter kennis over deze begrenzing (meta-kennis), zodat de systemen geen weet hebben van hun eigen beperkingen.

Uiteraard is ook de kennis van een menselijke expert beperkt. Omdat hij echter over algemene wereldkennis en gezond verstand beschikt waarin zijn specifieke domeinkennis is ingebed, weet hij wanneer de waarde van zijn kennis begint af te nemen. Een mens is zich in het ideale geval bewust van zijn grenzen en kan aangeven dat hij voor een bepaald probleem geen oplossing heeft. Kennissystemen zijn hiertoe niet in staat, onder andere door het ontbreken van algemene wereldkennis. Als voor de oplossing van een probleem kennis nodig is die ten dele buiten het kennisdomein valt, zal het systeem dit niet meteen of vroegtijdig aan de gebruiker kenbaar kunnen maken. Het systeem zal eerst alle kennis in zijn kennisbestand proberen te gebruiken, voordat het te kennen geeft niet in staat te zijn het probleem op te lossen. De gebruiker moet dus zelf goed op de hoogte zijn van de begrenzingen van het kennisstelsel en proberen te vermijden dat hij het systeem vragen voorlegt die het niet kan beantwoorden.

*Gebrekkige communicatie*

Het gebruik van een kennissysteem wordt in sterke mate bepaald door de wijze waarop de communicatie met de gebruiker is ingericht (zie ook hoofdstuk 7). Bij de huidige generatie kennissystemen wordt de communicatie veelal geleid door het programma. Eenvoudige kennissystemen stellen de gebruiker bij ieder probleem dezelfde reeks vragen, ook wanneer eenzelfde probleem voor de tweede keer wordt benaderd. Het is wel mogelijk te voorkomen dat de gebruiker reeds gegeven antwoorden moet herhalen of voor de hand liggende antwoorden moet geven, maar dat vergt zulke grote werkgeheugens dat de snelheid van het systeem gevaar loopt. Voor een nuttig model van de gebruiker is namelijk veel geheugenruimte vereist. Dit is een van de redenen waarom er nu nog zo weinig operationele kennissystemen zijn. Een volledig interactieve dialoog, waarbij ook de gebruiker initiatieven kan nemen en vragen kan stellen in natuurlijke taal, is meestal niet haalbaar. Toch wordt wel gewerkt aan de ontwikkeling van systemen die de genoemde communicatiefaciliteiten bieden.

De dialoog in natuurlijke taal is niet de enige vorm van communicatie waaraan in de kennistechniek aandacht wordt besteed. De belangstelling voor spelcomputers en voor computerondersteuning bij het ontwerpen hebben de ontwikkeling van grafische faciliteiten sterk gestimuleerd. Ook onderzoekers op het gebied van de kennistechniek onderkennen interactieve grafische mogelijkheden als een belangrijk facet voor ontwikkeling en gebruik van kennissystemen. Zo zijn de toepassing van vensters en pictogrammen en de muis als aanwijsmiddel afkomstig uit de AI-laboratoria van Xerox Parc.

Behalve met gebruikers, communiceren kennissystemen soms ook met andere systemen. Ook deze communicatie verloopt meestal gebrekkig. De vorderingen op dit gebied zijn traag voorzover het toepassingen in de praktijk betreft. De meeste kennissystemen die gebruik maken van grote bestanden, doen dat via op maat gemaakte koppelingen. Voor veel toepassingen zal het nodig zijn dat kennissystemen worden geïntegreerd met andere systemen, zoals voor CAD, productiebesturing enz. In de praktijk is vervaardiging van dergelijke koppelingen niet eenvoudig. Standaardisatie en gebruik van machine-onafhankelijke besturingssystemen zoals Unix kunnen uitkomst bieden.

*Matige uitleg en lage snelheid*

Ofschoon de meeste kennissystemen over uitlegfaciliteiten beschikken, is de uitleg niet voor alle gebruikers even overtuigend. De huidige systemen zijn niet in staat de uitleg aan te passen aan de voorkennis



van individuele gebruikers. Het verklaren van redeneringen zal aan waarde winnen als kennissystemen de problemen op verschillende niveaus kunnen oplossen. Een oppervlakkige, door produktieregels gegeven oplossing kan dan door het systeem met empirische of algemeen theoretische kennis worden verklaard. Het is de bedoeling dat *tweede generatie* kennissystemen met diepe kennis hiertoe in staat zullen zijn [53, 54, 55, 56]. Ook worden nieuwe uitlegfaciliteiten ontwikkeld (zie bijv. [57]).

Voorlopig hebben kennissystemen te kampen met oppervlakkigheid ('shallow reasoning') en traagheid. Vele complexe problemen kunnen niet door de huidige generatie kennissystemen worden opgelost omdat daarvoor de verwerking van zeer veel kennis in korte tijd nodig is.

Evenals mensen, kunnen kennissystemen niet goed omgaan met tegenstrijdige opvattingen van experts. In de meeste publikaties uit de begintijd van kennissystemen werden redeneren met onzekerheid en uitlegfaciliteiten genoemd als essentiële nieuwe eigenschappen, die in traditionele systemen niet voorhanden waren. Redeneren met onzekerheid blijkt echter nog steeds niet vlekkeloos te gaan. De empirische aanpak uit de eerste kennissystemen blijkt niet altijd te voldoen. Omdat zekerheidsfactoren bij lange inferentieketens hun bruikbaarheid verliezen, zal voor de ontwikkeling van grote systemen nog veel onderzoek nodig zijn [58].

### Lerende systemen

Psychologen hopen door onderzoek naar lerende kennissystemen een beter inzicht te krijgen in het menselijke leerproces. Bovendien zijn lerende systemen interessant als kennissystemen worden toegepast in gebieden waar weinig heuristische kennis beschikbaar is of in dynamische gebieden waar het kennisbestand vaak zal moeten worden aangepast. In beide gevallen gaat het er om dat de systemen door het opdoen van ervaring met nieuwe probleemsituaties hun effectiviteit automatisch verbeteren. Enerzijds kan dit worden verwezenlijkt door uit nieuwe probleemsituaties nieuwe operatoren af te leiden, anderszijds kunnen ervaringen leiden tot herstructurering van het kennisbestand, zodat het inferentieproces wordt versneld [54]. Ondanks veel onderzoek zijn de praktische mogelijkheden van lerende systemen nog zeer beperkt. Voor een overzicht van het onderzoek wordt verwezen naar [59, 60].

Op lange termijn wordt veel verwacht van systemen die qua structuur overeenkomsten vertonen met de menselijke hersenen. Er zijn onderzoekers die proberen de werking van de menselijke hersenen te simuleren in netwerken van microprocessoren [58, 61]. De verbindingen tussen deze processoren liggen niet vast, maar kunnen tijdens de



uitvoering van taken 'groeien'. Daardoor is er een inherent leervermogen. Bij deze systemen wordt de intelligentie niet voorgeprogrammeerd, maar aangeleerd door de systemen te confronteren met nieuwe situaties. Dergelijk leren vertoont meer overeenkomsten met opvoeding dan met programmering. Er zijn al netwerken die in staat zijn tot beeld- en spraakherkenning, op een manier die met klassieke geprogrammeerde systemen niet haalbaar is [62].

### Aanbevolen literatuur

Nadere informatie over theorie en techniek van kennissystemen is te vinden in [30, 63, 13, 14]. Lopend onderzoek wordt beschreven in de verhandelingen van de grote internationale congressen (AAAI, IJCAI, ECAI, FGCS, uitgegeven door o.a. Morgan Kaufmann en North-Holland).

---

## 4. Kennissystemen en flexibele fabricagesystemen

### 4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat over de bijdrage die kennissystemen kunnen leveren aan de technische en logistieke aspecten van de besturing van flexibele fabricagesystemen.

Nadat in de eerste helft van deze eeuw de industrie zich heeft ontwikkeld in de richting van massaproductie van gestandaardiseerde produkten, vindt sinds tien jaar een omslag plaats naar de fabricage van kleinere series en een gevarieerder aanbod van produkten.

De markt vertoont een toenemende vraag naar nieuwe of vernieuwde produkten. Dit betekent dat fabrieken kleinere series moeten produceren. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van flexibele produktiemiddelen die – omdat zij sneller omstelbaar zijn – korte doorlooptijden mogelijk maken waardoor sneller op de markt kan worden ingespeeld. Een tweede voordeel van toenemende flexibiliteit is dat men met kleinere tussenvoorraden kan werken. Daardoor wordt bespaard op voorraadkosten van halffabrikaten en gereede produkten. Tenslotte kunnen flexibele produktiemiddelen op een groter aantal produktseries worden afgeschreven.

Met afnemende seriegrootte nemen besturingsproblemen echter toe. Men moet in kortere tijd uit meer alternatieven kiezen. Het blijkt dat sturing met de hand en ondersteuning met de gebruikelijke computerprogramma's soms ontoereikend zijn om de technische mogelijkheden van geavanceerde flexibele produktiemiddelen doelmatig te benutten.

Men verwacht dat ondersteuning door kennistechniek het rendement van nieuwe fabricagetechnieken belangrijk zal vergroten. Sinds 1980 is een aantal ambitieuze projecten op het gebied van computergeïntegreerde fabricage (CIM) begonnen waarin kennistechniek een belangrijke rol speelt. In het begin werden deze projecten vooral in de Verenigde Staten uitgevoerd. De afgelopen drie jaar is men ook in Europa, vooral in Esprit-verband, met kennistechniek begonnen. Tabel 4.1 geeft een overzicht van deze projecten.

Tabel 4.1 CIM-projecten met toepassingen van kennistechniek.

systeem- of projectnamen	betrokken organisaties	referenties
Factory of the Future	Robotics Institute Carnegie-Mellon University	[64, 68, 96]
Automated Manufacturing Research Facility	National Bureau of Standards USA	[77]
ESPRIT-project 932	14 bedrijven en universiteiten o.a. Philips	[102, 103]
ESPRIT-project 384	7 bedrijven en instellingen o.a. TNO	[73]

## 4.2 Ordergerichte assemblage

Met ordergerichte assemblage moet de fabriek aan specifieke klantenorders tegemoet kunnen komen. Deze vorm van fabricage komt vaak voor bij complexe – uit veel componenten bestaande – producten, zoals computersystemen [65]. Voor een groot deel van de componenten is een aantal alternatieven beschikbaar. Door de mogelijke combinaties van alternatieven zijn zeer veel variaties van een eindproduct mogelijk. Voor het vervullen van specifieke wensen moet men zo bij iedere order kiezen uit miljoenen uitvoeringen van een bepaald type.

In deze paragraaf wordt verkend hoe kennistechniek kan bijdragen aan de verbetering van het fabricageproces. Er worden voorbeelden gegeven van onderzoek en ontwikkeling. Achtereenvolgens komen de configuratie van producten, de beheersing van de goederenstroom, de integratie van ontwerpen en assemblage en de besturing van montagecellen aan bod.

### Configuratie van producten

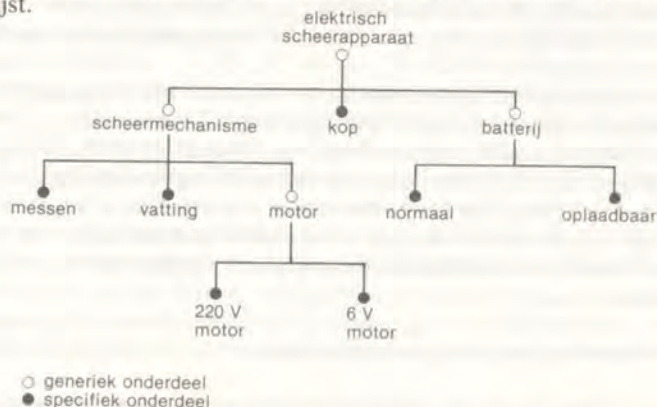
Bij de configuratie van complexe producten moet men, uitgaande van veel variaties van een product, een maakbare variant kiezen die zo goed mogelijk voldoet aan de eisen van de klant. Het vaak grote aantal alternatieve functionele specificaties en componenten kan hierbij leiden tot complexe combinatorische problemen. De configuratie van een bevredigend product kan weken duren en vergt ervaren specialisten.

Met kennissystemen hoopt men de stuklijsten voor de productie eerder klaar te hebben en de kans op fouten daarin te verminderen. Er zijn ook andere redenen om de toepassing van kennissystemen als hulpmiddel bij het configureren te onderzoeken. Door de kennis van



de configuratie-experts in kennissystemen vast te leggen en deze te distribueren onder verkopers, verwacht men dat deze aan hun klanten gedetailleerdere en beter gefundeerde adviezen zullen geven. Als 'configuratiesystemen' de centrale kennisbron zijn voor verschillende taken in het fabricageproces, kunnen misverstanden worden voorkomen; men gaat immers uit van dezelfde configuraties.

Op welke wijze moet de kennis over mogelijke configuraties worden geordend? Het is ongewenst miljoenen uitvoeringen van een produkt afzonderlijk in een kennisbestand vast te leggen. Hierdoor zou de geheugenruimte inefficiënt worden benut omdat men de gemeenschappelijke aspecten van de varianten van een bepaald type bij iedere variant opnieuw moet opslaan. Bovendien zou een dergelijk bestand niet te beheren zijn, omdat snelle produktvernieuwing om frequente wijzigingen vraagt. Er ontstaat een grote kans op fouten. In plaats hiervan definieert men produktfamilies van technisch of functioneel overeenkomstige produkten en legt men alle componenten waaruit de varianten van iedere familie kunnen worden samengesteld, eenmalig vast. Men noemt deze verzameling van componenten wel een 'generieke' stuklijst, in tegenstelling tot de 'specifieke' stuklijst die bij een bepaalde variant behoort [66]. Afb. 4.1 geeft een zeer eenvoudig voorbeeld van een hiërarchisch geordende generieke stuklijst.



Afb. 4.1 Generieke stuklijst van een produktfamilie van elektrische scheerapparaten [66].

Bij de configuratie wordt uit de generieke stuklijst een specifieke stuklijst afgeleid. Het systeem moet hierbij behalve van de kennis over eigenschappen van componenten, gebruik maken van de beperkingen die door logische verbanden tussen componenten en technische aspecten van de assemblage worden opgelegd.

Deze beperkingen laten zich in productieregels vastleggen. Bij de

configuratie van elektrische scheerapparaten zijn – uitgaande van de generieke stuklijst van afb. 4.1 – de regels:

'ALS voltage = 220 DAN batterij niet te specificeren' en

'ALS batterij gespecificeerd DAN voltage = 6' nodig.

Een klassiek voorbeeld van een configuratiesysteem is het door Digital Equipment Corporation sinds 1982 toegepaste XCON-systeem. XCON dient om computersystemen van de typen VAX-11 en PDP-11 te configureren. Het systeem wordt gebruikt als centrale eenheid in een netwerk van kennissystemen voor de volgende taken:

- ondersteuning van verkopers;
- inrichting en klimaatbeheersing van de lokatie van een computer;
- voorraadbeheer en productieplanning;
- oplossing van logistieke problemen bij de aflevering van computers uit meer dan één fabriek.

Het ligt voor de hand dat configuratiesystemen continu en zorgvuldig moeten worden bijgehouden. Een van de belangrijke redenen voor Digital om een kennissysteem te kiezen, was dan ook dat de kennis in een kennissysteem eenvoudiger aanpasbaar is dan die in procedurele computerprogramma's. Een vaste groep technici is specifiek voor het onderhoud verantwoordelijk. Om de kennis van het systeem continu te verbeteren, heeft men een rapportagesysteem opgezet voor configuraties die bij de assemblage alsnog problemen opleveren.

Over kennistechnische aspecten, ontwikkeling en invoering van XCON is veel gepubliceerd [67, 68, 69, 70, 71, 72].

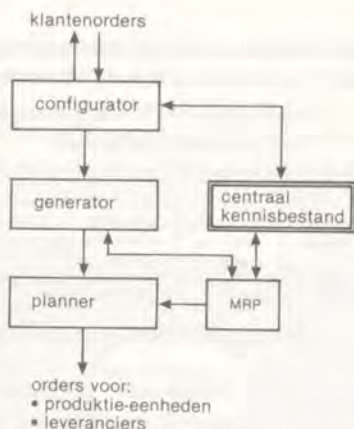
Het succes van XCON heeft andere fabrikanten in de Verenigde Staten gestimuleerd tot de ontwikkeling van vergelijkbare systemen. Zo heeft Westinghouse een kennissysteem ontwikkeld voor de configuratie van liften. In Nederland speelt de ontwikkeling van configuratiesystemen een belangrijke rol in het MIKEP-project dat in par. 8.12 nader wordt beschreven. Ook in het hierna beschreven onderzoek van de Technische Universiteit Eindhoven speelt configuratie een belangrijke rol.

### Beheersing van de goederenstroom

In de Vakgroep Bestuurlijke Informatiesystemen en Automatisering van de Technische Universiteit Eindhoven wordt onderzoek verricht naar een geïntegreerd systeem voor beheersing van de goederenstroom. Waar nodig, zal men in het systeem gebruik maken van kennistechniek. Afb. 4.2 laat de globale structuur van het systeem zien.

In het systeem zijn modulen met specifieke taken gegroepeerd rond een centraal kennisbestand waarin de generieke stuklijsten van productfamilies zijn opgeslagen. De 'configurator' leidt technische specificaties af uit door de klant opgegeven functionele specificaties.





Afb. 4.2 Globale structuur van een systeem voor beheersing van de goederenstroom.

De 'generator' ontwikkelt de specifieke stuklijst, de bewerkingsgegevens voor een order en de bijhorende behoefte aan productiecapaciteiten. De 'planner' ontwikkelt een productieplan waarin opdrachten voor productie-eenheden en leveranciers in de tijd zijn vastgelegd. Hierbij worden de beschikbare productiecapaciteiten zodanig benut dat nieuwe en lopende orders optimaal naar materiaalbehoefte worden behandeld.

De materiaalbehoefte voor iedere order wordt bepaald door een techniek die bekend staat als 'materialenbehoefteberekening'. Meestal wordt voor deze techniek het acroniem MRP (Material Resources Planning) gebruikt. Men denkt dat kennistechniek op twee manieren een bijdrage kan leveren aan MRP-systemen.

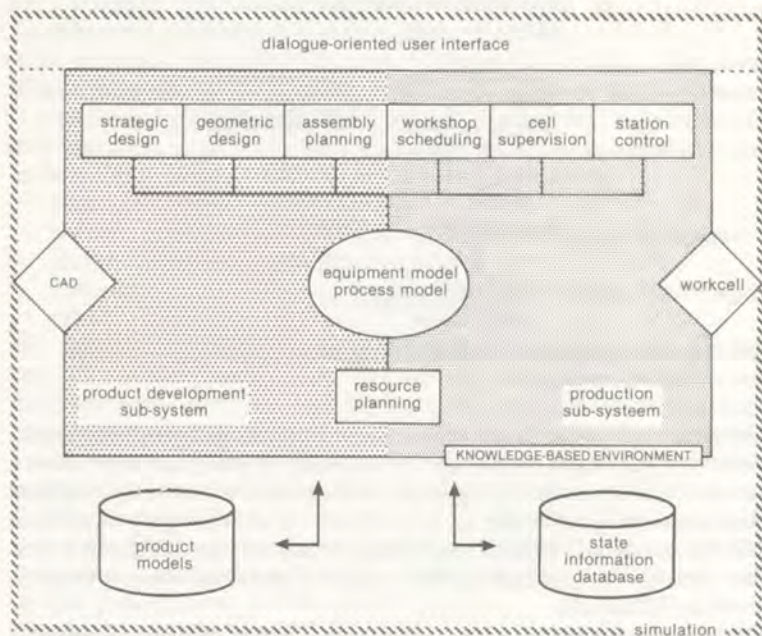
In de eerste plaats door aan het MRP-systeem een kennisysteem te koppelen dat beheersingsproblemen langs heuristische weg tracht op te lossen door seriegrootten, veiligheidsvoorraden of doorlooptijden te wijzigen. De tweede potentiële toepassing is een uitlegfaciliteit die uitkomsten van het MRP-systeem aan de gebruiker kan verklaren.

### Integratie van ontwerpen en assemblage

Het doel van ESPRIT-project 384 is aan te tonen wat de eisen zijn aan informatiestromen bij het ontwerpen, de werkvoorbereiding en de montage van produkten die in kleine series worden gemaakt. Het project heeft een looptijd van vijf jaar en wordt uitgevoerd door het Metaal instituut TNO, AEG, GEC Marconi, Fraunhofer IPK, La Télémécanique Electrique en Investronica.

Het onderzoek is gericht op de informatie die voor de diverse taken bij ontwerpen en assemblage nodig is. Er wordt gestreefd naar de

specificatie van informatiestromen in een conceptueel systeem dat men het 'doelsysteem' noemt (zie afb. 4.3). Men gaat bij dit project uit



Afb. 4.3 Doelsysteem ESPRIT-project 384.

van bestaande producten en beschikbare productiefaciliteiten. Om de principes van dit systeem aan te tonen, zal men prototypen ontwikkelen van de modules waaruit het systeem bestaat. De activiteiten van het Metaalinstituut richten zich op de werkvoorbereiding.

In het doelsysteem zijn twee deelsystemen te onderscheiden, het 'product development sub-system' en het 'production sub-system'. Het 'product development sub-system' ondersteunt de ontwikkeling van produktmodellen waarin informatie over de samenstelling van het produkt en de wijze van montage zijn vastgelegd. Het ontwikkelen van een produktmodel verloopt iteratief waarbij stap voor stap de samenstelling van het produkt en de montagethoden worden verfijnd.

Het 'production sub-system' is verantwoordelijk voor de planning en besturing van de werkplaats, montagecellen en werkstations. Planning en besturing van de montage zijn hiërarchisch geordend. Op basis van een taaklijst ontwikkelt de 'workshop scheduler' dagelijks een grof productieplan. In dit plan zijn de te vervaardigen producten,



hun aantallen, productieperioden en te gebruiken montagecellen vastgelegd. De 'cell supervisors' verfijnen de opgedragen taken en geven instructies aan de werkstations in de cel. De 'cell supervisors' hebben tevens een bewakingsfunctie. Zij moeten geringe fouten zelf kunnen corrigeren en grotere fouten doorgeven aan de 'workshop-scheduler'.

De deelsystemen kunnen gebruik maken van afzonderlijke kennisbestanden met kennis over:

- de samenstelling van een beperkte categorie produkten;
- verbindingstechnieken;
- montageprocessen en montagehandelingen;
- montagemiddelen;
- regels voor de planning;
- procedures voor besturing en diagnose.

Het systeem bestaat verder uit simulatiegereedschappen ter ondersteuning van het ontwerpen en de werkvoorbereiding.

Het project is nader beschreven in [73].

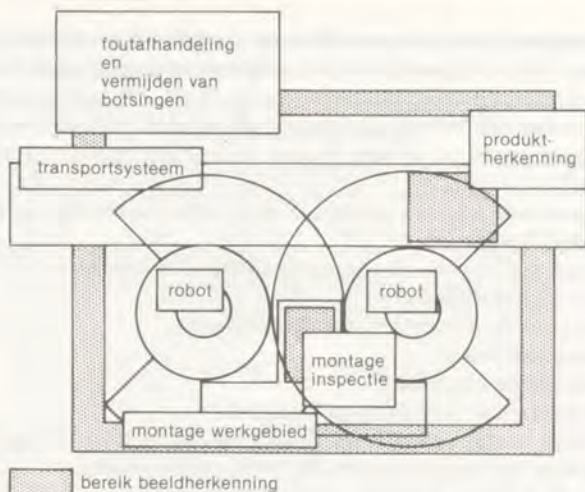
### Besturing van een montagecel

In het kader van Spin-Flair (StimuleringsProjectteam Informatica Nederland - Flexibele Automatisering Industriële Robots) wordt aan de Technische Universiteit Delft een project uitgevoerd dat moet leiden tot een 'intelligente' montagecel [74]. Aan het project nemen tien onderzoekgroepen deel van de faculteiten Werktuigbouw, Elektrotechniek, Technische Natuurkunde en Wiskunde en Informatica. Het project gaat uit van een montagecel bestaande uit de volgende componenten:

- twee zesassige robots met een multifunctioneel grijpersysteem;
- een transportsysteem voor de aan- en afvoer van werkstukken, onderdelen en produkten;
- een montagetafel met mallen en hulpgereedschappen;
- beeldherkenningssystemen voor de herkenning en modellering van werkstukken, het vermijden van botsingen en het afhandelen van fouten;
- een tactiel sensorsysteem voor grijpbewegingen.

Afb. 4.4 geeft een mogelijke uitvoering van de montagecel weer.

Het project is gericht zowel op het programmeren van de cel bij wisselende produktfamilies als op het programmeren van wisselende taken binnen een produktfamilie. Men verwacht dat met kennistech-niek het programmeren zo eenvoudig kan worden dat automatisering van montagecellen ook voor kleine series lonend wordt. De te ontwikkelen programmeermethode wordt gebaseerd op herhaalde ontbinding van taken in specifiekere deeltaken, waarbij de in werktuigbouwkundige termen gestelde montagevoorschriften en pro-



Afb. 4.4 Mogelijke opstelling van een flexibele montagecel [74].

duktomschrijvingen automatisch worden vertaald in programma's voor elementaire robothandelingen. Om dit te verwezenlijken, wil men een op vuistregels gebaseerd kennissysteem ontwikkelen, waarin de ontbinding van taken is vastgelegd. Om de hiervoor vereiste kennis te verwerven, wordt de systematiek van de montage diepgaand onderzocht. Het inzicht in deze systematiek is nog zeer beperkt omdat er nauwelijks enige ervaring is met robots en sensoren voor montage. Kennistechniek zal ook een rol spelen bij de bewaking van het montageproces. Men streeft naar het automatisch verhelpen van een aantal storingen met behulp van voorgeprogrammeerde procedures voor foutafhandeling. Het systeem dat de keuze van deze procedures bij foutmeldingen bepaalt, zal op kennistechniek worden gebaseerd. Ook zal kennistechniek worden gebruikt bij beeldherkenning. In par. 6.3 wordt nader ingegaan op de toepassing van kennistechniek voor taakontbinding, foutafhandeling en beeldherkenning bij robots. Een belangrijk onderdeel van het project is het onderzoek naar de geschiktste vorm van kennisrepresentatie. Men moet modellen en structuren ontwikkelen waarmee uiteenlopende kennistypen (zoals de beschrijving van elementaire objecten, beperkingen, verbanden en procedures) zodanig worden vastgelegd dat zij effectief en efficiënt kunnen worden gebruikt. Tenslotte wordt in het project veel aandacht besteed aan methoden om de samenhang te waarborgen tussen over autonome subsystemen verspreide kennis.



### 4.3 Flexibele fabricage van onderdelen

In deze paragraaf wordt achtereenvolgens ingegaan op de toepassing van kennissystemen bij werkvoorbereiding en tijdplanning van productie-eenheden voor de fabricage van onderdelen.

#### Werkvoorbereiding

Bij de werkvoorbereiding houdt men zich bezig met de keuze van opeenvolgende bewerkingen, machines en gereedschappen die nodig zijn om een produkt te maken.

Toenemende flexibiliteit maakt de werkvoorbereiding complexer omdat een fabricageproces moet worden ontworpen voor een grotere variatie produkten in een kortere tijd [75]. Bovendien zal de werkvoorbereider het werkplan sneller moeten aanpassen als er zich op de werkvloer onverwachte gebeurtenissen – zoals het plotseling uitvallen van een machine – voordoen. Bij flexibele productie-eenheden is het gewenst in die gevallen naar een alternatief proces te zoeken en niet te wachten tot een machine is hersteld. Men streeft er naar dergelijke veranderingen met ondersteuning van kennissystemen binnen enkele minuten tot stand te brengen.

Het belang van effectieve computerondersteuning wordt versterkt door twee andere factoren. In de eerste plaats worden aan kwaliteit en kostenbeheersing van de werkvoorbereiding hogere eisen gesteld door de toenemende concurrentie. De toenemende variatie in gevraagde produkten heeft bovendien tot gevolg dat de kosten van werkvoorbereiding van grotere invloed zullen zijn op de totale kosten van het produkt. Een tweede factor komt voort uit het toenemende tekort aan ervaren metaalbewerkers die de werkvoorbereiding meestal uitvoeren [76, 77]. Men hoopt dat ervaringskennis kan worden behouden en overgedragen door deze in kennissystemen vast te leggen.

De huidige systemen voor werkvoorbereiding kunnen in twee categorieën worden ingedeeld, namelijk variantensystemen en generatieve systemen.

Variantsystemen zijn gebaseerd op 'groepentechnologie', een methode waarbij de onderdelen en de daarbij horende fabricageprocessen in een numerieke code worden beschreven en in een gegevensbestand worden opgeslagen [78, 79]. Met groepentechnologie kunnen gelijksoortige onderdelen met eenzelfde fabricageproces worden gemaakt en door het analyseren van de bestanden kan bovendien de fabricage zoveel mogelijk worden gestandaardiseerd. Als een bepaald onderdeel moet worden vervaardigd, zoeken de variantensystemen eerst in hun bestand of er voor dit onderdeel al een bewerkingsplan

bestaat. Is dit niet het geval, dan wordt via de numerieke code gezocht naar het bewerkingsplan van een gelijksoortig onderdeel (variant). Door de gelijksoortige onderdelen in te delen in families, kan voor zo'n familie een standaardbewerkingsplan worden gemaakt, dat dan weer kan worden gebruikt voor elk nieuw onderdeel dat via zijn numerieke code in de familie blijkt te passen. Vindt men geen gelijksoortig of standaardbewerkingsplan, dan zal men dit zelf moeten maken.

Het nadeel van variantensystemen is dat de representatie door numerieke codes te weinig mogelijkheden biedt voor sterk gedifferentieerde produkt- en bewerkingseigenschappen.

Dit nadeel doet zich niet voor bij generatieve systemen. Generatieve systemen voor werkvoorbereiding werken met regels waarin de kennis van ervaren werkvoorbereiders is vastgelegd. De eerste generatieve systemen zijn gebaseerd op conventionele programmeermethoden. Tegenwoordig wordt steeds meer geprogrammeerd met kennistechniek. Twee voordelen van kennissystemen ten opzichte van procedurele systemen, namelijk flexibiliteit en verklarende capaciteit, gelden ook in sterke mate voor toepassingen in de werkvoorbereiding. In een kennissysteem kan men gemakkelijker kennis invoeren dan in algoritmische computerprogramma's. Daarom kunnen voor de werkvoorbereiding lege kennissystemen worden ontwikkeld waarin elk bedrijf zijn eigen bewerkingsmethoden en specifieke beslissingsregels kan vastleggen. Bovendien zal de kennis in de loop der tijd regelmatig moeten worden aangepast, zeker als nieuwe gereedschappen of materialen worden geïntroduceerd. Bovendien zal men de systemen moeten kunnen aanpassen aan nieuwe inzichten die uit experimenteel onderzoek van bewerkingsprocessen voortkomen.

De tot dusver voor werkvoorbereiding ontwikkelde kennissystemen beperken zich tot bewerkingen door een enkele machine. Als voorbeeld van deze systemen – die overigens nog slechts experimenteel worden gebruikt – wordt aan het eind van deze paragraaf het XPLANE-systeem beschreven. Voorbeelden van andere experimentele systemen vindt men in [80, 81, 82, 77, 83, 84].

De werkvoorbereiding voor een aantal produktie-eenheden in samenhang is vele malen complexer. Men moet hierbij niet alleen rekening houden met verspanende bewerkingen door meer dan één machine, maar ook met andere activiteiten zoals warmtebehandeling, reiniging en inspectie van produkten. Voor werkvoorbereiding op dit niveau zijn nog geen werkende kennissystemen gemaakt. Er zijn twee omvangrijke projecten te noemen die ook op dit niveau automatische werkvoorbereiding nastreven. TNO is betrokken bij het XPS (Experimental Planning System)-project dat is opgezet door CAM-I (Computer Aided Manufacturing International). CAM-I is een internationaal



georiënteerde organisatie die – door een groot aantal bedrijven gefinancierde – onderzoekprojecten op het gebied van de fabricage coördineert [79]. Volledig Nederlands is het in Spin-verband gesubsidieerde project 'Een werkvoorbereidingsysteem', dat wordt uitgevoerd door het Laboratorium voor Produktietechniek en de Vakgroep Produktieorganisatie van de Universiteit Twente en de Afdeling Interactieve Systemen van het Centrum voor Wiskunde en Informatica [85].

#### XPLANE

Het XPLANE-systeem wordt ontwikkeld door het Laboratorium voor Produktietechniek van de Universiteit Twente [86, 75, 87]. Het moet uiteindelijk in staat zijn – uitgaande van een driedimensionaal produktmodel of -tekening – automatisch bewerkingsmachines, bewerkingsmethoden en gereedschappen te selecteren. Bij deze selectie wordt rekening gehouden met de eisen die aan het produkt worden gesteld en de beperkingen die worden opgelegd door het aanwezige machine- en gereedschapbestand. Het huidige prototype van XPLANE is nog beperkt tot de keuze van bewerkingsmethoden.

XPLANE selecteert bewerkingsmethoden op basis van 'features', beschrijvingen van vormdelen zoals gaten, sleuven en kamers in termen van afmetingen, toleranties en oppervlakteruwheden. Deze beschrijvingen bevatten de informatie die nodig is voor de bepaling van bewerkingen, de volgorde daarvan, de wijze van opspanning en de metingen.

Om de bruikbaarheid van het systeem te vergroten, is gekozen voor de koppeling aan een 'boundary representation solid modeller'. Een 'solid modeller' is een computersysteem waarmee de ontwerper interactief produktmodellen kan maken inclusief de toleranties. Iedere aanpassing van het model kan visueel worden gecontroleerd. Met een algoritme voor de herkenning van eigenschappen worden automatisch de te vervaardigen vormdelen en de bijhorende parameters opgezocht. In par. 6.3 wordt op deze technieken nader ingegaan. Het kennisbestand van XPLANE bevat produktieregels. In deze regels kunnen naast de eerder genoemde parameters van eigenschappen en bewerkingsprocedures, ook gegevens uit materiaal-, machine- en gereedschapbestanden worden vastgelegd. Bovendien is er in de regels plaats voor procedures voor gegevensbeheer en grafische procedures. Een van de grote voordelen van kennisrepresentatie met behulp van produktieregels is de leesbaarheid. De volgende – zeer vereenvoudigde – regel laat dit zien:

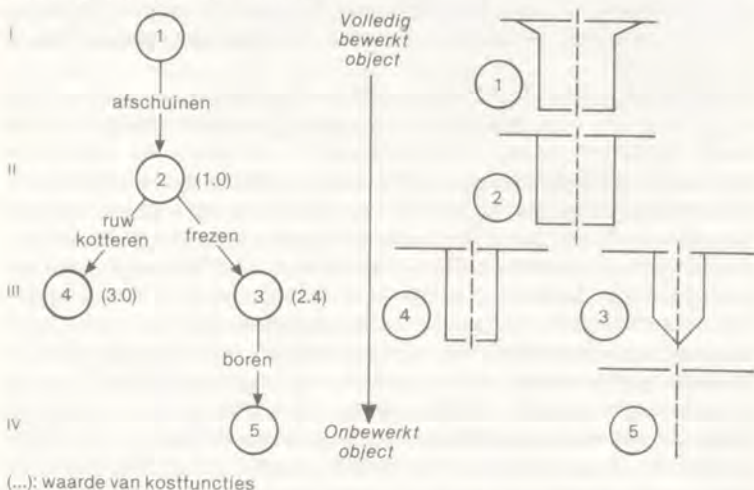
ALS diameter van het gat < grootste diameter beschikbare boren  
DAN boor dit gat.

In deze produktieregel is 'diameter van het gat' de kenmerkende

parameter, 'grootste diameter beschikbare boren' een globale parameter en 'boor dit gat' een beweringsprocedure die wordt geactiveerd als aan de voorwaarden wordt voldaan. De werkelijke regels van het systeem bestaan uit een aantal voorwaarden en één of meer procedures.

De werking van XPLANE wordt nu toegelicht aan de hand van de opdracht om een plan te maken voor het vervaardigen van een eenvoudig gat. Bij de inferentie wordt uitgegaan van een model van het volledig bewerkte gat. Beweringsregels worden vervolgens zo toegepast dat het gat als het ware stap voor stap wordt opgevuld. De kracht van de inferentiemachine ligt in het snel vinden van een of meer reeksen volledige bewerkingen. Het zoekproces wordt bij XPLANE gestuurd door keuze van de goedkoopste bewerking. De keuze komt als volgt tot stand. Eerst worden uitgaande van een bepaalde bewerkingstoestand alle mogelijke daaraan voorafgaande toestanden gegenereerd. Vervolgens worden bij iedere nieuwe toestand de kosten van de bewerking geschat. De toestand met de laagste kosten wordt dan als uitgangspunt genomen voor de volgende ontwikkeling van bewerkingstoestanden.

Afb. 4.5 geeft een eenvoudig voorbeeld van de werkwijze van XPLANE en de zich ontwikkelende boomstructuur. Toestand 2 kan blijkbaar op twee manieren worden bereikt. Op grond van de kostenschatting wordt gekozen voor frezen.



Afb. 4.5 Ontwikkeling van inferentiekets bij XPLANE.

Als het systeem een aantal succesvolle reeksen bewerkingen heeft gevonden, kan op basis van de kostenfunctie de goedkoopste reeks worden geselecteerd.



XPLANE is volledig ontwikkeld in FORTRAN-77. Een van de belangrijkste redenen om – in plaats van een specifieke AI-taal – voor FORTRAN te kiezen, is het gebruik van in FORTRAN geschreven CAD/CAM-programmatuur binnen het systeem.

Bij de ontwikkeling van XPLANE is veel aandacht besteed aan een opmaakfaciliteit voor het kennisbestand die de gebruiker kan assistieren bij het doorvoeren van wijzigingen. Behalve veranderen, toevoegen, verwijderen en opzoeken van regels, is het automatisch waarborgen van de consistentie van het kennisbestand een belangrijke taak van deze faciliteit.

### Tijdplanning

Het zal duidelijk zijn dat toenemende flexibiliteit ook bij de tijdplanning leidt tot problemen. Deze problemen komen in de eerste plaats voort uit een combinatorische explosie van mogelijke plannen voor de gelijktijdige uitvoering van een aantal – soms sterk verschillende – orders.

Stel dat men een tijdplanning moet maken voor tien orders die ieder uit vijf bewerkingen bestaan en dat voor iedere bewerking één machine nodig is. Als men er van uitgaat dat er geen wachttijden in het plan moeten worden ingebouwd, zijn er ongeveer  $10^{32}$  plannen mogelijk.

In de praktijk komen veel complexere situaties voor, omdat de aantallen orders en het aantal bewerkingen veel groter zijn. Bovendien moet men rekening houden met onzekerheden die inherent zijn aan het fabricageproces. Zo kunnen orders veranderen, productiemiddelen uitvallen of de aanvoer van onderdelen om meer dan één reden verstoord raken [64].

Vaak moeten beslissingen worden genomen zonder dat men over al deze informatie beschikt. Omdat men te maken heeft met een aantal toeleveranciers is tevens de kans op storingen in de aanvoer van onderdelen groter. Er komen regelmatig situaties voor die niet waren te voorspellen. Daardoor holt men met de plannen vaak achter de feiten aan. Planners lijken niet goed meer overweg te kunnen met de toenemende complexiteit van de problemen. De doelmatigheid van flexibele productie-eenheden is daardoor over het algemeen laag. Voor de tijdplanning van flexibele productie-eenheden kunnen – zelfs met de krachtigste computers – geen optimale oplossingen worden verwezenlijkt. Om toch snel genoeg tot oplossingen te kunnen komen, gaan conventionele computerprogramma's uit van vereenvoudigde modellen van het fabricageproces. Verder zijn zij deterministisch van aard en houden dus geen rekening met veranderende situaties. Zij leveren plannen op week- of maandbasis en voorzien niet in directe aanpassing van plannen op grond van veranderende situaties. Con-

ventionele planningsystemen bieden de productiechef dus slechts grove richtlijnen.

Door de explosie van combinatorische mogelijkheden en door onzekerheden zijn problemen bij de tijdplanning typisch slecht gestructureerd. Daarmee vormen zij een grote uitdaging voor de kennistechniek. Kennistechniek moet dan leiden tot methoden waarmee alle eigenschappen en eisen van het fabricageproces doelgericht en doelmatig worden gehanteerd. Deze eisen en eigenschappen dienen als beperkingen ('constraints') waarmee de omvangrijke probleemruimte zo snel mogelijk kan worden ingeperkt. Fox en Smith - van het op dit gebied vooraanstaande Robotics Institute van Carnegie-Mellon University - geven een overzicht van beperkingen waarvan kennissystemen voor tijdplanning van productie-eenheden gebruik kunnen maken [64]. Zij onderscheiden beperkingen die te maken hebben met de rentabiliteit van het bedrijf, fysische beperkingen, causale beperkingen, beperkingen door de beschikbaarheid van produktiemiddelen en beperkingen die voortkomen uit voorkeur voor bepaalde bewerkingen, produktiemiddelen of opeenvolgingen van bewerkingen. Tabel 4.2 geeft de belangrijkste beperkingen weer.

Tabel 4.2 Beperkingen bij tijdplanning [64].

---

#### Organisatorische doelen

- eisen in verband met het functioneren van de organisatie; voorbeelden: oplevertijden, hoeveelheid werk in uitvoering, productieniveaus

#### Technische beperkingen

- statische en dynamische eigenschappen van produktiemiddelen; voorbeelden: de afmetingen van machines, omsteltijden en bewerkingstijden

#### Causale beperkingen

- de voorwaarden voor het initiëren van handelingen; voorbeelden: de logische opeenvolging van bewerkingen, de produktiemiddelen die voor een bewerking nodig zijn

#### Beperkingen door beschikbaarheid

- als voor een bepaalde periode bepaalde bewerkingen aan een produktiemiddel worden toegewezen, is het produktiemiddel niet beschikbaar voor andere bewerkingen

#### Beperkingen door voorkeur

- er kan in een bepaalde context een voorkeur bestaan voor een bepaald produktiemiddel, bepaalde bewerkingen of bepaalde opeenvolgingen van middelen of bewerkingen, zonder dat deze voorkeur formeel wordt afgeleid uit de eerder genoemde beperkingen.
- 

Projecten op het gebied van tijdplanning zijn beschreven in [64, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95]. In het vervolg van deze paragraaf zal op drie van



deze projecten worden ingegaan, te weten de ISIS- en OPIS-projecten van Carnegie-Mellon University en de EXPERT SUPERVISOR waarbij de Technische Universiteit Delft betrokken is.

#### *ISIS en OPIS*

Als onderdeel van een groot project voor de ontwikkeling van een 'Intelligent Management System' heeft men het ISIS-systeem ontwikkeld [96, 64]. Dit systeem is ontworpen om voor produktie-eenheden van het 'jobshop'-type tijdplannen te genereren.

ISIS maakt bij de ontwikkeling van tijdplannen gebruik van alle beperkingen die bij 'jobshop'-eenheden een rol spelen. Het systeem houdt bijvoorbeeld rekening met doorlooptijden, kosten, nauwkeurigheid, machinetypen, produktiemiddelen, voorafgaande operaties, afmetingen, beschikbaarheid van gereedschap. Het systeem selecteert opeenvolgende bewerkingen, wijst produktiemiddelen toe, en stelt begin- en eindtijden vast voor iedere bewerking.

ISIS zoekt automatisch, of interactief met een gebruiker, naar plannen die zo goed mogelijk voldoen aan bepaalde criteria. Enkele van die criteria zijn:

- winstoverwegingen (bijv. vervaldatum);
- fysische randvoorwaarden (bijv. capaciteit van de produktiemiddelen);
- causale verbanden (bijv. volgorde van operaties);
- beschikbaarheidscriteria (bijv. beschikbaarheid van machines) of voorkeuren van het personeel.

Bij de ontwikkeling van ISIS is uitgebreid onderzoek gedaan naar de aard van beperkingen bij de tijdplanning, de wijze van representatie, methoden om beperkingen te benutten voor doelmatige planning, de onverenigbaarheid van plannen die voldoen aan meer dan één beperking en methoden om in deze gevallen toch tot aanvaardbare oplossingen te komen. Het kan bijvoorbeeld voorkomen dat levertijden om plannen vragen waarvan de kosten de gestelde kostenbeperkingen overschrijden.

Om dergelijke conflictsituaties op te lossen, maakt ISIS gebruik van twee technieken, namelijk het afzwakken van beperkingen en de ordening van beperkingen naar belangrijkheid. Het afzwakken van beperkingen gebeurt door het kiezen van iets minder dan het optimale. Zo kan bijvoorbeeld een levertijd tot op zekere hoogte worden overschreden als daarmee aan andere beperkingen tegemoet wordt gekomen. De belangrijkheid van beperkingen bepaalt uiteraard welke beperkingen bij conflicten moeten worden afgezwakt. Mogelijke interacties tussen beperkingen zijn expliciet gerepresenteerd. Van iedere interactie zijn bovendien richting en sterkte vastgelegd. De belangrijkheid van een beperking kan overigens van order tot order verschillen.

Voordat ISIS beperkingen kan gebruiken, moet het systeem kunnen vaststellen wanneer zij relevant zijn. Hierin is voorzien door beperkingen te koppelen aan relevante begrippen of waarden. Als het systeem deze begrippen bij de planning gebruikt, worden automatisch de gerelateerde beperkingen bij het planningproces betrokken. Verder beschikt ISIS over procedures om uit de eerste verzameling beperkingen – afhankelijk van de context – een selectie te maken.

De planning verloopt volgens een vaste hiërarchie van vier niveaus. Op het eerste niveau wordt volgens bepaalde procedures een order geselecteerd. Op het tweede niveau maakt ISIS een capaciteitsanalyse. Het systeem bepaalt welke produktiemiddelen voor een order beschikbaar zijn en bepaalt met de kritieke padmethode voor iedere bewerking de vroegste begintijd en de laatste eindtijd. Op het derde niveau komt een gedetailleerd plan tot stand waarin de volgorde van bewerkingen is vastgelegd en voor iedere bewerking de produktiemiddelen zijn gereserveerd. Ook de periode waarin ieder produktiemiddel beschikbaar is, wordt vastgelegd. Tenslotte worden op het vierde niveau de reserveringen van produktiemiddelen – binnen de beschikbare perioden – zodanig gekozen dat de looptijd van een order tot het uiterste wordt teruggebracht.

Terwijl de plannen in de fabriek worden uitgevoerd, kan ISIS worden gebruikt om afwijkingen van het schema af te leiden door het voorspelde gedrag te vergelijken met het werkelijke gedrag. Als een afwijking wordt ontdekt, wordt niet het hele plan herzien, maar worden alleen de betrokken handelingen zo goed mogelijk aangepast. Het feit dat ISIS een planning per order maakt en geen rekening houdt met volgende orders, bleek een belangrijke tekortkoming. Daarom werd begonnen met de ontwikkeling van een programma – OPIS genoemd – dat bij de planning ook rekening houdt met toekomstige orders [88, 89].

OPIS voert een opportunistische planningstrategie uit en is gebouwd volgens de schoolbordarchitectuur (zie par. 3.4 en 6.3). Bij OPIS activeert een managermoduul de andere modulen op grond van de toestand van het fabricageproces. Eerst wordt een moduul geactiveerd dat ruwe plannen maakt aan de hand van orders. Vervolgens worden de produktiemiddelen naar knelpunten geanalyseerd door een moduul voor capaciteitsanalyse. Is er een knelpunt, dan past een andere moduul de planning van deze produktiemiddelen aan. De moduul voor capaciteitsanalyse stelt dan opnieuw vast of de aanpassing knelpunten oplevert bij andere produktiemiddelen. Als dit het geval is, wordt de toewijzing van produktiemiddelen opnieuw aangepast. De cyclus van analyse en aanpassing zet zich voort tot er geen knelpunten meer zijn. Dan wordt de planning voltooid door de moduul voor nauwkeurige orderplanning. Deze planning verloopt volgens de wijze die in ISIS werd toegepast op het vierde niveau.



*EXPERT SUPERVISOR*

In het kader van het ESPRIT-project 809 heeft de Vakgroep Technische Informatica van de Technische Universiteit Delft zich samen met het Duitse bedrijf Krupp Atlas Datensystemen gericht op de ontwikkeling van een kennissysteem voor onvertraagde besturing van productiecellen. Het kennissysteem onderscheidt zich onder andere van ISIS en OPIS doordat het geen optimale plannen tracht te ontwikkelen, maar zich beperkt tot aanpassing van ingevoerde plannen aan onverwachte omstandigheden. Men beoogt hierbij responstijden van maximaal één minuut.

Het systeem bestaat uit vier componenten:

- een kennissysteem waarin vuistregels voor de aanpassing van plannen zijn vastgelegd;
- een eenheid voor tijdplanning met procedures voor de ontwikkeling van plannen en de toetsing van het effect van deze plannen;
- een besturingseenheid voor de flexibele fabricagecel;
- een eenheid voor de bewaking van het fabricageproces.

Voor de vaststelling, samenvatting en evaluatie van plannen beschikt de eenheid voor tijdplanning over een simulator waarmee de fabricagecel kan worden nagebootst. In deze fase van het project gaat het hele systeem overigens uit van een gesimuleerd fabricageproces. Ook de besturingseenheid beschikt om deze reden over een simulator.

Het kennissysteem is gebouwd met het lege kennissysteem DELFI-2, een produkt van de Vakgroep Informatica van de Technische Universiteit Delft. De simulatoren en de eenheid voor tijdplanning zijn ontwikkeld met ASIM, een op FORTRAN-77 gebaseerde simulatieomgeving. ASIM werd door Krupp Atlas Datensystemen ontworpen. Het kennissysteem wordt gevoed met informatie over de toestand van een flexibele fabricagecel en werkzaamheden die uitstaan. Als zich een ongewenste situatie voordoet, selecteert het systeem één of meer alternatieve planningstrategieën om het fabricageproces te corrigeren. Gebruikers van het systeem kunnen altijd om uitleg, voorspellingen of - naar eigen voorkeur - om planning volgens een bepaalde strategie vragen.

De strategieën waarvan het systeem gebruik maakt, zijn te onderscheiden in twee groepen. De eerste groep omvat twee strategieën, 'first in first out' en 'random acces'. In het eerste geval is de opeenvolging van bewerkingen vastgelegd door de volgorde waarmee orders de buffers verlaten; de tijdplanning kan dan slechts worden bepaald voor uitstaande orders. In het tweede geval zal de volgorde van bewerkingen ook kunnen worden bepaald voor orders in de buffers.

Als uit de eerste groep een strategie is gekozen kan de planning worden verfijnd met strategieën uit de tweede groep. Daarin worden drie categorieën onderscheiden, namelijk:

- Strategieën die bewerkingen ordenen volgens een bepaalde norm. Een voorbeeld is de strategie waarbij men prioriteit geeft aan orders met de kortst resterende bewerkingstijd.
- Strategieën die zich richten op bepaalde bewerkingen; de planning kan zich bijvoorbeeld geheel richten op alle opdrachten voor de freesbank.
- Gecombineerde strategieën.

De keuze van strategieën kan worden bepaald volgens:

- optimalisatiecriteria, zoals kosten of gemiddelde werklust;
- foutcriteria, die in werking treden bij beschadiging van werkstukken of het uitvallen van een machine;
- tijdsriteria, zoals doorloop- en levertijden.

Foutmeldingen van de besturingssimulator kunnen gaan over het uitvallen van machines, te lage productiesnelheid van een machine, het te laat binnenkomen van een opdracht of gereedschap en het optreden van defecten in een produkt.

Foutmeldingen bij het toetsen van plannen door de tijdplanner hebben betrekking op overbezetting van buffers of niet gehaalde oplevertijden.

Meer details over het project zijn te vinden in [90].

#### 4.4 Simulatie van fabricagesystemen

Bij de fabricage is simulatie om twee redenen interessant. Simulatie maakt experimenteel onderzoek van de fabricage mogelijk voordat een fabricagesysteem wordt gebouwd en zonder dat het fabricageproces wordt gestoord. De eerste reden is interessant bij het ontwerpen van fabricageprocessen, de tweede reden bij de planning [97, 98].

Bij de fabricage is vooral de simulatie van discrete gebeurtenissen van belang. Als sinds de jaren zeventig zijn hiervoor speciale simulatietaalen ontwikkeld.

Oren en Zeigler gaven een aantal aanbevelingen voor de ontwikkeling van simulatiesystemen [99]. Deze kunnen als volgt worden samengevat:

- Het verbeteren van de gebruikersinterface door grafische hulpmiddelen en faciliteiten die de gebruiker ondersteunen bij het ontwikkelen en experimenteren met modellen.
- Het ontwikkelen van gestructureerde methoden om modellen te ontwikkelen. Om deze methoden mogelijk te maken, moeten de modellen een modulair karakter hebben.
- De ontwikkeling van hiërarchische modellen, zodat systemen in verschillende mate van detail kunnen worden bestudeerd.
- De ontwikkeling van effectieve faciliteiten voor het beheer van de informatie die bij simulaties een rol speelt.



Volgens Harhen e.a. is het onwaarschijnlijk dat deze aanbevelingen met de conventionele programmatuur kunnen worden opgevolgd [100]. Er wordt op een aantal plaatsen onderzoek gedaan naar de mogelijkheden met kennistechniek simulatie te verbeteren. Bij dit onderzoek kan men in grote trekken twee richtingen onderscheiden: het simuleren met programmatuur uit de kennistechniek en het gebruik van kennissystemen die bij het simuleren ondersteuning kunnen bieden.

Het is gebleken dat vooral object-georiënteerde talen geschikt zijn voor simulatie van discrete processen. Belangrijke eigenschappen zijn het modulaire karakter, de combinatie van procedurele en declaratieve vormen van representatie, de mogelijkheden van overerving, het bieden van een goed uitgangspunt voor de ontwikkeling van interactieve grafische faciliteiten en de mogelijkheid tot combinatie met kennissystemen met heuristische kennis over de te simuleren processen.

Voorbeelden van object-georiënteerde simulatie-omgevingen zijn:

- KBS (Knowledge-Based Simulation), dat bij de Carnegie-Mellon University in ontwikkeling is en centraal staat in het Intelligent Management Systems-project [101]. Een commerciële versie van KBS, Simulation Craft, is uitgebracht door de Carnegie Group, een bedrijf dat door onderzoekers van Carnegie-Mellon University is opgericht.
- SIMKIT, ontwikkeld door Intellicorp en commercieel verkrijgbaar. Deze omgeving wordt in de ESPRIT-projecten 932 en 384 gebruikt [102, 103, 73]. Unisys heeft SIMKIT toegepast bij het experimenteren met 'just in time' assemblage van computers [104].
- ROSS, een systeem dat wordt ontwikkeld door de Rand Corporation [100, 105].

Om de mogelijkheden van op kennistechniek gebaseerde simulatietaalen te schetsen, wordt nader ingegaan op de belangrijkste aspecten van KBS [101]. KBS voorziet niet alleen in het bouwen van modellen en het uitvoeren van simulaties, maar ook in de automatische analyse van simulatieresultaten. Het systeem is gebaseerd op de taal SRL (Scheme Representation Language). De componenten van een KBS-model worden beschreven door schema's. Deze schema's komen overeen met de objecten in het object-georiënteerd programmeren. Samenhang en volledigheid van modellen worden getoetst met technieken van het logisch programmeren die in LISP zijn uitgevoerd. De samenhang wordt getoetst aan de hand van relaties tussen schema's. Het systeem toetst iedere stap in de bouw van een model aan deze relaties en bepaalt de oorzaak van gebleken gebreken.

KBS is in staat modellen op een vereenvoudigde manier te representeren. In een vereenvoudigde versie kunnen simulaties sneller worden

uitgevoerd. Door irrelevante details weg te laten, kan bovendien het inzicht van de gebruiker worden vergroot. Vereenvoudiging kan tot stand komen door componenten in het model te bundelen. Zo kunnen van een gesimuleerd distributienetwerk de afzonderlijke opslagplaatsen in een regio worden gebundeld tot één regionale opslagplaats. Ook kan het gedrag van componenten statistisch worden samengevat. Simulatie met KBS houdt in dat de toestand van een model op discrete tijdstippen wordt gewijzigd. Nadat de toestand van het model op een bepaald tijdstip is gewijzigd, kan het KBS suggesties geven over wijzigingen op het volgende tijdstip. De opeenvolgingen van toestandsveranderingen levert het scenario van het gedrag van het model. KBS kan ook experimenteren zonder interventie van de gebruiker. Het systeem beschikt over produktieregels waarmee het automatisch een scenario kan verbeteren. Het systeem beschikt over instrumenten om veranderingen van parameterwaarden te meten en kan verbanden tussen gebeurtenissen en veranderende waarden vastleggen. Na de simulatie kan het hiermee hypothesen over causale relaties in het model toetsen.

Scenario's kunnen worden beoordeeld door een gewogen gemiddelde van de mate waarin doelen worden benaderd. Verder beschikt het systeem over vuistregels om tekortkomingen te analyseren.

Behalve voor de analyse van het gedrag van een model en het afleiden van causale verbanden, kan men KBS ook voor andere toepassingen gebruiken. Zo beschikt het systeem over technieken uit de beslistkunde voor wiskundige analyse, kan het de gevolgen van wijzigingen in een model voorspellen, kan het uitleg geven over de oorzaak van onvolmaaktheden of een vergelijkende analyse van opties verrichten. KBS is tot nu toe toegepast voor de ontwikkeling van een fabricagesysteem voor geïntegreerde schakelingen, een assemblagesysteem met robots, een systeem voor assemblage en beproeving van computerterminals, een fabricagesysteem voor computers en een distributiesysteem [101].

Alhoewel er veel wordt geschreven over de mogelijkheden van kennissystemen als hulpmiddel voor simulatie, zijn er weinig systemen beschreven [100].

Als voorbeeld van een kennissysteem voor de ondersteuning bij het simuleren van discrete processen kan NLPQ (Natural Language Programming for Queueing Simulations) worden genoemd. NLPQ werkt als volgt. De gebruiker geeft specificaties over een wachtrijprobleem en het programma 'vertaalt' dit probleem in een semantisch netwerk. Hierbij wordt de gebruiker interactief ondervraagd. Vervolgens wordt het netwerk omgezet in een in de simulatietaal GPSS geschreven model. Het NLPQ-systeem maakt voor de vertaling van specificaties en de ontwikkeling van het GPSS-model gebruik van produktieregels [106].



---

## **5. Kennissystemen voor machines en installaties**

### **5.1 Inleiding**

Machines en installaties worden steeds complexer. Effectieve en doelmatige besturing en beheersing vragen meer geautomatiseerde functies en taken. Kennissystemen zullen hierbij waarschijnlijk een belangrijke rol spelen. In dit hoofdstuk worden de volgende toepassingsgebieden verkend: technische ondersteuning bij reparatie, onderhoud en procesbewaking, automatische procesbesturing en robots.

### **5.2 Technische ondersteuning bij reparatie, onderhoud en procesbewaking**

De toenemende complexiteit van machines en installaties heeft tot gevolg dat de oorzaken van storingen steeds moeilijker kunnen worden opgespoord. Gebruikers hebben minder inzicht in de technische processen die aan de functie van een systeem ten grondslag liggen. Voor diagnose, reparatie en onderhoud zijn steeds meer specialisten nodig.

Deze paragraaf beschrijft eerst de toepassing en potentiële betekenis van kennissystemen bij reparatie en onderhoud. Vervolgens wordt ingegaan op de mogelijkheden kennissystemen te gebruiken bij de bewaking van complexe processen. Tenslotte worden enige voor deze toepassingen belangrijke kennistechnische aspecten besproken.

#### **Reparatie en onderhoud**

Waar specialisten schaars zijn, kunnen kennissystemen een rol spelen als hulpmiddel om specialistische kennis over te dragen. Dit gebeurt al door handboeken, maar daarin is slechts 'passieve' kennis te vinden waaruit de gebruiker zelf een geschikte keuze moet maken. In kennissystemen daarentegen is kennis 'actief'. De systemen zoeken zelf met hun kennis naar een oplossing en de kennis kan daardoor sneller worden benut.

Kennissystemen kunnen een rol spelen bij de dienstverlening door de kennis van een beperkt aantal specialisten aan te bieden aan verkooppunten. Ford Europe heeft om deze reden een kennissysteem

laten ontwikkelen voor de diagnose van fouten in de transmissie van verschillende autotypen [107]. Ook Philips heeft een kennisstelsel voor diagnose en reparatie ontwikkeld om de dienstverlening te verbeteren.

Kennissystemen kunnen ook worden toegepast bij technische opleidingen. Met SOPHIE III kunnen beginnende elektrotechnici zich oefenen in het onderzoeken en herstellen van elektronische schakelingen [108,1]. Het stelsel bestaat uit een aantal modulen. De 'electronics expert' heeft kennis over een bepaalde schakeling en algemene elektronische kennis. De 'trouble-shooter' heeft kennis over onderzoeksmethoden. De 'coach' bepaalt de interactie met de leerling.

Een ander motief voor de ontwikkeling van kennisstelsels voor reparatie en onderhoud is toename van de produktiviteit. Een bekend voorbeeld in dit opzicht is het door AT&T Bell Laboratories ontwikkelde kennisstelsel ACE [109]. ACE analyseert storingen in telefoonnetwerken en adviseert over herstel- en onderhoudswerkzaamheden. De analyse van storingen door ervaren experts bleek in storingsgevoelige tijden te leiden tot vertragingen. Deze vertragingen worden voorkomen als met ACE een deel van de analyse wordt geautomatiseerd. ACE wordt inmiddels door AT&T op de markt gebracht.

Bij het besluit van General Electric om CATS-1 – een diagnosesysteem voor locomotieven – te ontwikkelen, speelden vooral twee feiten een rol [110, 111]. In de eerste plaats werd vastgesteld dat locomotieven te vaak ten onrechte naar een centrale werkplaats werden gestuurd voor uitgebreid en kostbaar onderzoek. Veel storingen zouden eenvoudiger en goedkoper kunnen worden verholpen door monteurs van onderhoudstations langs de spoorlijn. Ten tweede beschikte men over een expert die buitengewoon goed was in het stellen van diagnoses. Door de kennis van deze expert via een kennisstelsel over te dragen aan de onderhoudsmonteurs, wilde men bereiken dat de locomotieven vaker lokaal worden gerepareerd.

Andere voorbeelden van kennisstelsels voor onderhoud en reparatie vindt men in [112, 113, 114, 115].

### Procesbewaking

Uitval van grootschalige produktieprocessen in de industrie kan leiden tot hoge kosten en grote risico's. De meeste processen vertonen fluctuaties en moeten regelmatig worden bijgestuurd. Voor de besturing van complexe systemen is het nodig het proces continu te volgen. Operators moeten in de eerste plaats relevante afwijkingen in het gedrag van procesvariabelen verklaren en daaruit conclusies trekken over de verdere ontwikkeling van het gedrag en de gevolgen hiervan. Vervolgens moeten zij tijdig bepalen of en hoe er moet



worden ingegrepen. De gevolgen van iedere ingreep moeten zij voldoende kunnen voorzien. De toenemende complexiteit van de te bewaken systemen heeft ertoe geleid dat operators in de regelkamer steeds meer variabelen in de gaten moeten houden. In noodsituaties kan een operator worden geconfronteerd met honderden alarmsignalen per minuut. Het is voor een operator nagenoeg onmogelijk deze hoeveelheid signalen voldoende snel te interpreteren en de juiste oplossingen te vinden.

Een noodtoestand ontstaat vaak geleidelijk door een aaneenschakeling van kleine fouten. Wanneer een proces langzaam verslechtert, wordt dit door operators vaak niet waargenomen. De combinatie van toenemende complexiteit en hogere graad van automatisering enerzijds en zeldzaamheid van ernstige storingen anderszijds draagt op zich bij tot grotere risico's. Omdat operators minder zicht hebben op het gedrag van processen als geheel en minder kunnen bijsturen, neemt de kans toe dat hun concentratie afneemt en dat door onachtzaamheid fouten worden gemaakt. Hierdoor is er belangstelling ontstaan voor kennissystemen die – in tegenstelling tot conventionele informatiesystemen – niet slechts informatie geven, maar ook een deel van de interpretatie voor hun rekening nemen en de operator adviseren over maatregelen. Een ander aandachtspunt is de ontwikkeling van systemen die de operator al bij kleine verstoringen waarschuwen en raadplegen over eventuele maatregelen. Op deze wijze neemt de kans toe dat rampspoedige ontwikkelingen in een vroeg stadium worden voorkomen. Bovendien verwacht men dat de operator zo beter betrokken wordt bij het bewakingsproces.

Tot nu toe is gesproken over computerondersteuning bij de bewaking van lopende processen. In de procesindustrie kunnen kennissystemen echter ook een belangrijke rol spelen bij het starten en afsluiten van processen. Deze handelingen komen onder normale omstandigheden niet vaak voor en zijn dus geen routine. Daardoor ziet de operator zich vaak voor nieuwe problemen gesteld.

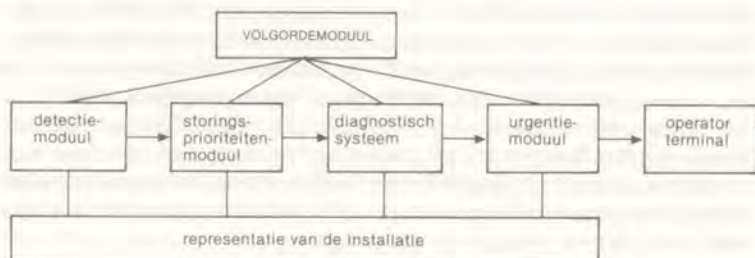
Het Process Diagnosis System (PDS), is een kennissysteem voor de bewaking van continue processen. PDS is door het Robotics Institute van Carnegie-Mellon University in samenwerking met Westinghouse ontwikkeld en wordt al praktisch toegepast bij de bewaking van elektriciteitscentrales [116]. Men heeft een netwerk ontwikkeld dat een centraal diagnostisch centrum verbindt met een datacentrum bij iedere centrale. Het kennissysteem bevindt zich in het diagnostisch centrum en houdt continu zeven centrales in de gaten. Storingendiagnosen worden automatisch gesteld en direct gepresenteerd aan operators die zich in de datacentra bevinden. Zij krijgen op hun beeldscherm een lijst van mogelijke – naar waarschijnlijkheid geordende – oorzaken te zien. Desgewenst kunnen operators het kennis-

systeem vragen naar methoden om de diagnose te verfijnen. Een bijzonderheid van PDS is dat het niet alleen procesfouten opspoor, maar ook de oorzaak kan vaststellen van foutmeldingen die door defecte sensoren worden veroorzaakt [117].

In het diagnostisch centrum zijn dag en nacht experts aanwezig die de kennis van het kennissysteem aanvullen en die – als het kennissysteem onvoldoende uitkomst biedt – door de operators kunnen worden geraadpleegd. Om de communicatie tussen operators en experts te bevorderen, zijn in het netwerk ook faciliteiten voor elektronische post opgenomen.

Eind 1986 bestond het systeem uit 8.500 regels en kon het 350 oorzaken bepalen. Men kwam tot de conclusie dat de gebruikte toepassing van kennissystemen voor 'online'-diagnose van elektriciteitscentrales rendabel is. Tevens werd vastgesteld dat ontwikkeling van dergelijke systemen een groot aantal experts op verschillende gebieden vereist.

ESCORT is ontwikkeld door PA Computers and Telecommunications [118]. In 1987 werd het kennissysteem voor operationele experimenten geïnstalleerd in de regelkamer van twee installaties voor oliewinning. In ESCORT is de kennis ondergebracht in een aantal kennismodulen. Afb. 5.1 laat die modulen zien met de informatiestromen in het systeem.



Afb. 5.1 Kennismodulen en informatiestromen bij ESCORT [118].

De 'detectie' moduul bevat kennis waarmee alarmtoestanden kunnen worden vastgesteld. Vastgestelde alarmtoestanden worden door de 'storingsprioriteiten' moduul geordend zowel naar het belang van lokatie van de alarmtoestand als naar het belang van het soort alarm voor deze lokatie. Het 'diagnostisch systeem' tracht een oorzaak van alarmtoestanden vast te stellen en houdt van iedere toestand bij in hoeverre de verklaring is gevorderd. De 'urgentie' moduul ordent de verklaarde storingen naar urgentie van maatregelen. Een vijfde moduul, de 'volgorde' moduul bepaalt welke taken op een bepaald moment moeten worden uitgevoerd.



Andere voorbeelden van de toepassing van kennissystemen als hulpmiddel voor procesbewaking zijn beschreven in [119, 120, 121].

### **Kennis en redeneren**

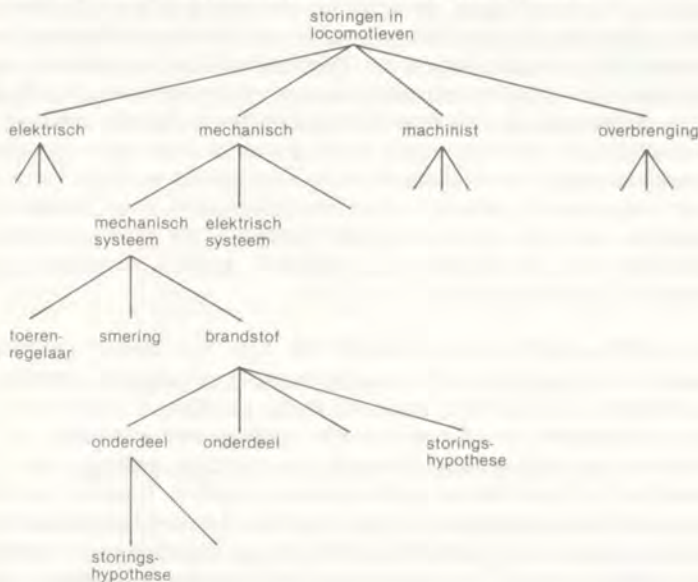
De kennis en de redeneerwijze van kennissystemen voor technische ondersteuning hangen in sterke mate af van de functie van het kennissysteem. Als het systeem dient voor routinecontrole of voor de diagnose van veel voorkomende storingen, zijn vuistregels met de kennis van ervaren operators of reparateurs voldoende. Als het probleemgebied van beperkte omvang is of in goed afgebakende deelgebieden is op te delen, is een eenvoudig voorwaarts of achterwaarts inferentiemechanisme genoeg.

Als kennissystemen worden ontwikkeld om oorzaken van onverwachte, zeldzame storingen in complexe systemen op te sporen, ligt dit anders. Bij dergelijke storingen wordt men vaak geconfronteerd met een beperkt aantal symptomen of klachten waaraan vele oorzaken ten grondslag kunnen liggen. In kritieke situaties zal het uitputtend onderzoeken van alle mogelijke oorzaken – zoals eenvoudige kennissystemen doen – veel te lang duren. Er zijn dus kennissystemen nodig die doelgericht de probleemruimte in een vroeg stadium weten in te perken. Kenmerkend voor deze kennissystemen is dat zij problemen uit verschillende gezichtspunten beschouwen en over meer dan één inferentiestrategie beschikken. Behalve heuristische ondiepe kennis, is voor diagnoses in complexe gevallen diepe kennis over causale en structurele aspecten van het systeem vereist. Deze kennissystemen beschikken over metakennis om doelgericht gebruik te maken van strategieën en domeinkennis.

Een ander aspect is het redeneren met tijd. Het stellen van een diagnose op grond van een momentopname is in complexe gevallen onvoldoende. Een kennissysteem zal in die gevallen in staat moeten zijn te redeneren over het historische gedrag van processen. Het redeneren met tijd is ook belangrijk om mogelijk gedrag – en de invloed van ingrepen hierop – te kunnen voorspellen. Tenslotte zullen in vele systemen procedures moeten worden ingebouwd om de kosten en consequenties van onderzoeksmethoden en ingrepen af te wegen. Veel problemen die bij het stellen van diagnoses en de reparatie van technische systemen een rol spelen, zijn analoog aan de problemen bij medische diagnosestelling en therapiebepaling [2]. De inzichten die men bij de ontwikkeling van medische kennissystemen heeft opgedaan, kunnen nuttig zijn voor ontwerpers van technische diagnose- en reparatiesystemen en van kennissystemen voor procesbewaking. In het vervolg van deze paragraaf zullen de kennistechnische aspecten aan de hand van enige voorbeelden nader worden toegelicht.

### Redeneren met regels

De eerder genoemde systemen CATS-1 en PDS redeneren beide met regels waarin de kennis van experts is vastgelegd [117, 111, 110, 116]. Bij beide systemen wordt de waarschijnlijkheid van verschillende diagnoses berekend uit de zekerheidsfactoren van in de inferentieketens vastgelegde regels (zie ook par. 3.4). CATS-1 ontwikkelt – voorwaarts redenerend – een voorlopige diagnose, bestaande uit een aantal hypothetische verklaringen van waargenomen symptomen. Nadat de voorlopige diagnose is gesteld, wordt iedere hypothese nader getoetst aan combinaties van de oorspronkelijke feiten met nieuwe feiten die door het systeem worden afgeleid of aan de gebruiker worden gevraagd. De kennis is bij CATS-1 hiërarchisch geordend en het systeem gebruikt deze ordening om de probleemruimte zo snel mogelijk in te perken [110, 111]. Afb. 5.2 laat deze ordening zien. PDS leidt diagnoses en bijbehorende handelingen af door voorwaarts te redeneren vanuit gemeten signalen.



Afb. 5.2 Hiërarchische ordening bij CATS-1 [111].

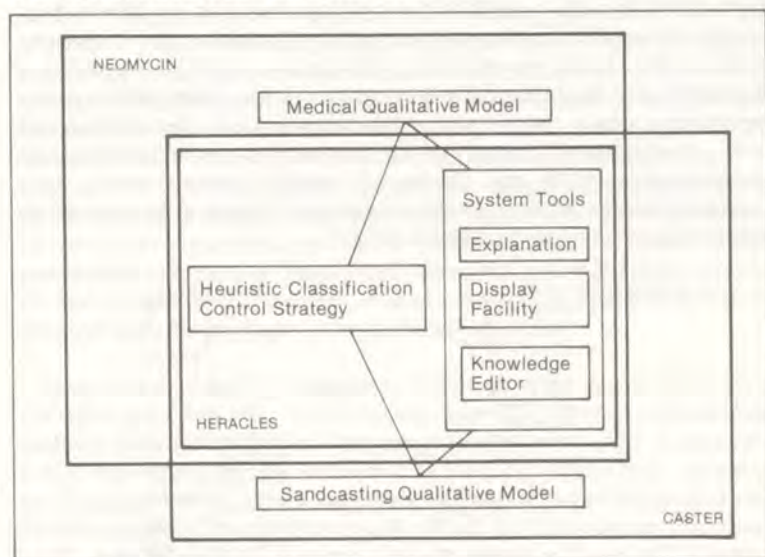
Ook het kennissysteem EXTRA van Electricité de France is gebaseerd op regels. In tegenstelling tot CATS-1 en PDS redeneert het systeem echter niet met onzekerheden. Men voert namelijk het bezwaar aan dat de voortplanting van onzekerheden in inferentieketens kan resulteren in onverklaarbare eindconclusies. Als alternatief tracht



men het kennisbestand zodanig te verfijnen dat slechts zekere en samenhangende regels overblijven. Men heeft voor dit doel een hulpsysteem ontwikkeld [119].

### Redeneren met verschillende typen van kennis

Het medische kennisstelsel NEOMYCIN heeft model gestaan voor een leeg en domein-onafhankelijk kennisstelsel (HERACLES), dat bestemd is voor de ontwikkeling van diagnosesystemen die met verschillende typen kennis redeneren. Met dit lege kennisstelsel is een prototype (CASTER) ontwikkeld dat diagnoses kan stellen op het gebied van zandvormgieten [122]. Afb. 5.3 laat de relatie tussen HERACLES, NEOMYCIN en CASTER zien.



Afb. 5.3 Relatie tussen HERACLES, NEOMYCIN en CASTER [122].

De diagnose wordt bij HERACLES gestuurd door 75 metaregels die in 40 diagnosetaken zijn gegroepeerd. Het verfijnen van een hypothese over de diagnose is een van de taken. Een andere taak is het zoeken naar gegevens om tussen hypothesen te kunnen kiezen. CASTER redeneert met causale en taxonomische relaties tussen mogelijke afwijkingen in het gietproces.

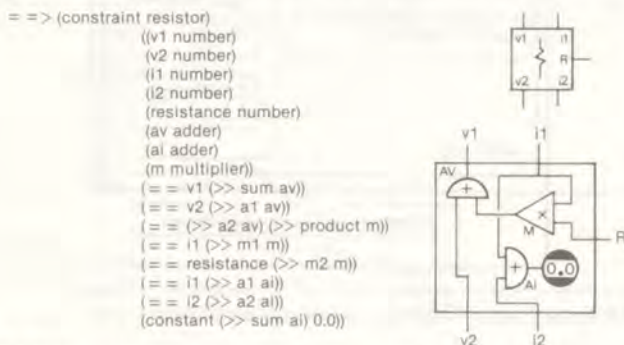
Ook REACTOR is een hybride kennisstelsel [121]. Het heeft als doel operators te ondersteunen bij storingen aan het koelwatersysteem van kernreactoren. Voor veel voorkomende storingen leidt het systeem de vereiste maatregelen af met produktieregels. Gaat het echter om

storingen waarmee men weinig of geen ervaring heeft, dan maakt REACTOR gebruik van kennis over de structuur van het koelwatersysteem.

### Diagnose en simulatie

Bij CASTER en REACTOR wordt diepe kennis gerepresenteerd in de vorm van toestanden en hun onderlinge relaties. Kennissystemen zijn echter flexibeler als zij toestanden kunnen afleiden uit modellen beschreven in termen van componenten en hun eigenschappen. Er zijn daarom experimentele kennissystemen ontwikkeld die het gedrag van processen kunnen simuleren en over dit gedrag kunnen redeneren.

In de jaren zeventig ontwikkelden onderzoekers aan het Massachusetts Institute of Technology CONSTRAINTS, een taal voor de representatie van het gedrag van elektrische schakelingen [123]. De primitieve elementen van modellen die met CONSTRAINTS worden gebouwd, zijn operatoren, zoals optellers en vermenigvuldigers. Het gedrag van deze operatoren is vastgelegd in produktieregels. Modellen van componenten, zoals een weerstand, worden geconstrueerd door operatoren op de juiste wijze in frames vast te leggen. Afb. 5.4 geeft de representatie van een weerstand weer.



Afb. 5.4 Representatie van een weerstand [123].

Met de componenten kan men vervolgens modellen van schakelingen bouwen. Het gedrag van een schakeling wordt afgeleid door 'constraint-propagation'. Bij deze methode fungeert iedere operator als een onafhankelijke informatieverwerker. Het gedrag van het systeem wordt bepaald doordat iedere operator ontvangen informatie bewerkt en de resultaten doorstuurt naar de aangesloten operator(en).

Uit het voorgaande blijkt dat met CONSTRAINTS hiërarchische modellen kunnen worden gebouwd. Bij de analyse van het gedrag kan van



deze hiërarchie gebruik worden gemaakt. Zo is een systeem ontwikkeld dat schakelingen uit verschillende gezichtspunten analyseert aan de hand van equivalente schakelingen [123, 124].

De in CONSTRAINTS gebruikte methode is ook toegepast bij de 'electronics expert' van het in par. 5.2 genoemde SOPHIE III-systeem.

Davis beschrijft een systeem dat bij het diagnostiseren van storingen gebruik maakt van simulatie van digitale schakelingen [125]. Diagnose vindt eerst plaats op het functionele niveau van numerieke bewerkingen. Door interactie van simulatie (uitgaande van de invoergegevens) en inferentie (uitgaande van waargenomen uitvoergegevens) worden de componenten (bijv. optellers of vermenigvuldigers) gezocht die als oorzaak van de storing in aanmerking komen. Bij verdere diagnose wordt niet alleen rekening gehouden met het logische en elektronische gedrag, maar ook met fysische interacties zoals overspraak en warmteoverdracht tussen elektronische componenten. Om alle aspecten te kunnen overzien, houdt het systeem behalve met de elektronische verbinding tussen componenten ook rekening met de nabijheid van componenten in ruimtelijke zin.

Om tot een zinvolle inperking van het aantal mogelijke defecte componenten te komen, wordt met vuistregels een selectie gemaakt. Hiertoe zijn potentiële oorzaken ondergebracht in hiërarchisch geordende categorieën. Eerst wordt de meest waarschijnlijke categorie beschouwd. Blijkt deze niet in aanmerking te komen, dan wordt de oorzaak gezocht bij lager geordende categorieën.

Herbert betoogt dat bij systemen voor de bewaking van elektriciteitscentrales aspecten naar voren komen waarin de hiervoor genoemde methoden en systemen niet voorzien [126]. Als belangrijkste aspecten noemt hij het gedrag van variabelen in twee richtingen (bijv. warmte- en vloeistofstroming), regeling door terugkoppeling en het gedrag van sensoren. Bij de Central Electric Research Laboratories in Engeland heeft men een door 'constraint-propagation' redenerend systeem ontwikkeld voor de diagnose van storingen in elektriciteitscentrales waarbij wel met deze aspecten rekening is gehouden.

### **Kwalitatieve fysica**

Er wordt ook geëxperimenteerd met kennissystemen die alleen kwalitatief over processen redeneren. De technieken die hierbij worden gebruikt, behoren tot het gebied van de 'kwalitatieve' of 'naïeve' fysica. De wetenschappelijke toepassing van dit aspect van kennistechniek is de simulatie van het menselijke denken over fysische processen in het dagelijks leven. Technisch kunnen de methoden interessant zijn om het gedrag van processen zo goed

mogelijk te verklaren of te voorspellen als betrouwbare numerieke gegevens ontbreken.

De kwalitatieve fysica beschrijft processen door positie en verandering in de tijd van variabelen ten opzichte van één of meer constanten. Tabel 5.1 geeft kwalitatieve waarden weer in de notatie van DeKleer, één van de bekendste onderzoekers op dit gebied.

Tabel 5.1 Kwalitatieve waarden bij DeKleer [124].

kwalitatieve waarden	betekenis
$ X _a = +$	$X > a$
$ X _a = -$	$X < a$
$ X _a = 0$	$X = a$
$\delta n_x = +$	$d^n X / dT^n > 0$
$\delta n_x = -$	$d^n X / dT^n < 0$
$\delta n_x = 0$	$d^n X / dT^n = 0$

DeKleer experimenteert met kennissystemen die het gedrag van een model afleiden uit het gedrag van de componenten. Het gedrag van deze componenten is vastgelegd in 'confluences', die men zou kunnen omschrijven als kwalitatieve differentiaalvergelijkingen.

Kwalitatief gedrag kan niet altijd eenduidig worden beschreven. Dit gebeurt bijvoorbeeld als de vergelijking  $|X|_a + |Y|_a = |Z|_a$  in het model zit. De somming is immers onbepaald als  $|X|_a$  positief en  $|Y|_a$  negatief is. Met kwalitatieve modellen kunnen dus slechts mogelijke gedragingen van een model worden voorspeld. De wijze waarop dit gebeurt, wordt in het algemeen aangeduid als 'envisionment' en is een kwalitatieve uitvoering van de eerder genoemde 'constraint propagation'. De kwalitatieve fysica van DeKleer is vastgelegd in een kennissysteem ENVISION dat op willekeurige gebieden kan worden toegepast. Succesvolle experimenten vonden plaats in de elektronica, de hydraulica en de akoestiek [124].

Een andere benadering die in de belangstelling staat, is de kwalitatieve procestheorie van Forbus. Voor een beschrijving van deze theorie wordt verwezen naar [127, 128].

De kwalitatieve fysica is nog onvoldoende ontwikkeld om toe te passen in kennissystemen voor diagnose, onderhoud en bewaking van complexe industriële processen. Drie belangrijke problemen zijn in onderzoek:

- Kwalitatieve fysica kan bij complexe modellen leiden tot een combinatorische explosie van mogelijke gedragingen waardoor inzicht in de processen eerder af- dan toeneemt.



- Om de samenhang van het model te handhaven, moet een inferentiemechanisme de toestand van alle variabelen op ieder moment vaststellen; dit kost veel rekentijd, waarvan een groot deel wordt besteed aan toestanden die voor een specifiek probleem niet relevant zijn.
- In de meeste theorieën is tijd slechts een impliciete factor, zodat geen toepassing mogelijk is in modellen met tussentijds veranderende, externe invloeden.

Er wordt op een aantal plaatsen onderzoek verricht naar doelmatiger methoden.

Eenzijds onderzoekt men effectieve methoden om expliciet met tijdsfactoren te redeneren [129]. Anderszijds wordt geëxperimenteerd met overgangen tussen de hiervoor beschreven driewaardige modellen en volledig mathematische modellen.

Raiman beschrijft bijvoorbeeld een methode waarbij ook de relatieve grootte van variabelen in het inferentieproces betrokken wordt [130]. Caloud beschrijft een experimenteel systeem voor procesbewaking dat redeneert met regels waarin de relaties tussen signalen – zoals vertraging, versterking en reactietijd – zijn vastgelegd. Het redeneren heeft kwantitatieve en kwalitatieve aspecten. Caloud omschrijft de relatie van zijn methode tot kwalitatieve fysica als de relatie van regeltheorie tot gewone fysica [131].

### 5.3 Automatische procesbesturing

Veel technische systemen worden ten dele of volledig automatisch bestuurd. Deze systemen beschikken over regelaars, apparaten die stuursignalen afleiden uit verschillen tussen gewenst en gemeten gedrag van procesvariabelen. In de klassieke meet- en regeltechniek wordt met een terugkoppelstructuur gewerkt, waarbij de regelaar het verschil tussen ingestelde en gemeten waarde volgens een vast wiskundig algoritme omzet in een correctiesignaal voor het te regelen proces.

De kennistechniek kan de klassieke techniek globaal op twee manieren aanvullen. In de eerste plaats kan zij bijdragen aan de verwezenlijking van adapterende regelaars. In de tweede plaats kan men met kennistechniek regelmethoden verwezenlijken die zijn gebaseerd op de kennis van operators. Deze regelmethoden maken automatische regeling mogelijk bij processen waar wiskundige regelalgoritmen tekort schieten.

Adapterende regelaars kunnen zelf bepalen wanneer en hoe een regelalgoritme aan veranderende procesparameters moet worden aangepast. Kennissystemen kunnen in dergelijke regelaars dienen als 'opzichters' die voor de juiste instelling van het algoritme verantwoordelijk zijn.

EXACT is een bekend voorbeeld van regelaars met een kennissysteem als sturende component. In het kennissysteem is de kennis van ervaren meet- en regeltechnici vastgelegd in de vorm van produktieregels [132, 133, 134]. EXACT houdt het proces continu in de gaten, toetst het regelalgoritme bij iedere waargenomen storing en past het algoritme desgewenst aan. Met deze adapterende regelaar wordt de regeling van een proces vaker getoetst dan bij niet-adapterende regelaars. Bij deze laatste toetst men slechts periodiek en wel door het proces doelbewust te verstoren. EXACT is ontwikkeld door het Amerikaanse bedrijf Foxboro. Volgens een deskundige van dit bedrijf leiden de mogelijkheden van EXACT tot minder behoefte aan ervaren meet- en regelexperts. Bovendien zou blijken dat het systeem in vergelijkbare situaties beter regelt dan met de hand bijgestelde, niet-adapterende systemen [135].

In Nederland onderzoekt de Faculteit der Elektrotechniek van de Technische Universiteit Delft de toepassing van kennistechniek voor adapterende regelaars [136]. Voor andere voorbeelden wordt verwezen naar [137, 138, 139].

Sinds de tweede helft van de jaren zeventig is een aantal succesvolle regelaars ontwikkeld die niet op wiskundige algoritmen, maar op heuristische kennis van operators zijn gebaseerd. Deze heuristische regelaars zijn toegepast op processen waar de klassieke regeltechniek ontoereikend bleek.

Haspel en Taunton beschrijven een heuristisch kennissysteem voor de regeling van voeding en energietoevoer bij roterende kalkovens. In dit systeem is een verbaal model vastgelegd van de wijze waarop de meest ervaren operators de regeling uitvoeren [140]. Volgens de schrijvers is in vele gevallen gebleken dat met de regelaar een beter produkt werd verkregen dan wanneer met de hand werd geregeld. Men is van plan het systeem voor het einde van 1988 in acht ovens toe te passen.

Operators redeneren vaak met onzekerheid over de waarden van variabelen. In de regels van de heuristische regelaars worden waarden daarom vooral kwalitatief uitgedrukt. Het door Haspel en Taunton beschreven systeem maakt gebruik van regels als:

If BZT is HIGH then MEDIUM REDUCTION to fuel

If BZT is NORMAL then NO CHANGE to fuel

If BZT is LOW then MEDIUM INCREASE to fuel

In deze regels betekent BZT 'burning zone temperature'.

De in de waarden besloten onzekerheid wordt gerepresenteerd en verwerkt volgens de functies en regels van de in par. 3.4 beschreven vage logica. Dit is gebruikelijk bij heuristische regelaars en in de Engelstalige literatuur wordt daarom vaak gesproken van 'fuzzy controllers'.



Ook op het gebied van vage regelaars wordt in Delft door de Faculteit der Elektrotechniek onderzoek gedaan [141, 142]. Toepassingen en onderzoek in het buitenland zijn beschreven in [143, 144, 145, 146].

Procesbesturing moet onvertraagd verlopen. Dit houdt in dat regelaars voldoende snel moeten zijn om in een operationeel productieproces te kunnen worden toegepast. In de functie van opzichter bij adapterende regelaars blijken kennissystemen in dit opzicht te voldoen. Bij de directe regeling van processen kan de vereiste snelheid een breekpunt zijn.

Het HEXCON-systeem maakt gebruik van een speciale redeneerstrategie ('progressive reasoning') waarmee uit vier niveaus van redeneren kan worden gekozen [147]. Op het laagste niveau kan HEXCON het snelst redeneren, maar de kwaliteit van de resultaten is dan het minst. Naar de hogere niveaus toe neemt de snelheid af en de kwaliteit toe. Het systeem redeneert eerst op het laagste niveau. Als er nog tijd is, gaat het systeem naar een hoger niveau, anders wordt de mindere oplossing op het voorgaande niveau toegepast.

In het EXPERT 5-systeem wordt snelheid nagestreefd door gedistribueerde regeling [148]. Het systeem splitst problemen in deelproblemen, die aan specifieke processoren worden toegewezen. De hoofdmicroprocessor dient als koppeling en bepaalt de toewijzing.

Een derde methode om voldoende snelheid te krijgen, is het gebruik van microprocessoren met een op snelle verwerking gerichte architectuur. Het PICON-systeem is op deze methode gebaseerd [149]. Het werd in 1984 door LMI voor Texaco ontwikkeld en daarna op de markt gebracht als leeg kennissysteem voor onvertraagde procesbesturing. Het draait op een LMI Lambda/Plus LISP-machine die is uitgebreid met een 68010 microprocessor, die speciaal wordt gebruikt voor de procesbesturing. Togai en Watanabe van AT&T Bell beschrijven de invoering van een snel, op vage logica gebaseerd inferentiemechanisme op een VLSI-chip [150].

## 5.4 Robots

Met het streven naar verdere automatisering en toenemende flexibiliteit ontstaat in de industrie behoefte aan robots die complexe taken kunnen uitvoeren. Naar verwachting zal kennistechniek een belangrijke rol spelen bij de verwezenlijking van de complexe computerprogramma's die voor de besturing van deze robots nodig zijn.

In deze paragraaf zal de betekenis van kennistechniek worden verkend uit een aantal gezichtspunten. Achtereenvolgens zijn dat robotprogrammering, doelgerichte hiërarchische besturing, beeldherkenning, taakplanning, planning en zoeken van bewegingspaden, grijpen van objecten en fijnbeweging.

### Robotprogrammering

De hoeveelheid bewegingen die een robot moet maken, neemt snel toe met de complexiteit van zijn taak. Het programmeren van iedere rotatie van alle robotscharnieren zal bij complexe taken zeer veel tijd kosten. Automatisering van het programmeren is daarom een belangrijk gebied van onderzoek. Men streeft naar de ontwikkeling van talen die opdrachten op hoog niveau, via specifiekere instructies op lagere niveaus, omzetten in stuursignalen voor de robotmotoren. Een ander aspect van de ontwikkeling van 'hogere' talen voor robotprogrammering is dat de in te voeren instructies beter aansluiten bij de taal van operators, zodat deze minder kennis van informatica nodig hebben en minder vaak een beroep op gespecialiseerde programmeurs hoeven doen.

Gini onderscheidt vier niveaus van programmeren [151]. Op het laagste niveau wordt de robottaak beschreven door directe instructies voor de aandrijving van robotmotoren. Door deze instructies worden de bewegingen van de scharnieren vastgelegd en men spreekt dan ook van programmeren op scharnierniveau. Een groot aantal industriële robots wordt op dit niveau geprogrammeerd. Op het volgende niveau (het manipulatorenniveau) worden de gewenste posities en bewegingen van manipulators beschreven in cartesische coördinaten. Ook dit niveau van programmeren wordt in de praktijk toegepast. Als voorbeeld kan het programmeren van de UNIMATION-robot in de taal VAL worden genoemd.

Bij de eerste twee niveaus worden de te manipuleren objecten nog niet expliciet in de programma's vastgelegd. Dit is wel het geval bij het derde niveau, het objectniveau. Hier kan de operator instructies specificeren in termen van objecten die de robot moet oppakken. Objecten worden in de vorm van frames en handelingen in de vorm van productieregels gerepresenteerd. De oudste en primitiefste voorbeelden van talen op dit niveau zijn AL, LM en SRL [152, 153, 154]. Recentere en meer geavanceerde systemen zijn RAPT, AUTOPASS, KARMA en LAMA. RAPT is een ontwikkeling waarmee onderzoekers van Edinburgh University experimenteren [155]. AUTOPASS, KARMA en LAMA zijn experimentele programma's van resp. IBM, het Massachusetts Institute of Technology en de universiteit van Californië [156, 157].

De laatste stap in de ontwikkeling van robotprogramma's is de ontwikkeling van programmatuur waarmee de operator slechts taakomschrijvingen hoeft in te voeren. Gini spreekt van talen op taakniveau. De wijze waarop taken worden uitgevoerd, wordt door het programma zelf bepaald. Het onderzoek naar robotsystemen die op dit niveau programmeerbaar zijn, heeft nog niet geleid tot



werkende systemen. Vooruitgang op dit niveau zal in sterke mate afhangen van de voortgang op het gebied van de kennistechniek. Het belangrijkste aspect hierbij is de verwezenlijking van doelmatige technieken voor de integratie van en aanpassing aan onverwachte situaties. Afb. 5.5 geeft een overzicht.

taakniveau	'screw the interlock and the bracket together'
objectniveau	'pick up bracket'
manipulatorniveau	'move to bracket and grasp'
scharnierniveau	'drive joint-1 by 8'

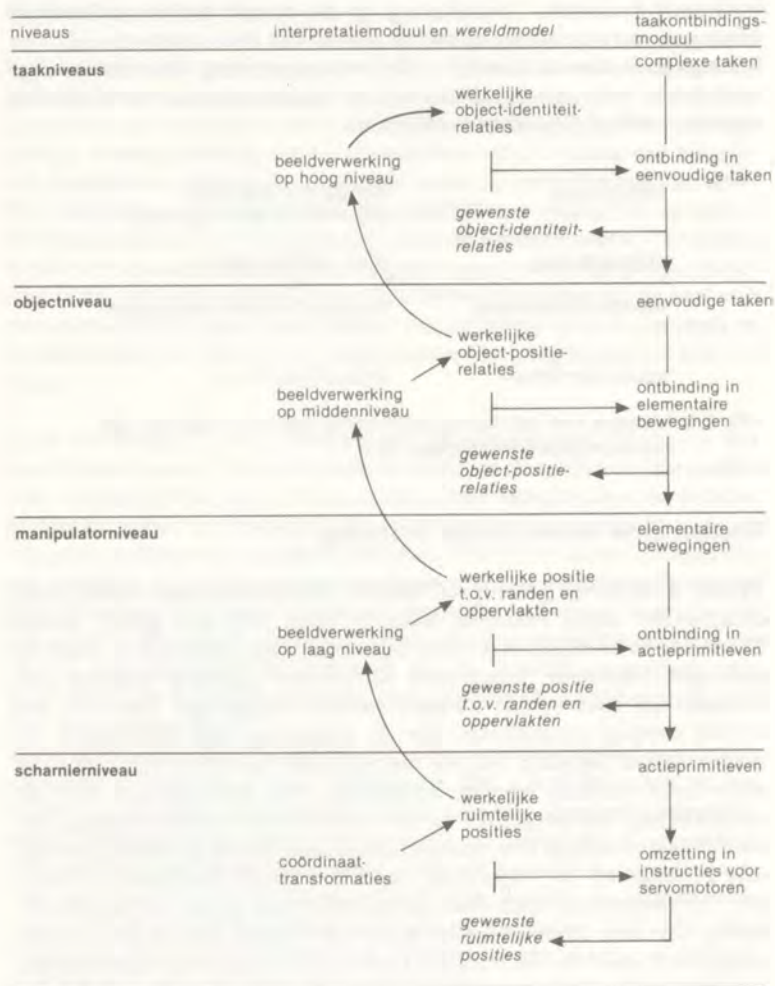
Afb. 5.5 Niveaus van robotprogrammering met voorbeelden van karakteristieke instructies [151].

### Doelgerichte hiërarchische besturing

Eerder werd reeds gesteld dat men bij het streven naar robots voor complexere taken rekening moet houden met een groter aantal handelingen en situaties. Omdat bij complexere taken ook de kans op storingen toeneemt, moet men bovendien rekening houden met situaties die niet vooraf kunnen worden vastgelegd. Men zal dus robots moeten ontwikkelen die de omzetting van opdrachten op taakniveau in signalen voor de mechanische besturing zelf tijdig aan wisselende situaties kunnen aanpassen. Als uitgangspunt voor de ontwikkeling van dergelijke robots wordt in een aantal projecten het model van systemen met doelgerichte hiërarchisch geordende besturing gehanteerd. In Nederland wordt het model toegepast in het in par. 4.2 beschreven Spin-Flair-project dat moet leiden tot de ontwikkeling van een assemblagecel met twee robots. Het project wordt uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft. Als buitenlandse voorbeelden kunnen projecten van het Amerikaanse National Bureau of Standards [158, 159] en het Fraunhofer Instituut van de Universiteit van Karlsruhe worden genoemd [160].

De ordening van besturingsniveaus is analoog aan de eerder beschreven ordening van programmeerniveaus. Op ieder niveau bevinden zich besturingseenheden die bestaan uit een taakontbindingsmoduul, een interpretatiemoduul en een wereldmodel. Afb. 5.6 laat een hiërarchie van besturingsniveaus zien.

Binnen iedere besturingseenheid speelt zich het volgende proces af. Iedere taakontbindingsmoduul ontvangt van een bovenliggende



Afb. 5.6 Niveaus van robotbesturing.

besturingseenheid een taak en verdeelt deze in deeltaken. De taakontbinding is een functie van het verschil tussen de gewenste en werkelijke toestand waarin de robot zich bevindt.

De interpretatiemodul is verantwoordelijk voor het bepalen van de verschillen tussen gewenste en werkelijke toestanden. De werkelijke toestand wordt afgeleid uit informatie van besturingseenheden op het onderliggende niveau. De gewenste toestand wordt door de taakont-



bindingsmoduul na iedere taakontbinding vastgelegd in het wereldmodel.

Verschil in niveau gaat samen met verschil in informatie, kennisrepresentatie en informatieverwerking. Onder het manipulatorniveau is er sprake van snelle numerieke regelaars en is kennistechniek van mindere betekenis. Van het manipulatorniveau af neemt de betekenis van kennistechniek toe naarmate de robot complexere taken zal uitvoeren. In de interpretatiemoduul wordt kennistechniek vooral toegepast bij beeldherkenning. In de taakontbindingsmoduul gaat het vooral om de planning van handelingen. In de vervolg van deze paragraaf worden beide gebieden nader verkend.

### Beeldherkenning

Bij de huidige industriële robots beperkt de interpretatie zich tot de identificatie van enkelvoudige objecten. Herkenning van een enkelvoudig object komt tot stand als een uit signalen afgeleide afbeelding voldoende overeenkomt met een in het computergeheugen opgeslagen referentiemodel. Toekomstige robots voor complexere taken vereisen herkenning van situaties die door meer dan één object worden bepaald. In de meest complexe toepassingen is interpretatie van veranderende situaties nodig om doelgericht en doelmatig te handelen.

Beelden kunnen op meer dan één manier worden vastgelegd in het computergeheugen. Ballard onderscheidt de volgende vier representatieniveaus naar toenemende mate van beeldbewerking [161].

1. *Primaire representatie*. Op dit niveau worden van objecten alleen fysische kenmerken afgebeeld. Dit gebeurt op een aantal manieren. Bij digitale afbeeldingen wordt het beeld in eerste instantie vastgelegd in vlakjes met discrete kleuren, bijvoorbeeld als een geheel van rechthoekjes met specifieke grijswaarden. Deze vlakjes worden aangeduid als 'pixels'. Verdere bewerking leidt tot beelden waarbij bepaalde aspecten zich beter onderscheiden van de achtergrond. Beelden kunnen bijvoorbeeld zodanig worden bewerkt dat slechts discontinue overgangen in grijswaarden worden afgebeeld. In Engelstalige literatuur noemt men dit proces 'edge finding'. Als objecten uit meer dan één positie worden waargenomen, kunnen vlakken worden gerepresenteerd door hun positie in een driedimensionale ruimte. Er zijn ook technieken ontwikkeld om informatie over bewegende objecten vast te leggen.
2. *Gesegmenteerde representatie*. Op dit niveau worden karakteristieke segmenten van beelden zichtbaar gemaakt. Uit naburige kanten met overeenkomstige richting kunnen afgrenzingen worden afgeleid. Een andere techniek is het samenvoegen van naburige en

overeenkomstige pixels tot 'gebieden'. Er bestaan ook technieken om gebieden met karakteristieke oppervlaktestructuren te onderscheiden. Tenslotte kunnen segmenten worden afgeleid uit de analyse van bewegende beelden.

3. *Geometrische representatie*. Op dit niveau worden objecten beschreven door twee- of driedimensionale geometrische modellen.
4. *Symbolische representatie*. Op dit niveau zijn objecten benoemd en – eventueel – met hun onderlinge relaties vastgelegd in semantische netwerken of frames.

Beeldherkenning kan in twee richtingen verlopen, opwaarts ('bottom-up') en neerwaarts ('top-down'). In het eerste geval ontwikkelt het beeldherkenningssysteem afbeeldingen op steeds hogere representatieniveaus totdat het niveau is bereikt waarop het ontwikkelde beeld kan worden vergeleken met een referentiemodel. In het tweede geval dient een referentiemodel als uitgangspunt en worden representaties van dit model op lagere niveaus afgeleid totdat deze op lager niveau met het opgenomen beeld kunnen worden vergeleken.

Voor herkenning van een beperkt aantal objecten in situaties waar betrouwbare en ondubbelzinnige opnamen kunnen worden verwezenlijkt, is een opwaartse strategie – vastgelegd in domein-onafhankelijke procedures – toereikend.

In complexe situaties vereist beeldherkenning herhaalde ontwikkeling en toetsing van hypothesen over de aard van een beeld, waarbij stap voor stap de interpretatie wordt verfijnd. Een dergelijke strategie is nodig als objecten onvolledig zichtbaar zijn of als het gaat om de herkenning van een door vele objecten gekenmerkte situatie. Om complexe situaties op bevredigende wijze te interpreteren, moet een herkenningssysteem van verschillende perspectieven uit over mogelijke situaties redeneren. Een ander aspect van herkenning op hoog niveau behelst de sturing van sensoren of de beeldbewerking op lagere niveaus om de meest relevante informatie te verkrijgen. Als situaties sterk wisselen en onvertraagde beslissingen nodig zijn – zoals in een werkplaats – worden bovendien hoge eisen gesteld aan de snelheid van interpretatie.

Afb. 5.7 geeft representatieniveaus weer van een systeem dat tweedimensionale beelden – zoals een punttang en een verloopstekker – kan herkennen. Beeld A laat de primaire representatie door grijswaarden zien. Beeld B geeft het resultaat van segmentatie weer. Na de segmentatie stelt het systeem door connectiviteitsanalyse – een methode waarop hier niet verder wordt ingegaan – vast dat het gaat om twee afzonderlijke objecten. Vervolgens worden van ieder object de waarden van karakteristieke geometrische parameters berekend. Het resultaat van deze berekening is in C weergegeven. Het



symbolisch niveau in dit systeem beperkt zich tot de namen van objecten die het systeem kan herkennen. De objectnamen zijn samen met de bijbehorende geometrische referentiemodellen in het kennisbestand vastgelegd. Herkenning komt tot stand als het systeem de geometrische modellen van het waargenomen object vergelijkt met de referentiemodellen. Een waargenomen object wordt benoemd als met reken- en classificatieregels wordt vastgesteld dat verschillen in geometrische waarden binnen bepaalde grenzen blijven.

A. PRIMAIRE REPRESENTATIE



B. GESEGMENTEERDE REPRESENTATIE



C. GEOMETRISCHE REPRESENTATIE

## object 1

symmetrie	nee
cirkel	nee
aantal gaten	0
oppervlakte	637
omtrek	445
excentriciteit	220
traagheidsmoment	345

## object 2

symmetrie	nee
cirkel	nee
aantal gaten	0
oppervlakte	638
omtrek	145
excentriciteit	18
traagheidsmoment	51

D. SYMBOLISCHE REPRESENTATIE met referentiemodellen

## punttang

symmetrie	nee
cirkel	nee
aantal gaten	0
oppervlakte	660
omtrek	451
excentriciteit	222
traagheidsmoment	341

## verloopstekker

symmetrie	nee
cirkel	nee
aantal gaten	0
oppervlakte	640
omtrek	149
excentriciteit	17
traagheidsmoment	50

Afb. 5.7 Representatie van beelden op verschillende niveaus [300].

Hoe ver is men met de ontwikkeling en de industriële toepassing van beeldherkenning en welke betekenis heeft kennistechniek daarvoor? In het begin van deze paragraaf werd reeds aangegeven dat er commerciële robots bestaan met deelsystemen voor interpretatie. Dit geldt bijvoorbeeld voor robots van de merken ATOMIX, MIC en UNIMATION. Beeldherkenning bij deze systemen geschiedt op geome-

trisch niveau en is beperkt tot tweedimensionale afbeeldingen. Bij de ontwikkeling van bruikbare systemen voor herkenning van driedimensionale objecten liggen er problemen bij de integratie van beeldherkenning en CAD-systemen. Het ontbreekt bijvoorbeeld aan een bevredigende methode voor het opslaan en terugzoeken van driedimensionale beelden in bestanden [162]. Een ander probleem is dat er nog geen goede methode bestaat om signalen van meer dan één sensor te integreren. De huidige methoden zijn bijvoorbeeld nog niet goed in staat effectief om te gaan met strijdigheid tussen signalen van verschillende sensoren.

Kennistechniek is reeds toegepast bij beeldverwerking op segmentatieniveau. Nazif en Levine beschrijven een kennissysteem dat dient om de segmentatie te sturen [163, 164]. Heuristische kennis is vastgelegd in produktieregels, zoals 'IF the region is bimodal THEN split the region according to the histogram'.

Rembold beschrijft twee systemen die langs heuristische weg platte onderdelen identificeren [165]. In één geval gaat het om een systeem dat onderdelen identificeert die deels zijn afgedekt. Het tweede systeem bepaalt, behalve de identiteit, ook de oriëntatie en de positie. Met de ontwikkeling van ACRONYM is een van de eerste stappen gezet naar systemen die bij beeldherkenning redeneren op symbolisch niveau [166]. Het systeem is er onder andere in geslaagd technische voorwerpen zoals motoren te herkennen. ACRONYM beschikt over ruimtelijke kennis in de vorm van driedimensionale objectmodellen die hiërarchisch zijn opgebouwd uit elementaire vormen zoals cilinders, prisma's en helixen. De kennis is zodanig hiërarchisch geordend dat objecten herhaald onderverdeeld zijn in specifiekere objecten. Objecttypen zijn ook geordend volgens numerieke karakteristieken. Een type motor kan bijvoorbeeld gekenmerkt zijn door een minimaal en een maximaal aantal flenzen of door het ontbreken van flenzen en de aanwezigheid van een bodemplaat. Ook afmetingen zijn een indelingsfactor. De modelkennis is vastgelegd in frames.

Herkenning komt tot stand na een interactief proces waarbij het stellen en toetsen van hypothesen over de aard van een waarneming elkaar afwisselen. Bij iedere volgende waarneming vergelijkt het systeem de waarneming met specifiekere objectmodellen.

De theorieën over beeldherkenning op symbolisch niveau zijn nog onvoldoende uitgewerkt om industriële robots te ontwikkelen die veranderende situaties in hun omgeving kunnen interpreteren [165]. Afgezien van theoretische voortgang, zal ook speciale apparatuur moeten worden ontwikkeld om voldoende snelheid te garanderen.



## Taakplanning

Adapterend gedrag kan in produktieregels en vergelijkbare representatievormen worden vastgelegd. Iedere regel geeft de deeltaak weer die hoort bij een bepaalde taak en een bepaalde terugkoppeling. Albus beschrijft hoe op manipulatoniveau robothandelingen worden geprogrammeerd met 'toestandstabellen'. Afb. 5.8 laat een gedeelte van een toestandstabel zien waarin de taak 'fetch(x)' afhankelijk van de terugkoppeling wordt ontbonden. Men zou de tabel ook in de vorm van produktieregels kunnen representeren. De tweede rij in de tabel zou bijvoorbeeld ook kunnen worden weergegeven door de regel 'IF fetch(x) AND state = 1 AND dist(x) = ? THEN searchfor(x) AND nextstate = 1'.

Instructie	Terugkoppeling over de toestand	Uitvoer	Volgende toestand
FETCH(X)	0 —	SEARCH FOR(X)	1
FETCH(X)	1 Dist(X) = ?	SEARCH FOR(X)	1
FETCH(X)	1 Search fail	STOP	0
		REPORT FETCH-FAIL	
FETCH(X)	1 Dist(X) > a	GO TO (POS(X))	1
FETCH(X)	1 Dist(X) ≤ 0	ORIENT ON(X)	2
FETCH(X)	2 Orient(X) > 0	ORIENT ON(X)	2
FETCH(X)	2 Orient(X) ≤ 0	GRASP(X)	3
FETCH(X)	3 Touch < T	GRASP(X)	3
FETCH(X)	3 Touch ≤ T	GO TO JIG(X)	4
FETCH(X)	4 Dist(JIG) > 0	GO TO JIG(X)	4
FETCH(X)	4 Dist(JIG) = 0	INSERT(X)	5
FETCH(X)	5 Force < 0	INSERT(X)	5
FETCH(X)	5 Force > 0, Insert done	RELEASE	6
FETCH(X)	6 Releasing	RELEASE	6
FETCH(X)	6 Release done	STOP	0
		REPORT FETCH-DONE	
FETCH(X)	— Subtask fail	STOP	0
		REPORT FETCH-FAIL	

Afb. 5.8 Gedeelte van een toestandstabel [158].

De volgorde van handelingen in de toestandstabel is door de programmeur vastgelegd. Robots die op taakniveau worden geprogrammeerd voor de uitvoering van complexe taken, zullen zelf de juiste openvolging van deeltaken in een plan moeten vastleggen. Automatische planning van robothandelingen is sinds de jaren zestig een onderdeel van het AI-onderzoek. Een bijzonder aspect van planningsystemen is dat zij rekening moeten houden met veranderin-

gen in de omgeving van de robot die het gevolg zijn van de uit een plan voortkomende handelingen.

In de jaren zestig en zeventig werden reeds planningsystemen gemaakt waarmee werd aangetoond dat logisch handelende robots kunnen worden ontwikkeld. Voor voorbeelden van deze eerste planningsystemen en nadere verkenning van de technieken wordt verwezen naar publikaties van Nilsson, Sacerdoti en Fahlman [167, 168, 169, 170]. In deze systemen zijn individuele handelingen in procedures vastgelegd. Iedere procedure bestaat uit een verzameling 'precondities' en 'postcondities'. In de precondities zijn de voorwaarden vastgelegd waaronder een handeling of taak kan worden uitgevoerd. Effecten van een handeling op een omgeving zijn vastgelegd in de postcondities.

De eerste generatie planningsystemen verricht slechts relatief eenvoudige taken in een zeer eenvoudige kunstmatige wereld. In alle gevallen gaat het om één robot die veranderingen aanbrengt in een overigens statische omgeving. Alle mogelijke situaties waarin de robot kan verkeren, zijn expliciet vastgelegd in de pre- en postcondities van de procedures. Deze methode leidt in de werkelijkheid al gauw tot een combinatorische explosie van procedures. In de industrie zal het bovendien veelal onmogelijk zijn alle mogelijke situaties te voorzien en vast te leggen. Afgezien van de onvoorspelbaarheid, heeft men in de praktijk natuurlijk ook te maken met storingen in de informatie. Op één na is geen van die eerste generatie kennissystemen toegepast in robots, maar werden robothandelingen gesimuleerd. Een uitzondering is STRIPS, dat als besturingssysteem inderdaad de robot Shakey zonder botsingen tussen een aantal obstakels bleek te kunnen sturen [171].

Ook in de jaren tachtig heeft men in de AI-wereld nog geen overtuigende methode gevonden om genoemde beperkingen teniet te doen. Informatie over recent onderzoek is te vinden in [172, 173, 174].

Volgens Gini zijn op kennistechniek gebaseerde planningstechnieken nog lang niet bruikbaar voor de planning van industriële robots op taakniveau. Als alle mogelijke pre- en postcondities zouden kunnen worden vastgelegd, zouden de systemen door de grote hoeveelheid condities die zij bij iedere handeling moeten toetsen, veel te traag worden. De gebruikte kennistechnieken zijn overigens wel bruikbaar in systemen die in staat zijn met de hand geprogrammeerde robothandelingen automatisch aan te passen aan conflictsituaties. Gini beschrijft een systeem waarvan de semantiek is gebaseerd op STRIPS. Het bevat drie typen regels, namelijk instructies voor gewenste handelingen, regels voor interpretatie van signalen en regels voor aanpassing van de gewenste handelingen als de daaruit voortkomende toestand botst met de geïnterpreteerde toestand [151, 175].



Afb. 5.9 laat enige regels zien. In de postcondities zijn sommige veranderingen ('updates') dwingend vastgelegd. Andere veranderingen ('additions' en 'deletions') zijn afhankelijk van de situatie en worden gerepresenteerd door produktieregels.

*Instructie:*

```
Close hand to d
prec.: ClearHand
post.: Upd: HandOpening = d
      IF TouchSensorTriggered
      THEN Add: ObjectHeld;
           ObjectSize = d
           ObjectPickeUpAt = Arm
           Del : ClearHand
```

*Sensorregels:*

```
IF FingerTouchSensorTriggered
THEN ObjectHeld

IF FingerTouchSensorNotTriggered
THEN ClearHand
```

*Herstelregels:*

```
Als de robot een object tijdens het bewegen verliest:
TO obtain ObjectHeld
WHEN ClearHand
DO GrabObject (NextPickUp, ObjectSize)
Als de robohand te sterk gesloten is:
TO obtain HandOpening = ObjectSize
WHEN HandOpening < ObjectSize
DO Open Hand to Size
```

Afb. 5.9 Instructies, interpretatieregels en herstelregels [175].

## Planning en zoeken van bewegingspaden

Er is veel onderzoek gedaan naar automatische planning van de verplaatsing van mobiele robots en robotarmen. Uitgangspunten van dit onderzoek zijn het vinden van het kortste pad en het voorkomen van botsingen.

De meeste systemen zijn gebaseerd op numerieke berekening van de paden. Een bekende naam op dit gebied is Lozano-Perez [176]. Gini geeft een overzicht van andere publikaties [151]. In Nederland wordt op dit gebied onderzoek gedaan door de Faculteiten Natuurkunde en Elektrotechniek van de Technische Universiteit Delft [177, 178].

De numerieke methoden gaan uit van een statische omgeving waarin de configuratie en de posities van de robot en de te manipuleren objecten volledig bekend zijn. Kennistechiek kan een rol spelen als deze informatie ontbreekt. Honderd en De Swaan Aarons beschrijven hoe een robot bij gebrek aan gedetailleerde informatie met heuristi-

sche regels op grond van waarnemingen de weg naar een object kan vinden [179]. Afb. 5.10 laat voorbeelden zien van situaties en beslissingsregels.

Een belangrijk, maar nog weinig onderzocht probleemgebied is de integratie van de planning van bewegingspaden en het symbolisch redeneren over taken [151].

### Grijpen van objecten

Er zijn reeds methoden ontwikkeld om robots zelf te laten bepalen hoe een object waarvan de geometrie bekend is, moet worden aangegrepen. De aangrijping wordt mede bepaald door de uit te voeren taak, de gripper en de door de omgeving opgelegde beperkingen [151].

De huidige methoden houden echter geen rekening met de materiaaleigenschappen van de te hanteren objecten. Als er een behoefte ontstaat aan robots voor het manipuleren van objecten waarbij dit wel het geval is, zal de kennistechniek – en in het bijzonder de in par. 5.2 genoemde kwalitatieve fysica – een belangrijke rol spelen. De robots zullen dan namelijk in staat moeten zijn over de eigenschappen en het gedrag van materialen te redeneren. Industriële behoefte aan robots voor dergelijke taken is overigens nog niet aangetoond.

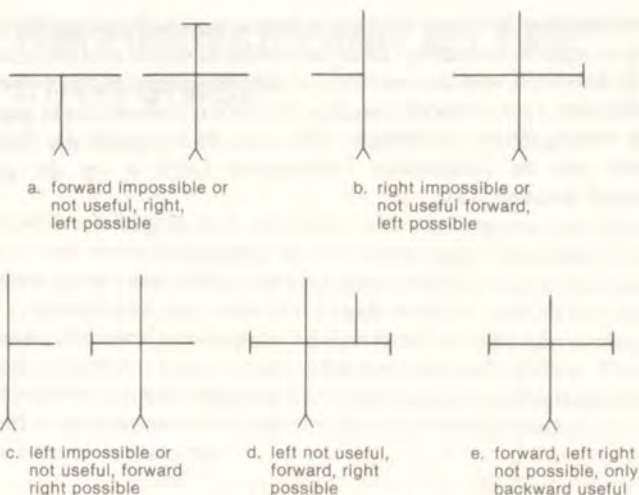
### Fijnbeweging

Van fijnbeweging is sprake als de robot in aanraking komt met objecten in zijn omgeving. Kenmerkend is dat de onderlinge positie van de elkaar rakende delen niet nauwkeurig is vast te leggen en dat krachten bij de besturing een belangrijke rol spelen [151, 180].

Het nauwkeurig monteren van onderdelen is een activiteit waarbij fijnbeweging nodig is. Robots voor montagetaken moeten – evenals een goede monteur – in staat zijn door een juiste combinatie van kracht en positionering objecten op verantwoorde wijze met elkaar te verbinden. De monteur zal dit op het gevoel doen en hierbij gebruik maken van de meegaandheid van de onderdelen. Ook robotsystemen maken bij fijnbeweging gebruik van de meegaandheid. De handelingen worden op grond van terugkoppeling door de signalen van tastsensoren gestuurd.

Whitney onderscheidt discontinue en continue vormen van terugkoppeling door krachten [180]. De discontinue vorm van terugkoppeling – die Whitney als 'logic branching feedback' – omschrijft, is vastgelegd in handelingen die moeten worden verricht bij discrete gebeurtenissen, zoals bijvoorbeeld het ontstaan van een contact. Deze methode werd reeds in de jaren zestig toegepast en vindt zijn voortzetting in huidig onderzoek naar op regels gebaseerde besturingssystemen. Continue terugkoppeling geschiedt met mathematische meet- en



**Rule 3**

- IF
- going right is possible
  - looking right
    - target can be seen
    - junction can be seen right
    - junction can be seen left
- THEN
- right can be useful

**Rule 4**

- IF
- going left is possible
  - looking left
    - target can be seen
    - junction can be seen right
    - junction can be seen left
- THEN
- left can be useful

**Rule 5**

- IF
- going forward is possible
  - looking forward
    - target can be seen
    - junction can be seen right
    - junction can be seen left
- THEN
- forward can be useful

**Rule 13**

- IF
- not returning
  - no loop
- THEN
- investigating forward

**Rule 26**

- IF
- right cannot be useful
  - left cannot be useful
  - forward cannot be useful
- THEN
- return
  - set: returning

**Rule 27**

- IF
- right can be useful
  - left cannot be useful
  - forward cannot be useful
- THEN
- go right

**Rule 28**

- IF
- left can be useful
  - right cannot be useful
  - forward cannot be useful
- THEN
- go left

Afb. 5.10 Situaties en beslissingsregels bij het zoeken naar de juiste weg [179].

regeltechnieken. Volgens Whitney is besturing op de tast achtergebleven bij de visuele besturing. Deze achterstand wordt niet veroorzaakt door de kwaliteit van tastsensoren of reken capaciteit, maar door het achterblijven van de theorievorming. In [180] is een overzicht gegeven van de belangrijkste problemen. Ook aan de Faculteit der Elektrotechniek van de Technische Universiteit Delft is op dit gebied onderzoek gedaan [181].



---

## 6. Kennissystemen en het ontwerpen

Dit hoofdstuk begint met een overzicht van argumenten voor het gebruik van kennissystemen bij het ontwerpen. Vervolgens wordt ingegaan op de toepassing van kennissystemen als ontwerpsystemen. Deze systemen kunnen door hun kennis over het ontwerpen van een categorie objecten ontwerpers adviseren of toetsen die opdrachten moeten uitvoeren waarin deze objecten een rol spelen. Tenslotte wordt beschreven hoe men met kennistechniek de gebruikersvriendelijkheid en de automatische informatie-uitwisseling tussen CAD-systemen tracht te verbeteren.

### 6.1 Waarom kennissystemen?

#### Toenemende complexiteit van het ontwerpen

Het ontwerpen wordt om een aantal redenen complexer. In de eerste plaats wordt om ingewikkelder producten gevraagd. In de tweede plaats verouderen veel producten sneller en worden steeds specifiekere ontwerpeisen gesteld. Om een goede concurrentiepositie te waarborgen, moet dus vaker, gevarieerder en sneller worden ontworpen. De toename in complexiteit komt sterk tot uiting in de micro-elektronica. Het aantal componenten waarmee de ontwerper van geïntegreerde schakelingen (IC's) rekening moet houden, is sterk toegenomen. In het begin van de jaren zeventig bezaten geavanceerde IC's hooguit 5.000 componenten, aan het eind van dat decennium reeds 100.000. Tegenwoordig worden IC's met 500.000 componenten gevraagd en er wordt gewerkt aan IC's met meer dan 10.000.000 componenten. Het ontwerpen van een 32-bit microprocessor vergt de selectie en ordening van 500.000 transistoren, waarbij rekening moet worden gehouden met een groot aantal onderlinge relaties. Het ontwerpen van een dergelijke microprocessor is te vergelijken met het ontwerpen van een plan voor alle straten, gebouwen en brandslangaansluitingen van de stad New York [182].

Eveneens illustratief zijn ontwikkelingen in de vliegtuigbouw. Het ontwerpen van de Spirit of Saint Louis, het vliegtuig waarmee Lindbergh de Atlantische Oceaan overstak, duurde naar schatting 775 uren; het moderne CSA transportvliegtuig kostte ongeveer 49.000.000 ontwerpuren. Men verwacht dat het ontwerpen van toekomstige

vliegtuigen en ruimtevaartuigen de ontwerpinspanning voor de C5A ver zal overtreffen [183].

De toenemende complexiteit en de daarmee samenhangende ontwerpkosten vormen een belangrijk probleem voor de industrie. Dit probleem wordt versterkt door de kortere economische levensduur van veel producten.

Een gevaar van toenemende complexiteit is dat de ontwerper of de ontwerpgroep het overzicht over het ontwerp verliest. Bovendien vergen complexe en omvangrijke ontwerpen multidisciplinaire projecten waarbij veel mensen, soms van verschillende organisaties, betrokken zijn. De hieruit voortkomende communicatieproblemen kunnen aanleiding geven tot misverstanden die de kans op ontwerpfouten verder vergroten [183].

Belangrijk is verder dat toename in complexiteit niet alleen leidt tot een grotere kans op fouten, maar dat ook de gevolgen van deze fouten ernstiger vormen kunnen aannemen. Kernreactoren, chemische installaties en geavanceerde wapensystemen liggen als voorbeelden voor de hand.

### **Meer mogelijkheden voor computerondersteuning**

Al vele jaren tracht men computers te gebruiken als hulpmiddel bij het oplossen van de steeds complexere ontwerpproblemen. Het begrip Computer Aided Design (CAD) heeft grote bekendheid verworven. In enkele vakgebieden, zoals de vliegtuigbouw, is men reeds volledig vertrouwd met het gebruik van de computer bij het ontwerpen. In de micro-elektronica is ontwerpen zonder CAD-systemen onmogelijk. In gebieden zoals de architectuur is de bijdrage van CAD-systemen aan het ontwerpen echter nog zeer beperkt.

De huidige generatie CAD-programma's behoort tot de in hoofdstuk 3 beschreven categorie van procedurele systemen, die alleen geschikt zijn voor goed gestructureerde deelproblemen. Het gaat om reken- en tekenprogramma's. Het gebrek aan compatibiliteit tussen programma's wordt als een groot probleem ervaren. Een ander gebrek van de huidige CAD-systemen is dat doelmatig gebruik zeer veel ervaring vergt. Door toepassing van kennistechniek hoopt men de toepasbaarheid van de computer bij het ontwerpen en de gebruikersvriendelijkheid van CAD-systemen op een aantal manieren te vergroten. Hierna volgt een overzicht.

#### *Ondersteuning bij slecht gestructureerde ontwerpproblemen*

Ontwerpproblemen zijn over het algemeen slecht gestructureerd. Ontwerpdoelen zijn tevoren vaak niet volledig te specificeren. Mede daardoor kan men niet voorzien welke deelproblemen tijdens een



ontwerpproject zullen ontstaan. Vaak zijn deelproblemen sterk onderling afhankelijk en is het onmogelijk in een vroeg stadium met afhankelijkheden rekening te houden. Zoals in hoofdstuk 3 werd beschreven, kunnen kennissystemen hulp bieden bij slecht gestructureerde problemen.

#### *Ondersteuning bij het oplossen van kwalitatieve problemen*

Bij het ontwerpen wordt vaak – en vooral bij het begin van ontwerpprocessen – kwalitatief geredeneerd over vormen, structuren of processen. Uitbreiding van het taakgebied van computers vergt programmatuur waarmee dergelijk redeneren mogelijk is. Kennistechniek biedt hiervoor betere mogelijkheden dan het traditionele procedurele programmeren.

Het feit dat met kennissystemen het ontwerpen in een eerder stadium kan worden ondersteund, is belangrijk omdat het aantal details waarmee de ontwerper rekening moet houden naar het einde toeneemt en het opsporen van een fout moeilijker wordt. Door de kans op fouten vroegtijdig te verkleinen, voorkomt de ontwerper bovendien dat een groot aantal ontwerphandelingen achteraf moet worden herzien. Vooral bij het ontwerpen van complexe geïntegreerde schakelingen zijn dit belangrijke redenen om te experimenteren met ontwerpssystemen voor de beginfasen van het ontwerpproces.

#### *Bevordering van doelmatig en doelgericht ontwerpen*

Er zijn twee manieren denkbaar waarop de computer de ontwerper ondersteunt. De computer kan ontwerpprocedures genereren die als richtlijn voor de ontwerper dienen of ontwerphandelingen toetsen op onderlinge samenhang en samenhang met beperkingen. In beide gevallen moet de computer in sterke mate interactief functioneren, tijdens het ontwerpproces plannen kunnen aanpassen en uitleg kunnen geven over voorgestelde handelingen. Kennissystemen lenen zich hiervoor beter dan algoritmische programma's.

#### *Behoud en overdracht van kennis*

Kennissystemen bieden de mogelijkheid opeenvolgende ontwerpstanden met hun argumentatie en veronderstellingen expliciet vast te leggen. De onderliggende uitlegfaciliteit stelt gebruikers in staat hierover specifieke informatie te krijgen. Hierdoor kunnen kennissystemen een belangrijke rol spelen bij de overdracht van ontwerp-kennis uit verschillende disciplines en bij het behoud van ontwerpervaring. Als geheugensteun kunnen zij bijdragen aan de produktiviteit van ontwerpers en de kwaliteit van ontwerpen. Dit is niet alleen van

betekenis voor de uitvoering, maar ook voor de verwerving van opdrachten, omdat dan de ontwerper bij een inschrijving meer en beter gefundeerde alternatieven kan laten zien.

Als kennissystemen specifieke vragen over verrichte ontwerphandelingen en de bijhorende argumenten voldoende snel beantwoorden, kunnen zij ook van betekenis zijn voor de communicatie tussen ontwerpers onderling en tussen ontwerpers en opdrachtgevers.

#### *Grotere aanpasbaarheid*

Bepaalde ontwerp kennis wordt regelmatig aangepast door de komst van nieuwe technische ontwikkelingen of veranderende mode. Kennissystemen bieden in dit verband voordelen boven conventionele programmatuur omdat wijzigingen eenvoudiger kunnen worden ingevoerd.

#### *Verbetering van de gebruikersvriendelijkheid van CAD-systemen*

Kennissystemen kunnen dienen als intelligente interface voor CAD-gereedschappen. In de eerste plaats in de vorm van systemen voor de verwerking van natuurlijke taal en met interactieve grafische faciliteiten. In de tweede plaats in de vorm van kennissystemen die adviseren over het gebruik van ontwerp gereedschappen en bestanden. In de derde plaats kunnen kennissystemen van betekenis zijn voor de automatische informatie-uitwisseling tussen CAD-systemen.

## 6.2 Ontwerpsystemen

Als ontwerpsysteem voeren kennissystemen diverse ontwerptaken uit. Zij kunnen bijvoorbeeld dienen als ontwerp assistent die routine-taken uitvoert, als specialist die in een specifiek probleemgebied ontwerphandelingen toetst en als geheugensteun of ideeëngenerator. In deze paragraaf worden deze toepassingen en hun stand van zaken verkend aan de hand van aspecten van het ontwerpproces. Aan deze verkenning gaat een korte beschouwing van het ontwerpproces vooraf.

Tabel 6.1 laat omschrijvingen zien van begrippen die hierbij kunnen worden gehanteerd.



Tabel 6.1 Begrippen bij het ontwerpen.

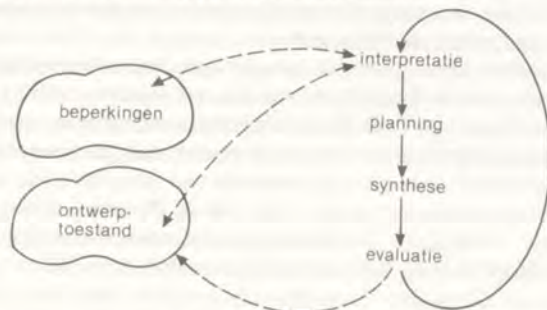
<i>ontwerptoestand:</i>	het geheel van handelingen en/of structuren dat op een bepaald moment tijdens het ontwerpproces is vastgelegd (komt overeen met probleemtoestand in par. 3.3)
<i>ontwerpruimte:</i>	alle mogelijke ontwerptoestanden die met bepaalde ontwerp-kennis kunnen worden verwezenlijkt (komt overeen met probleemruimte in par. 3.3)
<i>beperkingen:</i>	het geheel van functionele eisen, ruimtelijke en fysische beperkingen en voorschriften waardoor de ontwerpruimte wordt ingeperkt; beperkingen worden in de Engelstalige literatuur aangeduid als 'constraints'
<i>ontwerpdoel:</i>	specificatie van beperkingen waarop ontwerp-handelingen/taken zich op een bepaald tijdstip moeten richten

### Kennissystemen en het ontwerpproces

Het ontwerpen kan worden beschouwd als een iteratief proces. Hierbij wordt een cyclus van interpretatie, planning, synthese en evaluatie herhaald tot het ontwerp voldoende verfijnd is om als bouwplan te dienen voor de vervaardiging van het produkt.

In iedere fase van het ontwerpproces wordt de ontwerper geconfronteerd met een nieuwe ontwerptoestand en nieuwe beperkingen. Dit komt deels omdat tijdens het ontwerpproces toenemende detaillering plaatsvindt en deels door onverwachte omstandigheden die zich gedurende het ontwerpproces voordoen en waardoor ontwerpdoelen moeten worden aangepast.

Afb. 6.1 geeft het ontwerpproces schematisch weer.



Afb. 6.1 Cyclus van het ontwerpproces.

Bij de interpretatie ontwikkelt de ontwerper op grond van gegeven en afgeleide feiten een beeld van de ontwerptoestand.

Planning omvat de vaststelling welk gedeelte van de ontwerptoestand en welke beperkingen als uitgangspunt dienen voor volgende ontwerphandelingen, alsmede de ontwikkeling van een ontwerpplan. Dit plan bestaat uit een opeenvolging van ontwerpdoelen. Tijdens de synthese bedenkt de ontwerper in overeenstemming met zijn interpretatie en planning een wijziging van de ontwerptoestand. Hij zal componenten van het ontwerp opnieuw rangschikken, componenten aan het ontwerp toevoegen of het ontwerp verfijnen. Bij de evaluatie wordt de bedachte wijziging getoetst aan de ontwerpdoelen, de overige beperkingen en het overige gedeelte van de ontwerptoestand. Als er geen conflicten zijn, wordt de wijziging uitgevoerd.

### *Interpretatie*

Ontwerpsystemen moeten afhankelijk van hun taakgebied ontwerp-toestanden, beperkingen of beide kunnen interpreteren.

### *Interpretatie van ontwerptoestanden*

Bij de interpretatie van ontwerptoestanden kan men drie niveaus onderscheiden. Op het laagste niveau beperkt het kennissysteem zich tot het zoeken naar een of meer objecten. Interpretatie beperkt zich hier tot herkenning van individuele objecten op grond van hun naam, vorm, eigenschappen of functies. Op een hoger niveau leidt het kennissysteem conclusies over een ontwerptoestand af uit de ruimtelijke en functionele relaties tussen objecten in deze toestand. In dergelijke systemen zijn specifieke configuraties van componenten op een hoger abstractieniveau expliciet beschreven als afzonderlijke componenten. Een configuratie van weerstanden en condensatoren bijvoorbeeld, kan door het systeem worden herkend als een bepaald type schakeling. Er kan een uit vele lagen bestaande hiërarchie van abstractieniveaus ontstaan als samengestelde componenten herhaald worden gegroepeerd en benoemd.

Frames worden zeer geschikt geacht om ontwerptoestanden te representeren. In het 'Intelligent Architect Project' van de Faculteit der Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft gaat men uit van kennisrepresentatie door frames. Men onderzoekt de mogelijkheden van framesystemen voor de representatie van verschillende aspecten van een gebouw, zoals structuren (bijv. vorm, afmetingen, topologie), functies (bijv. werkplaats, badkamer), functionele eisen (bijv. veiligheid, doelmatigheid) en hun onderlinge verbanden [20].

Een andere vorm van representatie die in dit verband wordt toegepast, is gebaseerd op de predicatenlogica [184].

Op het hoogste niveau gaat het om de interpretatie van het gedrag dat de fysieke structuur – waarvan een ontwerptoestand het model is –



zou kunnen vertonen. Het kennissysteem moet op dit niveau kunnen redeneren over met de tijd veranderende ontwerpstoestanden. Dit vereist de integratie van kennis- en simulatietechniek.

Het genereren van numerieke simulatiemodellen door wiskundige of logische functies aan objecten te koppelen, wordt bijvoorbeeld in de micro-elektronica toegepast. In par. 5.2 werden voorbeelden gegeven van toepassing van deze methoden in verband met diagnoses van technische storingen. De integratie van kennistechniek en simulatie werd bovendien besproken in par. 4.4 bij de simulatie van fabricageprocessen. Er wordt veel onderzoek gedaan naar kennissystemen die kwalitatief over het gedrag van fysische of mechanische processen kunnen redeneren. Ook dit onderzoek kwam in par. 5.2 ter sprake.

#### *Interpretatie van beperkingen*

Sommige ontwerpers – zoals ontwerpers in de de bouw – hebben regelmatig te maken met de interpretatie van een grote hoeveelheid voorschriften. Ook in Australië zijn bouwvoorschriften in de loop der jaren opgesteld door vele deskundigen. Als gevolg hiervan zijn zij vaak onvolledig, tegenstrijdig, onsamenhangend en overbodig. Relaties tussen voorschriften zijn zelden expliciet vastgelegd. De selectie van bouwvoorschriften waarmee rekening moet worden gehouden, is daarom moeilijk en vergt veel ervaring. Aan de Universiteit van Sydney heeft men een kennissysteem ontwikkeld dat de gebruiker bij het interpreteren van voorschriften ondersteunt [185].

#### *Planning van het ontwerpproces*

Het ontwerpen van complexe structuren vergt een systematische – op kennis van de ontwerpruimte gebaseerde – planning. De planning moet de kwaliteit van een ontwerp waarborgen door het ontwerpproces zodanig te sturen dat mogelijkheden optimaal worden benut en mogelijke conflicten worden vermeden. De planning moet eveneens de snelheid van het ontwerpen garanderen door de ontwerpruimte zo snel mogelijk in te perken en tegenstrijdigheden te voorkomen. Het ontwikkelen van goede ontwerpstrategieën vergt structurele kennis over de ontwerpruimte en kennis over de ordening van ontwerpdoelen.

#### *Het structureren van de ontwerpruimte*

Simon noemt het verdelen van de ontwerpruimte in deelruimten die onderling minimale verbanden bezitten als belangrijk element bij het ontwerpen van complexe structuren [186]. Het gaat er om componenten te onderscheiden die voor een groot deel onafhankelijk van elkaar kunnen worden ontworpen en waarvan de configuratie minimale aanpassingen vereist. Meestal kan in de ordening een hiërarchische structuur worden aangebracht.

De ontwerpruimte kan ook worden ontbonden in verschillende abstractieniveaus. Bij het ontwerpen van geïntegreerde schakelingen wordt een verdeling (van hoog naar laag) gehanteerd van gedragniveau, architectuurniveau, logisch niveau, elektrisch niveau en geometrisch niveau [187, 188, 189]. Op het gedragniveau wordt het gewenste gedrag van een schakeling vastgelegd, bijvoorbeeld in de vorm van een algoritme. Op het architectuurniveau wordt de schakeling beschreven in globale functionele componenten. Op het logisch niveau wordt een schakeling beschreven in logische componenten en kan het logisch gedrag worden gesimuleerd. Op het elektrisch niveau wordt de schakeling gerepresenteerd door elektronische componenten, zoals bijvoorbeeld transistoren en simuleert men het elektrisch gedrag. Op het geometrisch niveau vindt de uiteindelijke configuratie van een schakeling plaats in termen van de fysische en geometrische eigenschappen van componenten.

#### *Het ordenen van doelen*

Een ontwerpstrategie moet rekening houden met het belang van ontwerpdoelen voor het verwezenlijken van de belangrijkste ontwerp-specificaties. Daarnaast kunnen prioriteiten afhangen van de ontwerptoestand. Omgekeerd moet een strategie uitgaan van aspecten van een ontwerptoestand die voor gekozen doelen het gunstigst zijn. Soms kan de ontwerpruimte snel worden gereduceerd door bepaalde doelen in een vroeg stadium na te streven.

Ontwerpstrategieën moeten ook rekening houden met onderlinge verbanden tussen doelen. Verwezenlijking van een doel kan een voorwaarde zijn voor de haalbaarheid van één of meer andere doelen of de haalbaarheid van deze doelen vereenvoudigen. Soms kan een doel slechts ten koste van andere doelen worden bereikt.

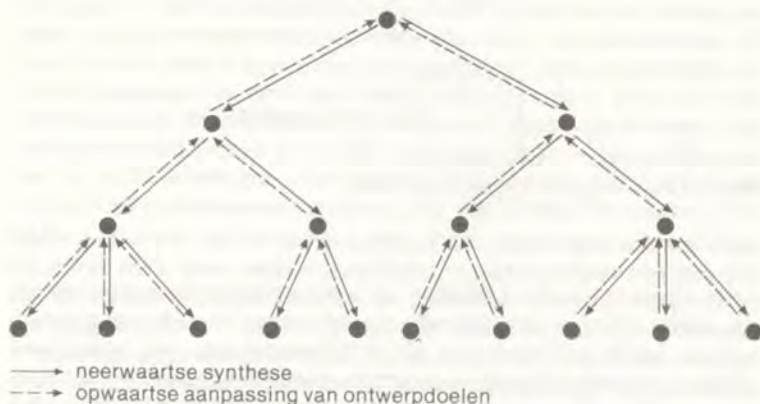
#### *Ontwerpstrategieën*

Bij de configuratie van producten uit speciaal voor een bepaalde productgroep ontwikkelde componenten kunnen ontwerpstrategieën tevoren worden vastgelegd. De kennistechniek heeft zijn commerciële waarde bij deze meest gestructureerde variant van ontwerproblemen reeds bewezen. Bij XCON (zie ook par. 4.2) wordt bij ieder probleem de configuratietaak opgesplitst in dezelfde opeenvolging van deeltaken. Nadat een deeltaak is uitgevoerd, hoeft deze later niet meer te worden herzien.

Bij complexere ontwerproblemen zijn tegenstrijdigheden niet uit te sluiten en moet in de strategie rekening worden gehouden met het herzien van eerder uitgevoerde synthesesetaken. Deze problemen vereisen simulatie van een iteratief ontwerpproces zoals in het begin van deze paragraaf werd beschreven. Tot dusver zijn kennissystemen die ontwerppiteraties uitvoeren nog van experimentele aard. Hierna volgen enige methoden die in dergelijke systemen zijn toegepast.



Brown en Chandrasekaran beschrijven een strategie voor het ontwerpen van mechanische producten die om minimale vernieuwing vragen [190]. Evenals bij XCON, is ondersteuning vooral van belang om een snelle keuze uit zeer vele alternatieven te maken. Het kennissysteem bestaat uit een aantal kennismodulen ('specialisten') met specifieke kennis over het ontwerpdomen. De verzameling modulen is hiërarchisch geordend waarbij naar beneden toe de specialisatie zich meer op details richt (zie afb. 6.2).



Afb. 6.2 Hiërarchische ontwerpstrategie [190].

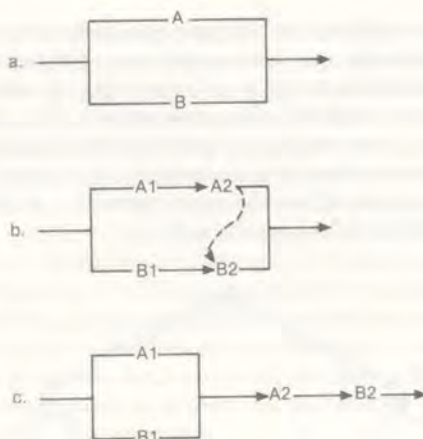
Het ontwerpproces verloopt als volgt. Iedere specialist ontvangt informatie over de ontwerpstoestand van een hoger gelegen moduul en tracht deze te verfijnen. Als de specialist hierin slaagt, wordt de verbonden specialisten op het onderliggende niveau opgedragen het ontwerp verder uit te werken.

Blijkt dit niet mogelijk, dan wordt de hoger geordende specialist om een alternatief ontwerp gevraagd. Lukt ook dit niet, dan wordt het probleem naar een nog hoger niveau verschoven.

Alhoewel deze benadering met het aanpassen van ontwerpdoelen rekening houdt, is zij te star voor minder goed gestructureerde ontwerpproblemen. Het zal daar te vaak voorkomen dat onvoorziene tegenstrijdigheden op de onderste niveaus het systeem dwingen hoog in de hiërarchie nieuwe alternatieven te genereren.

Om dit te voorkomen, zijn strategieën vereist die de opeenvolging van deeltaken tijdens het ontwerpproces dynamisch bepalen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de 'least-commitment'-strategie, die in het Nederlands wordt aangeduid als het redeneren met uitgestelde keuze [1]. Afb. 6.3 laat een eenvoudig voorbeeld van deze strategie zien.

In 6.3.a is het bij de deeltaken A en B nog niet duidelijk welke het eerst



Afb. 6.3 Planning met uitgestelde keuze.

moet worden uitgevoerd. Het kennissysteem ordent ze dan niet en zal ook niet een van beide taken volledig uitwerken, maar deelt ze slechts op in opeenvolgende deeltaken op het onderliggend niveau. In het voorbeeld zijn dat de taken A1, A2, B1 en B2. Vervolgens gaat het systeem na of er op dit niveau in het kennisbestand regels zijn die een verdere ordening mogelijk maken. In het voorbeeld blijkt dat A2 voor B2 en na B1 moet worden uitgevoerd en dus kan het plan volgens 6.3.c worden geordend. Voor de ordening van B1 ten opzichte van A1 is op dit niveau geen informatie vrijgekomen. Deze ordening zal eventueel na verdere opsplitsing worden bepaald. De planning met uitgestelde keuze is uitgebreid beschreven in [191] en is toegepast in TALIB, een kennissysteem voor het ontwerpen van digitale schakelingen [192] en in MOLGEN, een kennissysteem voor het ontwerpen van genetische experimenten [193].

Bij vele ontwerpproblemen gaan interpretatie, synthese en evaluatie uit van meer dan één gezichtspunt. Vaak buigen specialisten uit verschillende disciplines zich gelijktijdig over het ontwerpprobleem en komen beslissingen voort uit het overleg tussen deze specialisten. In de kennistechniek duidt men dit aan als het 'opportunistisch ordenen' van taken. Om het opportunistisch ordenen te simuleren, is de in par. 3.4 beschreven schoolbordarchitectuur toegepast.

In ontwerpssystemen met een schoolbordarchitectuur communiceren modulen met specifieke ontwerp-kennis en modulen voor de sturing van het ontwerpproces via een gemeenschappelijk werkgeheugen. De opeenvolging van taken wordt niet bepaald door een tevoren vastgestelde strategie, maar door de ontwerp-toestand die zich in het werkgeheugen ontwikkelt. Alle kennisbronnen interpreteren de ont-



werptoestand en bepalen vervolgens op welke wijze zij aan het ontwerp kunnen bijdragen. Ook de besturingsmodulen interpreteren de ontwerpstoestand. Op grond van hun interpretatie en de potentiële bijdragen van kennisbronnen bepaalt één van de besturingsmodulen op welk deel van de ontwerpstoestand de aandacht wordt gericht en welke kennisbronnen worden geactiveerd om een taak uit te voeren. De sturing is zodanig dat de ontwerpstoestand wordt aanpast aan de beste mogelijkheden.

De keuze van bovengenoemde en andere strategieën zal in sterke mate afhangen van het ontwerpdomen en de taken die men een kennissysteem in dat ontwerpdomen wil laten uitvoeren. Kennissystemen die in alle ontwerpfasen zowel bij de planning van de gehele opdracht als bij de planning van deeltaken ondersteunen, zullen meer dan één strategie moeten combineren. Bij complexe ontwerpproblemen zijn kennissystemen vereist die de keuze van strategieën laten afhangen van de probleemsituatie. Het eerder genoemde MOLGEN heeft in dit verband als experimenteel systeem grote bekendheid verworven [193, 194].

Bij de keuze van strategieën kan men gebruik maken van studies over gestructureerde ontwerpmethoden. Reeds lang voordat praktische toepassing van kennistechniek in de belangstelling stond, werden voor de werktuigbouw gestructureerde ontwerpmethoden ontwikkeld. Een overzicht en referenties zijn te vinden in collegedictaten van de Faculteiten Werktuigbouwkunde en Industrieel Ontwerpen van de Universiteit Twente, resp. de Technische Universiteit Delft [195, 196]. De Vakgroep Digitale Systemen van de Technische Universiteit Eindhoven doet onderzoek naar strategieën voor het ontwerpen van digitale schakelingen. Verwerking van strategieën in een kennissysteem wordt overwogen.

Hamel beschrijft recent onderzoek door de Vakgroep Psychonomie van de Universiteit van Amsterdam naar de systematiek in het ontwerpproces bij architecten [197, 198]. Bij dit onderzoek werd aan de hand van de uitvoering van een ontwerpopdracht de werkwijze van vijftien ervaren architecten bestudeerd. Een uitgebreide studie over de psychologische aspecten van het ontwerpen door architecten is gegeven in [199].

### *Synthese*

De wijze waarop ontwerpsystemen syntheses taken moeten uitvoeren, wordt in belangrijke mate bepaald door de geëiste oorspronkelijkheid. Achtereenvolgens wordt ingegaan op hergebruik van ontwerpen, ontwerpen met ontwerpregels en creatief ontwerpen.

*Hergebruik van ontwerpen*

Bij complexe ontwerpproblemen kan hergebruik van succesvolle ontwerpen belangrijke tijdsbesparing opleveren. Door de ontwerpen op te slaan in een bestand en ze door een kennissysteem te laten opzoeken, kan men de reeds eerder gemaakte ontwerpen sneller benutten.

Fairchild heeft een experimenteel kennissysteem ontwikkeld dat gebruik maakt van een bestand met bestaande ontwerpen voor VLSI-schakelingen [182]. Van ieder ontwerp is behalve de samenstelling ook de functie beschreven. Als gebruikers het systeem een bepaalde functie opgeven, zoekt het systeem naar het best passende ontwerp door de functie te vergelijken met functies van de ontwerpen in het bestand. Ontwerpers moeten het ontwerp in het algemeen zelf nog aanpassen. Onderzoekers van Rutgers University bestuderen de mogelijkheden ook het aanpassen van bestaande ontwerpen zoveel mogelijk te automatiseren. REDESIGN is een experimenteel systeem voor dergelijke taken. Dit systeem ordent mogelijke aanpassingen naar de mate waaraan zij aan eisen voldoen en naar de maakbaarheid [182].

Ook in de architectuur is men geïnteresseerd in het gebruik van bestaande ontwerpen als prototypen. GERT is een kennissysteem voor de selectie en aanpassing van configuraties voor gipsen scheidingswanden [200]. De Faculteit der Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft onderzoekt een 'elektronisch handboek' van architectonische ontwerpen [201, 202].

*Ontwerpregels*

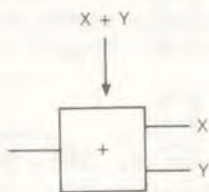
Kennissystemen die bij de synthese gebruik maken van bestaande ontwerpen zijn alleen interessant als de nodige aanpassingen binnen zekere grenzen blijven. Waar dit niet het geval is, zal men ontwerpen liever samenstellen uit meer elementaire componenten. Bij correcte koppeling van componenten spelen ervaring en kennis over de logische relaties tussen objecten en functionele eisen een rol. Kennistechniek biedt de mogelijkheid ervaring en kennis vast te leggen in productieregels. In de voorwaarden van deze regels zijn een aantal beperkingen, eisen en/of een bepaalde ontwerpstoestand vastgelegd. De conclusie omvat een nieuwe ontwerpstoestand die correct met de voorwaarden samenhangt.

Bij de synthese van geïntegreerde schakelingen zijn regels nodig die de transformatie van ontwerpstoanden tussen twee abstractieniveaus mogelijk maken en de configuratie van componenten op een bepaald abstractieniveau optimaliseren. Afb. 6.4 geeft van beide regels een voorbeeld. De regels zijn afkomstig van DAS/LOGIC dat door het Amerikaanse bedrijf Carnegie Group Inc. werd ontwikkeld [187]. In de eerste regel is de transformatie van gedragniveau naar



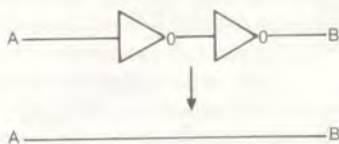
logisch niveau vastgelegd. De tweede regel vereenvoudigt een schakeling op logisch niveau door twee in serie geschakelde tekenomkeerders te elimineren.

- IF the behaviour statement is 'X + Y'  
 THEN
1. create an adder function unit
  2. connect X and Y to the unit's input
  3. mark the unit's output as ready for connection



a. Transformatie van gedrag- naar logisch niveau

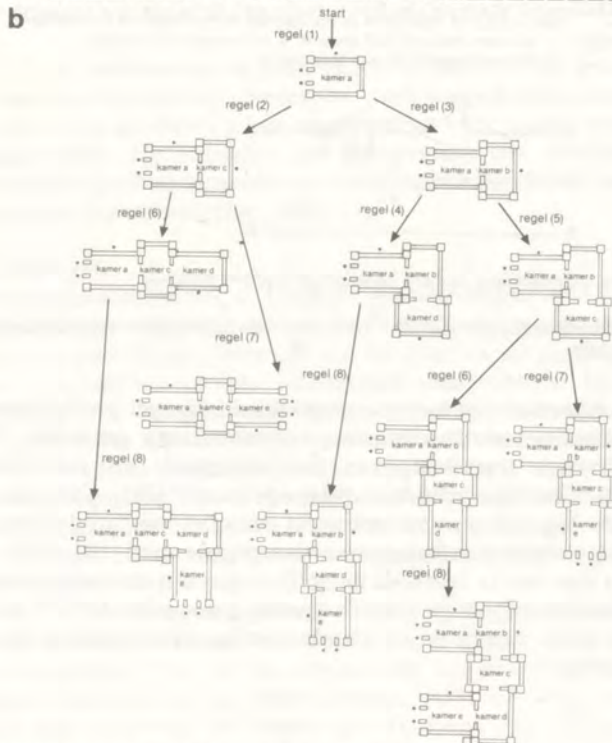
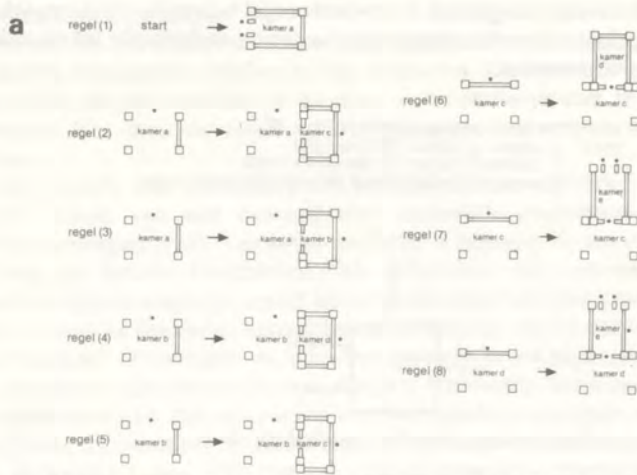
- IF the output of inverter A is connected to the input of inverter B  
 THEN
1. connect the input of inverter A to inverter B's output
  2. remove inverter A and inverter B



b. Optimalisatie van een eenvoudige logische structuur

Afb. 6.4 Syntheseregels bij het ontwerpen van geïntegreerde schakelingen [187].

In de architectuur zijn systemen ontwikkeld die met productieregels uit elementaire vormen complexe vormstructuren genereren. Stiny beschrijft deze toepassing van productieregels als een formele grammatica die hij aanduidt als 'shape grammar' [203]. Gero laat zien hoe in de logische programmeertaal PROLOG met productieregels eenvoudige structuren kunnen worden gegenereerd [184, 204]. Afb. 6.5.a laat zien hoe in regels de mogelijkheden zijn vastgelegd waarop twee eenheden aan elkaar kunnen worden gekoppeld. Afb. 6.5.b toont hoe met deze regels verschillende configuraties kunnen worden gegenereerd.



Afb. 6.5 Synthese van bouwvormen met regels [184].



Schmitt beschrijft kennissystemen die alternatieve ontwerpen genereren in een bepaalde stijl [205]. De 'Mies van der Rohe Generator' ontwerpt volgens de panelenarchitectuur van de architect Mies van der Rohe. Een ander programma ontwerpt volgens regels van de architect Richard Meier. Het programma EAVES voert gedetailleerde ontwerpen uit van overhangende dakranden volgens een bepaalde architectonische stijl [206].

Bij alle genoemde systemen voor de synthese van vormen is de kennis beperkt tot vormen. De gebruikers zullen zelf moeten bepalen welke vormen voor een bepaalde functie of uit esthetisch oogpunt de voorkeur verdienen.

#### *Creatief ontwerpen*

Als een opdracht vraagt om een revolutionair ontwerp, moeten nieuwe verbanden worden gelegd tussen tot dan toe ongerelateerde objecten. De ontwerper moet als het ware nieuwe ontwerpregels creëren. Men tast nog in het duister hoe creatieve ontwerpers aan hun ideeën komen. Wel is er een aantal methoden ontwikkeld om de creativiteit te stimuleren [195, 196].

Het Department of Architecture van Carnegie Mellon University heeft onderzoek gedaan naar de mogelijkheden methoden die de creativiteit stimuleren in kennissystemen te verwerken. Men heeft het principe van 'synectics', een vorm van brainstorming, verwerkt in een experimenteel kennissysteem [207].

Het verwezenlijken van werkelijk creatieve kennissystemen is voorlopig nog ver weg. Het onderzoek dat op dit gebied wordt verricht, is vooralsnog van zuiver wetenschappelijke aard. Het is gebaseerd op de veronderstelling dat creativiteit samenhangt met de mate waarin de mens analoge situaties buiten zijn vakgebied kan herkennen. De mogelijkheid leerprocessen die op analogie berusten te simuleren, was reeds in de jaren zeventig een veelbesproken thema van de AI [39, 59, 60, 208, 209].

Het EDISON-project moet leiden tot een kennissysteem dat een model vormt van de wijze waarop ontwerpers innovatieve mechanische hulpmiddelen ontwerpen [210]. Het gaat om eenvoudige dagelijkse gebruiksvoorwerpen, zoals muizenvallen, nagelschaartjes, blikopeners of deuren. Het programma gaat uit van kwalitatieve kennis over elementaire fysische relaties en maakt gebruik van technieken uit de naïeve of kwalitatieve fysica die ook in verband met de interpretatie werden genoemd. Verder beschikt het programma over vuistregels om innovatieve voorwerpen te creëren, uitgaande van abstracte voorwerpen. In het project wordt bovendien aandacht besteed aan de wijze waarop uit ervaring verkregen kennis over voorwerpen in het geheugen wordt opgeslagen en opgezocht en de wijze waarop

ontdekkingen op nieuwheid en vindingrijkheid worden beoordeeld. EDISON zal kunnen functioneren in een 'brainstorming-modus' en als probleemoplosser. In de brainstorming-modus tracht het programma een groot aantal nieuwe voorwerpen te genereren door mutatie, inductie en het redeneren met analogieën. Als probleemoplosser tracht het programma opgegeven ontwerpdoelen zo goed mogelijk te verwezenlijken met een aantal ontwerpplannen.

### *Evaluatie*

Tijdens het hele ontwerpproces evalueert de ontwerper ontwerpstanden. Conventionele CAD-programma's beperken zich tot de kwantitatieve evaluatie van fysische en mechanische eigenschappen, kosten of normatieve waarderings.

Ontwerpers evalueren echter vaak kwalitatief. Om deze kwalitatieve evaluaties te automatiseren, biedt kennistechniek de beste mogelijkheden. Evaluatie van kwalitatieve eigenschappen kan bijvoorbeeld door 'matching' van ontwerpstanden met regels waarin ongewenste combinaties van objecten zijn vastgelegd. In het HIGH-RISE-systeem, dat voorontwerpen van bepaalde typen flatgebouwen kan genereren [211, 212], is de evaluatie impliciet verwerkt in regels waarmee ongewenste combinaties worden geëlimineerd. Een van de regels luidt:

```
IF          2D alternative is braced frame, AND  
           material to resist lateral loads is concrete  
THEN      eliminate the alternative
```

Maher beschrijft een programma dat de structuren die een ontwerper op het beeldscherm construeert, evalueert. De ontwerper maakt de constructies met pictogrammen van zuilen, balken en geraamten [213]. Het programma geeft bij iedere configuratie commentaar op stabiliteit en over- of onderdimensionering van het ontwerp.

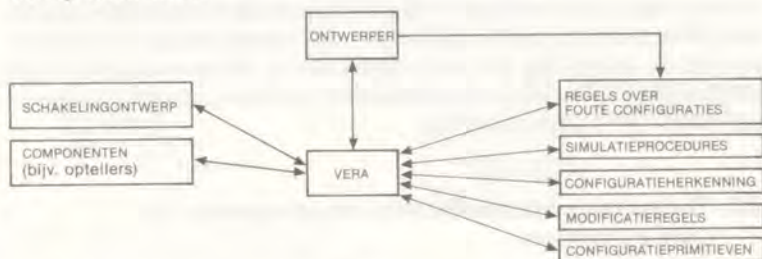
In het Philips' Natuurkundig Laboratorium is men bezig met de ontwikkeling van een systeem dat ontwerpers ondersteunt bij de evaluatie van VLSI-ontwerpen op logisch en elektrisch niveau [214]. Het systeem wordt VERA (Verification Assistant) genoemd.

VERA treedt in werking als een ontwerper opdracht geeft een kritisch gedeelte van het ontwerp van een schakeling te onderzoeken op mogelijke gebreken. Het systeem bepaalt vervolgens of onjuiste configuraties die in regels zijn vastgelegd, overeenkomen met configuraties in het ontwerp.

Bij vaststelling van een onjuiste configuratie geeft VERA een foutmelding. De gebruiker kan desgewenst van VERA adviezen krijgen over wijzigingen en het systeem wijzigingen laten aanbrengen. VERA zal daartoe beschikken over een bestand onjuiste configuraties. De



ontwerper kan interactief met VERA ontwerpen, waarbij het systeem opeenvolgende ontwerpstappen toetst en eventueel aanpast. Als het systeem er niet in slaagt door 'matching' onjuiste configuraties te bepalen, kan het lokaal logische en elektrische simulaties voorstellen en uitvoeren. Omdat simulaties tijdrovend en kostbaar zijn, hoopt men het bestand van regels met onjuiste configuraties zodanig uit te breiden dat de behoefte aan simulatie tot het uiterste wordt teruggebracht. Het project is zo ver gevorderd dat de modules voor herkenning van onjuiste configuraties, het geven van foutmeldingen, het geven van hersteladviezen en het uitvoeren van hersteltaken, functioneren. Afb. 6.6 geeft schematisch de modulaire structuur van het systeem weer.



Afb. 6.6 Modulaire structuur van VERA.

### *Stand van zaken en vooruitzichten*

Er zijn nog geen openbare publikaties over kennissystemen die geregeld door ontwerpers worden gebruikt om ontwerptaken uit te voeren. Naar verwachting zal de praktische toepassing van ontwerpssystemen vooral gericht zijn op het adviseren of toetsen bij complexe combinatorische problemen in een gesloten ontwerpruimte. Het feit dat de probleemruimte gesloten is, betekent dat zij slechts ontwerp-toestanden toelaat die met een vaste verzameling ontwerpregels kunnen worden samengesteld. Om voldoende doelmatigheid te garanderen, moeten grote ontwerpruimten in hiërarchisch geordende semi-onafhankelijke deelruimten zijn te verdelen.

Ontwerpsystemen zullen vooral worden toegepast in vakgebieden waarbij het ontwerpen vraagt om de samenstelling van complexe structuren uit een groot aantal sterk verschillende componenten. Het is niet verwonderlijk dat in deze paragraaf veel voorbeelden uit de micro-elektronica werden genoemd. Ook aan het ontwerpen van complexe fysisch-chemische installaties en mechanische constructies zullen ontwerpsystemen mogelijk een belangrijke bijdrage kunnen leveren.

Het hoeft niet zo te zijn dat ontwerpsystemen alle ontwerptaken uitvoeren. Er zijn bijvoorbeeld praktische ontwerpsystemen voorstelbaar die zich beperken tot de evaluatie van door de ontwerper ontwikkelde plannen. Het is belangrijk dat ontwerpsystemen automatisch informatie kunnen uitwisselen met conventionele CAD-systemen zoals teken-, reken-, of simulatieprogramma's. In par. 6.3 wordt nader op gebruikersvriendelijkheid en integratie ingegaan.

Omdat bij het ontwerpen vaak van nieuwe componenten gebruik zal worden gemaakt, is tijdige aanvulling van kennisbestanden een zeer belangrijke voorwaarde voor succesvolle toepassing van kennissystemen bij het ontwerpen. Bovendien mogen nieuwe componenten de samenhang van het kennisbestand niet verstoren. In het geval van XCON is voor het onderhoud een groep specialisten samengesteld die zich allen met deze taak bezighouden. De ontwikkeling van faciliteiten om de aanvulling van kennissystemen te vereenvoudigen en de samenhang van het bestand automatisch te toetsen, zijn voor ontwerpsystemen van bijzonder belang.

### **6.3 Gebruikersvriendelijkheid en integratie van CAD-systemen**

Kennistechniek kan ook voor ontwerpers van betekenis zijn door haar bijdrage aan gebruikersvriendelijkheid en integratie van CAD-systemen in het algemeen.

#### **Interactie tussen geometrische modellen en beschrijvingen**

Grafische computermodellen zijn bij de tegenwoordig toegepaste CAD-systemen geometrisch van aard. De modellen bestaan uit punten, lijnen, vlakken of elementaire vormen, die numeriek zijn vastgelegd in een coördinatenstelsel. Als kennissystemen redeneren over objecten die door het CAD-systeem in geometrische modellen zijn vastgelegd, is het van belang dat het kennissysteem deze modellen zelf herkent.

In de paragrafen 4.3 en 5.4 werd automatische interpretatie van geometrische CAD-modellen genoemd als een belangrijk element bij de integratie van CAD-systemen met robotsystemen en kennissystemen voor werkvoorbereiding. De daar genoemde projecten richten zich vooralsnog op de interpretatie van driedimensionale geometrische modellen van enkelvoudige objecten in termen van 'features' (gespecificeerde vormdelen, zie par. 4.3). Er is voor dit doel een aantal interpretatiemethoden ontwikkeld die op kennistechniek zijn gebaseerd. Sommige methoden zijn gericht op modellen die volgens het principe van 'boundary representation' (BR) als combinaties van punten, lijnen en vlakken zijn vastgelegd [215]. Andere methoden



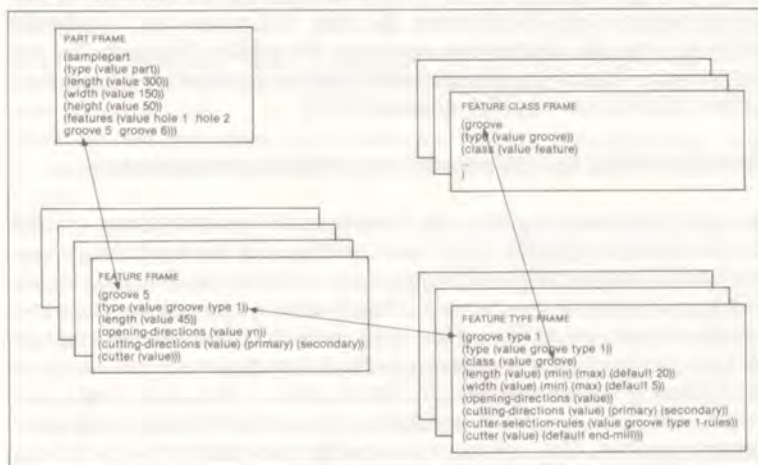
gebruiken modellen gebaseerd op de 'constructive solid geometry' (CSG)-methode [216]. In dit geval worden objecten opgebouwd uit primitieve driedimensionale vormen.

De relatie tussen geometrische structuren en 'features' kan worden vastgelegd in productieregels zoals:

```

IF      face F1 is adjacent to face F2, and
        face F2 is adjacent to face F3, and
        angle between F1&F2 is less than 180°, and
        angle between F2&F3 is less than 180°
THEN   faces F1, F2 and F3 form a feature SLOT
  
```

Frames lenen zich goed voor de beschrijving van 'features' [218]. Afb. 6.7 geeft voorbeelden van 'feature'-frames.



Afb. 6.7 'Feature'-frames [218, 299].

Naast de voorgaande methoden die bij de interpretatie uitgaan van driedimensionale informatie, is er ook een methode ontwikkeld waarbij de interpretatie uitgaat van doorsneden van driedimensionale modellen. Deze methode berust op de herkenning van patronen in de opeenvolging van zijden in de doorsnede [217].

De eerder genoemde voorbeelden beperkten zich tot de herkenning van enkelvoudige onderdelen. Bij de interpretatie van complexere modellen – zoals bijvoorbeeld installaties of gebouwen – komen problemen naar voren die in par. 5.4 in verband met beeldherkenning zijn besproken.

Bij de Faculteit der Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft is een onderzoek begonnen naar de wijze waarop architecten architectuurplannen waarnemen, categoriseren, in hun geheugen opslaan en

zich herinneren [201]. Dit onderzoek sluit aan bij het in par. 6.2 genoemde project waarmee een elektronisch handboek voor architecten wordt nagestreefd.

In het voorgaande werd er van uitgegaan dat de ontwerper met een grafisch werkstation construeert of dat tekeningen gedigitaliseerd zijn. Het is echter mogelijk dat in de toekomst ontwerpers hun CAD-modellen direct uit 'features' opbouwen. Dit zal de interpretatie in sterke mate vereenvoudigen [218].

De kennistechniek heeft grafische faciliteiten opgeleverd waarmee grafische modellen kunnen worden gegenereerd waarvan de betekenis is vastgelegd. Deze modellen zijn opgebouwd uit pictogrammen, grafische symbolen waarvan de eigenschappen en functies in het kennisbestand zijn beschreven. In par. 6.2 werd een voorbeeld gegeven van de toepassing van een dergelijke faciliteit bij het ontwerpen. Vooral het object-georiënteerd programmeren heeft dergelijke faciliteiten mogelijk gemaakt [219].

#### Ondersteuning bij het gebruik van ontwerpgeredschap

Bij het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium (NLR) worden kennissystemen voor de ondersteuning bij het gebruik van bestaande ontwerpgeredschappen als een belangrijke toepassing van kennistechniek beschouwd [220]. Men bouwde een interface om minder ervaren gebruikers effectiever en doelmatiger te laten omgaan met een bestand waarin ontwerpmethoden en gegevens, eventueel in grafische vorm, zijn opgeslagen. De interface werd ontwikkeld met NEXT, een door het NLR zelf gebouwde ontwikkelomgeving voor kennissystemen. Men wil met NEXT ook kennissystemen ontwikkelen met kennis over het gebruik van verschillende ontwerpmethoden. Ook bij Fokker wordt NEXT in eerste instantie gebruikt voor het ontwikkelen van een intelligente interface [221].

Metha [222] wijst op het belang van kennissystemen bij de vooruitgang van de numerieke aerodynamica en hydrodynamica en de toepassing hiervan bij het ontwerpen. In de eerste plaats kunnen kennissystemen helpen bij de ontwikkeling van theoretische modellen omdat onderzoekers dan doelmatiger gebruik kunnen maken van beschikbare kennis. In de tweede plaats kunnen zij helpen bij het benutten van de modellen voor het ontwerpen.

Het vermogen van de huidige computers en de huidige programmatuur beperkt de omvang en complexiteit van aero- en hydrodynamische problemen die met computers kunnen worden opgelost. Metha betoogt dat kennistechniek een belangrijke rol zal spelen bij het vergroten van de rekensnelheid en de beheersing van de complexiteit van berekeningen. In het eerste geval levert volgens hem kennistechniek



niek een bijdrage in de vorm van programmatuur voor geavanceerde parallele computerarchitecturen. In het tweede geval gaat het om het doelmatig hanteren van wiskundige vergelijkingen. In de kennistechniek is het symbolisch manipuleren van wiskundige vergelijkingen een belangrijk onderwerp van onderzoek. Dit onderzoek vond reeds plaats in de jaren zestig. Voor meer informatie over deze toepassing wordt verwezen naar het *Journal of Symbolic Computation* (Academic Press).

TNO-Iweco heeft een kennissysteem ontwikkeld dat de volgorde bepaalt waarin CAD-modulen met reken- en tekenprocedures moeten worden aangeroepen als de ontwerper een ontwerpstep verricht. Bovendien verzorgt het systeem de administratieve taken bij het uitvoeren van de procedures. Het systeem bepaalt niet alleen de volgorde van procedures die voor het eerst worden aangeroepen, maar kan ook de geldigheid van uitgevoerde handelingen beoordelen en eventueel wijzigen [223]. Het systeem is toegepast bij het ontwerpen van schepen [224].

Ook bij het bouwkundig ontwerpen bestaat belangstelling voor kennistechniek ter ondersteuning bij het gebruik van andere hulpmiddelen.

Er worden bij het bouwkundig ontwerpen al vaak computerprogramma's gebruikt voor het oplossen van optimalisatieproblemen. Deze programma's kunnen nauwkeurige oplossingen opleveren. De gebruiker moet daartoe echter zijn problemen op een voor het programma interpreteerbare wijze formuleren en de geschikteste methode kiezen. Dit levert vaak moeilijkheden op. Kennistechniek maakt het mogelijk programma's te ontwikkelen die algebraïsche optimalisatiemodellen identificeren en de geschikteste methoden selecteren.

Aan de Universiteit van Sydney onderzoekt men de mogelijkheid kennissystemen te ontwikkelen die in het Engels geformuleerde optimalisatieproblemen kunnen interpreteren.

OPTIMA is een experimenteel kennissysteem waarmee in het Engels opgegeven ontwerpeisen via een representatie in frames worden omgezet in een optimalisatieprobleem [225].

Ook bij de afdeling voor bouwonderzoek van de Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) in Australië onderzoekt men de integratie van kennistechniek en optimalisatie-technieken [226]. Men streeft naar de integratie van optimaliseringsprogramma's en kennissystemen met algemene kennis over de eigenschappen van complexe systemen. Ook onderzoekt men de mogelijkheden AI-technieken in optimalisatieprogramma's zelf te verwerken.

SACON is een systeem dat op grond van de identificatie van een probleemklasse adviezen geeft over het gebruik van een programma voor eindige elementenanalyse [14].

HICOST ondersteunt ontwerpers bij het maken van voorlopige kostenramingen. De als frames gerepresenteerde objecten worden via produktieregels gerelateerd aan kostengegevens die in een relationele gegevensbank zijn opgeslagen [227].

### Geïntegreerde ontwerpomgevingen

In de toekomst zijn geïntegreerde ontwerpomgevingen te verwachten waarin traditionele CAD-methoden worden gecombineerd met kennissystemen.

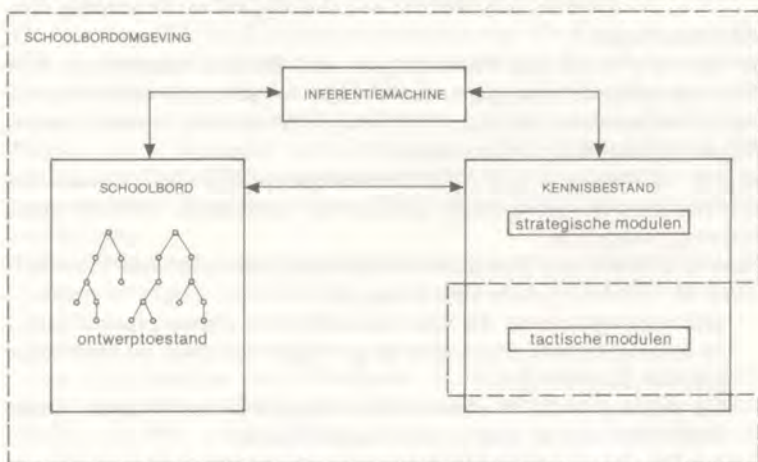
Rehak stelt een ontwerpomgeving voor met een kennissysteem dat strategische beslissingen neemt over taken die in een bepaalde situatie moeten worden uitgevoerd. Het strategische kennissysteem activeert tactische systemen op een lager niveau die deze taken uitvoeren. De tactische systemen kunnen rekenprogramma's van verschillende aard of ontwerpsystemen zijn [227]. Het ideaal om een systeem te ontwikkelen dat van de grond af alle ontwerptaken omvat en alle programma's optimaal op elkaar heeft afgestemd, is volgens Rehak niet te verwezenlijken. Voor vele taken bestaan nog geen programma's en men kan vooralsnog niet voorzien welke taken geschikt zijn om in kennissystemen vast te leggen. Het is daarom realistischer uit te gaan van een omgeving die stap voor stap meer ondersteunende taken kan uitvoeren. Deze omgeving zal bestaan uit gereedschappen die door verschillende deskundigen als onafhankelijke hulpmiddelen zijn ontwikkeld.

Een van de grootste problemen bij de ontwikkeling van een geïntegreerd systeem is de communicatie tussen de verschillende gereedschappen. Zij zullen resultaten van hun handelingen moeten uitwisselen en voor hun handelingen kennis en gegevens moeten delen. De ontwikkeling van interfaces is dan ook een van de grootste opgaven bij de ontwikkeling van geïntegreerde ontwerpomgevingen.

Iedere interface zal moeten kunnen redeneren over de inhoud en de organisatie van bestanden en werkgeheugens van de geïntegreerde computerprogramma's. Deze interfaces moeten verklarende kennis verwerken over de syntax, de semantiek en het gebruik van de datatypen van de gekoppelde systemen. Het systeem dat Rehak beschrijft, is gebouwd volgens de schoolbordarchitectuur. De interactie tussen de modulen wordt centraal gestuurd door de 'ontwerpbestuurder'. De ontwerpbestuurder beschikt over strategische kennismodulen met domein-onafhankelijke kennis over het uitvoeren van een ontwerpproces als geheel. Deze modulen interpreteren de globale ontwerptoestand die op het schoolbord is vastgelegd en bepalen welke tactische kennismodulen worden geactiveerd. Iedere tactische moduul bestaat uit een 'gereedschapbestuurder' en een ontwerpgeereedschap. De gereedschapbestuurder volgt de handelingen van het gereedschap en wisselt informatie uit met de ontwerpbestuurder.



Ieder gereedschap kan op zich zelf een complex kennissysteem zijn dat bestaat uit strategische en tactische modulen die via een schoolbord informatie uitwisselen. Het kan ook om rekenprogramma's gaan. Als een nieuw gereedschap aan de ontwerpomgeving wordt toegevoegd, moet een specifieke gereedschapbestuurder worden gebouwd om de communicatie met de ontwerpbestuurder en de overige gereedschappen mogelijk te maken. Afb. 6.8 geeft de ontwerpomgeving schematisch weer.



Afb. 6.8 Ontwerpomgeving met schoolbordarchitectuur [227].

## 6.4 Onderzoek en ontwikkeling in Nederland

In Nederlandse universiteiten en onderzoekinstellingen is de belangstelling voor onderzoek over kennissystemen voor het ontwerpen sterk toegenomen. In dit hoofdstuk werden reeds enige voorbeelden gegeven van Nederlands onderzoek. Hier volgen voorbeelden van ander Nederlands onderzoek in een aantal toepassingsgebieden.

### *Werktuigbouw*

Aan de Technische Universiteit Delft is de Faculteit van het Industrieel Ontwerpen bezig met het project 'Kosteninformatie voor ontwerpers'. Dit project moet uiteindelijk leiden tot een kennissysteem dat ontwerpers of constructeurs in alle ontwerpfasen informatie kan verstrekken over de gevolgen van ontwerpbeslissingen voor de kosten van een produkt.

In de Vakgroep Ontwerpen van de Faculteit der Werktuigbouwkunde

van de Universiteit Twente wordt promotieonderzoek verricht naar de toepassing van kennistechniek in de beginfasen van het ontwerp-proces. Verder biedt deze vakgroep in het kader van de regeling 'Tijdelijke Ondernemingsplaatsen' (TOP-regeling) ondersteuning aan het bedrijf Meyling Expert Systemen. De TOP-regeling is een initiatief van de Universiteit Twente en het Ministerie van Economische Zaken om jonge ingenieurs te ondersteunen bij het opzetten van innovatieve bedrijven.

#### *Elektrotechniek*

In par. 6.2 werd het VERA-project van Philips beschreven. Het Natuurkundig laboratorium van Philips verricht ook ander onderzoek over ontwerpssystemen. [189] beschrijft een ESPRIT-project waarbij dit laboratorium is betrokken.

In par. 6.2 werd ook vermeld dat de Vakgroep Digitale Systemen van de Technische Universiteit Eindhoven onderzoek verricht naar ontwerpstrategieën.

Aan de Universiteit Twente houdt het Laboratorium voor VLSI-Ontwerp en Netwerktheorie zich bezig met:

- een ontwerpstelsel dat kan adviseren over ontwerphandelingen en informatie kan geven over de gevolgen van door de ontwerper gekozen handelingen;
- een geïntegreerd CAD-systeem dat strategische beslissingen van de ontwerper vertaalt naar een structuurschema;
- een kennissysteem dat de ontwerper strategieën voor het oplossen van routeringsproblemen voorstelt.

In de Vakgroep 'IC-Technologie en Elektronica' van dezelfde universiteit onderzoekt men de toepassing van heuristische testprocedures. De Vakgroep Netwerktheorie van de Technische Universiteit Delft maakt gebruik van kennistechniek bij systemen die adviseren over ontwerpstrategieën, systemen voor het definiëren en verfijnen van parallele computersystemen en systemen voor de manipulatie van permanente objecten.

#### *Bouw*

Bij de Vakgroep Calibre van de Faculteit der Bouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven wordt veel aandacht besteed aan de toepassing van kennistechniek bij het ontwerpen. Hieronder volgt een overzicht van projecten die in de vakgroep zijn of worden uitgevoerd:

- de ontwikkeling van een 'gereedschapskist' om ontwerpers te ondersteunen in de vroege fase van ontwerpprojecten;
- de mogelijkheden van ontwerpssystemen voor het ontwerpen van keukens en het schatten van de bijbehorende kosten;
- de bouw van een prototype van een ontwerpstelsel voor plattegronden van modewinkels;



- de representatie van topologische kennis (een SPIN-project);
- de ontwikkeling van kennissystemen voor het onderwijs in de bouwkunde (een ESPRIT-project samen met de Universiteiten van Luik en Strathclyde).

Als onderdeel van het project 'Verbetering Ontwerpmethoden' verricht men bij de Faculteit der Bouwkunde (Vakgroep GMT) van de Technische Universiteit Delft onderzoek naar de representatie van architectuurplannen en de mogelijkheden van ontwerpsystemen die zijn gebaseerd op hergebruik van architectuurplannen.

De Stichting ISSO te Rotterdam (Instituut voor Studie en Stimulering van Onderzoek op het gebied van verwarming en luchtbehandeling) voert een project uit dat onder andere de ontwikkeling van zo'n kennissysteem tot doel heeft. Een ander systeem moet ondersteuning bieden bij de diagnose van klachten over het binnenklimaat. Het onderzoek van ISSO maakt deel uit van een Europees project waaraan ook Engelse, Franse, Deense en Portugese organisaties deelnemen.

IBBC-TNO heeft een demonstratiesysteem voor de behandeling van normen en regels ontwikkeld.

#### *Algemeen*

Door het Centrum voor Wiskunde en Informatica te Amsterdam wordt het IICAD (Intelligent Integrated Interactive CAD)-project uitgevoerd. Men zoekt in dit project eerst naar een theoretische basis voor het toepassen van kunstmatige intelligentie in CAD om vervolgens een prototype van een geïntegreerde ontwerpomgeving te bouwen.

De Sectie Kennissystemen van het CIAD te Zoetermeer (een vereniging die toepassingen van computers in de ingenieurspraktijk onderzoekt) is bezig met de voorbereiding van een project over kennissystemen met ontwerpregels.

---

## 7. Ontwikkeling, gebruik en onderhoud

In Nederland is veel onderzoek gedaan naar methoden voor de ontwikkeling van kennissystemen en de verwerving van kennis van experts. In dit hoofdstuk worden daarvan diverse aspecten en activiteiten behandeld. De nadruk ligt op de werkwijze bij de ontwikkeling van een eerste kennissysteem. Daarbij staat onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van kennistechniek in de praktijk van de eigen organisatie centraal. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de eerste stappen die worden gezet, de samenstelling van de projectgroep en de keuze van het toepassingsgebied. Daarna wordt ingegaan op kennisverwerving en systeemontwikkeling; de programmatuur en modaliteit, en de gefaseerde invoering, het gebruik, het beheer en het onderhoud.

### 7.1 Aanzet, bemanning en probleemkeuze

#### De eerste stappen

De meeste bedrijven beginnen niet zomaar met de ontwikkeling van kennissystemen. Eerst wordt een oriëntatiefase doorlopen. Vaak ontstaat in deze fase de belangstelling voor kennissystemen op diverse plaatsen, maar niet overal leidt deze belangstelling tot activiteiten. In veel bedrijven worden de eerste activiteiten ontplooid in een stafafdeling met een onderzoekaak. Meestal is er één medewerker die zich opwerpt als kampioen. Hij bestudeert, al dan niet in zijn vrije tijd, literatuur, bezoekt symposia en zorgt voor de verspreiding van zijn bevindingen in de eigen organisatie. Daarvoor kan hij externe deskundigen uitnodigen die in inleidende lezingen, toegespitst op de praktijk van het betreffende bedrijf, een bredere belangstelling voor toepassingen van kennissystemen bevorderen. Wanneer een en ander leidt tot voldoende betrokkenheid, beslist de leiding over investeringen en kan worden begonnen aan een haalbaarheidsonderzoek en de ontwikkeling van een eerste proefsysteem. Meestal worden de kosten hiervoor opgebracht uit een algemeen budget voor onderzoek of stimulering van vernieuwingen. Aan de hand van een of meer kleine prototypen worden de mogelijkheden van kennissystemen gedemonstreerd. Na beoordeling hiervan kan worden besloten tot verdere investeringen, maar soms voldoet een eerste demonstratieprototype



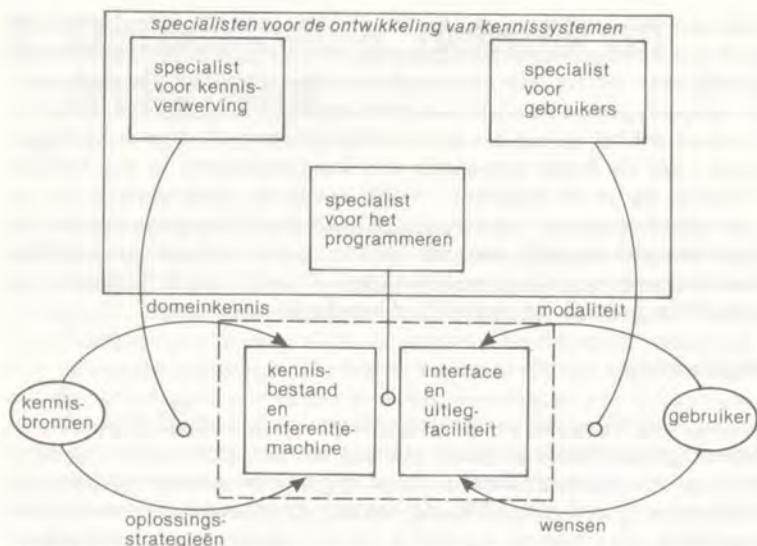
niet aan de verwachtingen. In dat geval ontstaat een klimaat waarin niet kan worden gerekend op grote investeringen in kennistechniek, terwijl vaak wel zinvolle en rendabele toepassingen en de bijbehorende besparingen en produktiviteitsverhogingen mogelijk zijn. Daarom is de ontwikkeling van het eerste demonstratieprototype doorslaggevend voor de brede acceptatie van kennissystemen in een bedrijf. Vandaar dat in dit hoofdstuk vooral aandacht wordt besteed aan de ontwikkeling van zo'n eerste systeem. Er wordt ingegaan op diverse aspecten die daarbij een rol spelen, zoals bemanning, aanpak, kennisverwerving en gereedschappen. Daarna wordt ingegaan op integratie, gebruik en onderhoud van kennissystemen.

### Bemanning

De samenstelling van een projectgroep voor de ontwikkeling van een kennissysteem hangt af van de omvang van het systeem, de complexiteit van het probleemgebied en de tijd waarin men het systeem wil realiseren. Voor de ontwikkeling van een groot kennissysteem is in het algemeen een projectgroep nodig die bestaat uit een projectleider en één of meer kennisanalisten, aangevuld met experts uit het probleemgebied, gebruikers en programmeurs.

Het begrip *kennisanalist* is afgeleid van de in de Engelstalige literatuur gebruikelijke term *knowledge engineer*. Naar analogie met informatie-analisten zijn kennisanalisten degenen die samen met de gebruikers het probleem in kaart brengen. In aanvulling op de taak van de informatie-analist zorgt de kennisanalist ook voor de verwerving van kennis, bijvoorbeeld door ondervraging van experts.

Ervaren kennisanalisten zijn niet slechts bedreven in het verwerven, analyseren en formaliseren van kennis, maar ook in het gebruik van apparatuur en programmatuur voor de ontwikkeling van kennissystemen. Beide aspecten, ervaring met kennisverwerving en kennis van gereedschappen, zijn belangrijk. Zij hoeven echter niet in één persoon verenigd te zijn. Het belangrijkste is dat deze vaardigheden in de projectgroep zijn vertegenwoordigd en goed met elkaar kunnen communiceren. In [228] wordt besproken hoe in een projectgroep drie specialisten samenwerken, één met ervaring in kennisverwerving in het betreffende domein, één die bedreven is in het gebruik van gereedschappen en technieken en een derde die is belast met de gebruiksaspecten, de 'gebruikersspecialist'. Deze laatste is vergelijkbaar met de traditionele informatie-analist (zie afb. 7.1).



Afb. 7.1 Ontwikkeling van kennisystemen [228].

### Keuze van het toepassingsgebied

Een kritisch onderdeel van de ontwikkeling van kennisystemen is de bepaling voor welke probleemgebieden de aanpak met kennistechniek geschikt is. Een verkeerde keuze kan leiden tot mislukking, omdat de beschikbare technieken tijdens de ontwikkeling ontoereikend blijken, of omdat de kosten van een voltooid systeem niet opwegen tegen de baten.

In deze paragraaf ligt de nadruk op de ontwikkeling van een eerste kennisysteem. Daarvoor is onderzoek nodig waarin de kennistechniek centraal staat. Uitgaande van de technische mogelijkheden zoekt men een probleemdomen waarin men een eerste prototype kan ontwikkelen. Uiteraard zal men later, wanneer de onderzoeksfase is afgesloten, uitgaan van de problemen en gewenste oplossingen en niet van de techniek.

In hoofdstuk 3 is reeds vermeld dat men met de ontwikkeling van kennisystemen streeft naar de toepassing van computers voor de oplossing van problemen die niet goed te structureren zijn. Kennissystemen zijn niet bedoeld als vervanging van statistische, boekhoudkundige of technische rekenprogramma's.

Goed gestructureerde problemen waarvan de oplossing in een algoritme kan worden vastgelegd, zullen het beste met traditionele programmatuur kunnen worden opgelost, tenzij het niet mogelijk is daarvoor meteen voldoende specificaties op te stellen.



Kennissystemen zijn vooralsnog ontoereikend voor problemen die de mens intuïtief oplost, of voor problemen waarvan de oplossingen zijn gebaseerd op de toepassing van gezond verstand of voortkomend uit groepsprocessen. Bovendien is het bij de bepaling van een toepassingsgebied van belang dat kennis en gegevens voldoende beschikbaar zijn en expliciet kunnen worden gemaakt. In Bijlage B van [3] is een lijst van aandachtspunten opgenomen.

Bij het bezien of een probleemdomein met kennistechniek kan worden benaderd, zullen ook de beschikbare middelen een belangrijke rol spelen. Hierbij moet niet alleen worden gedacht aan de middelen voor de ontwikkeling van het systeem, maar ook aan de middelen waarover men bij het praktisch gebruik en onderhoud kan beschikken. Een kennissysteem kan niet worden ingezet wanneer het probleemdomein krachtige apparatuur vergt en er slechts computers met beperkte capaciteit beschikbaar zijn.

## 7.2 Systeemontwikkeling en kennisverwerving

Voor de ontwikkeling van kennissystemen kan men gebruik maken van diverse methoden en technieken. In deze paragraaf worden vier methoden besproken. De meeste methoden zijn nog niet algemeen gangbaar, zodat men er in de praktijk eigen uitwerkingen aan geeft. In [229] worden enkele methoden vergeleken. De Werkgroep Expertsystemen heeft in 1987 drie methoden vergeleken [230] en was in 1988 bezig met onderzoek naar methoden voor de ontwikkeling van geïntegreerde kennis- en informatiesystemen.

De ontwikkeling van een kennissysteem verloopt in een aantal stappen. Eerst worden voor het probleem relevante kennis en werkwijzen, ook wel strategieën genoemd, verzameld. Vervolgens wordt de kennis geanalyseerd en in een model gerepresenteerd. Dit model vormt samen met een bijpassend mechanisme voor besturing en inferentie, gebaseerd op de gevonden strategieën, de kern van het kennissysteem. In de literatuur worden soms beide stappen gevat onder de naam *kennisverwerving*. Kennisverwerving eindigt dan met de ontwikkeling van een systeem waarin de verworven kennis is gerepresenteerd. In dit boek wordt de ontwikkeling van werkende kennissystemen als aparte stap onderscheiden die volgt op die van de verwerving, analyse en vastlegging in modellen van de kennis van experts, specialisten en gebruikers.

## Methoden

Kennissystemen worden meestal in projecten ontwikkeld. In grote trekken kunnen vier methoden worden onderscheiden. Zij bestrijken verschillende fasen in een project, sluiten elkaar niet uit en kunnen soms in combinatie worden gebruikt (zie tabel 7.1). De methoden verschillen zowel in het gebruik van kennisbronnen (zie de paragraaf technieken voor kennisverwerving) als in de methode van systeemontwikkeling.

Tabel 7.1 Methoden voor ontwikkeling van kennissystemen.

naam	voornaamste kennisbron	stysteemontwikkeling
conventioneel	handboeken, protocollen en gebruikers	
KADS	experts	niet uitgewerkt
'rapid prototyping'	experts	geïntegreerd met kennisverwerving
inductie	voorbeelden	automatisch

Met conventionele systeemontwikkeling wordt bedoeld dat het systeem wordt ontwikkeld aan de hand van vooraf opgestelde specificaties. Bij kennissystemen komen deze specificaties voort uit de kennisverwerving en de analyse van het domein. Bij '*rapid prototyping*' worden al prototypen ontwikkeld voordat het domein volledig is geanalyseerd.

Conventionele methoden worden vooral toegepast in technische domeinen met een traditie van overdracht van hoogwaardige empirische kennis in protocollen en handboeken. Daarbij ligt de nadruk op de vastgelegde kennis en oplossingsmethoden en niet op de experts die deze kennis hebben vastgelegd.

Deze beschikbare, reeds gestructureerde kennis is eenvoudig te vertalen in specificaties voor een kennissysteem. Zo'n systeem, bijvoorbeeld een handleiding voor de uitvoering van experimenten of voor de bediening van of het vinden van storingen in complexe systemen en apparaten, dient dan ter vervanging van traditionele handleidingen. Vaak zijn het de deskundige gebruikers zelf die hun dagelijkse ervaringskennis vastleggen in 'intelligente geheugensteuntjes'. Gebruikers kunnen zich na verloop van tijd de kennis van deze handleiding eigen maken en leren daardoor al doende werken met het betreffende systeem. Kennissystemen voor deze toepassingen worden



daarom vaak slechts tijdelijk ingezet, tot de kennis bij alle gebruikers aanwezig is.

KADS (Knowledge Acquisition and Documentation System) is een ESPRIT-project dat in Nederland vooral bekend is door de inbreng van de Vakgroep Sociaal-Wetenschappelijke Informatica van de Universiteit van Amsterdam. In dit project wordt een methode ontwikkeld, alsmede een aantal gereedschappen die deze methode ondersteunen [231, 232]. De nadruk bij deze methode ligt op zorgvuldige analyse van werkwijzen en kennis van experts. Daarbij wordt vooral gebruik gemaakt van hardop denken (zie technieken voor kennisverwerving). Analyse van de protocollen, waarbij gebruik wordt gemaakt van interpretatiemodellen van algemene taken, leidt tot specificaties voor het te ontwikkelen systeem. Deze interpretatiemodellen zijn ontwikkeld aan de hand van een classificatie van taken en kennisdomeinen, zoals diagnose, interpretatie enz. Daarbij worden objecten, kennisbronnen (operatoren) en strategieën onderscheiden.

In de praktijk is deze methode niet altijd toepasbaar, mede omdat er nog onvoldoende interpretatiemodellen zijn ontwikkeld. Varianten van KADS worden in Nederland vooral toegepast voor de ontwikkeling van systemen met een diagnostische taak. Ondersteuning bij de analyse van kennis en oplossingsmethoden bij ontwerptaken biedt KADS nog nauwelijks. Andere projecten en systemen op dit gebied zijn bijvoorbeeld ROGET [233], DETEKTR [234], KEATS [235], KREME [236], KRITON en AQUINAS [237]. In het kader van het StimuleringsProjectteam Informatica Nederland (SPIN) tracht men KADS verder uit te breiden [238].

'Rapid prototyping' wordt veel toegepast in de Verenigde Staten, ook bij de ontwikkeling van gewone informatiesystemen. Deze methode gaat uit van de snelle ontwikkeling van een prototype. Dit dient als model voor verdere analyse en kennisverwerving en als discussiestuk voor toekomstige gebruikers. Een belangrijke functie van dit prototype is de bevordering van communicatie tussen de betrokkenen. Het systeem groeit volgens deze methode in een aantal stappen, tot deskundigen en ontwikkelaars het eens zijn over juistheid en robuustheid.

Bij de ontwikkeling van kennissystemen volgens deze methode (de meest gehanteerde) worden dus proefversies van het systeem gebouwd voordat de analyse van het domein is voltooid. Men gaat daarbij uit van de veronderstelling dat het experimenteren met prototypen bij uitstek geschikt is om snel inzicht te krijgen in problemen en oplossingsstrategieën. Daarbij bestaat echter de kans dat de kennisanalist oplossingsstrategieën en kennis over het hoofd ziet.

De inductiemethode is afkomstig van Michie van het Turing Institute te Glasgow. Deze gaat uit van de veronderstelling dat 'intelligente' gereedschappen in staat zijn kennis af te leiden uit geselecteerde voorbeelden. Vooral voor eenvoudige classificatieproblemen kan deze methode snel tot resultaat leiden. Tot nu toe heeft deze methode als nadeel dat menselijke deskundigen soms weinig inzicht kunnen verkrijgen in de door de gereedschappen geïnduceerde kennisregels, zodat latere verfijning of uitbreiding door mensen niet altijd mogelijk is. Ook leiden veel inductietechnieken tot directe verbindingen tussen probleem en oplossing, zodat redeneringen in stappen niet mogelijk zijn. Dit kan problemen opleveren bij uitbreiding van het systeem. Er wordt echter veel onderzoek op dit gebied gedaan [239, 59, 240, 60].

In de praktijk zal meestal een tussenweg worden bewandeld. Volledige analyse is vaak niet mogelijk. Andersom biedt in veel gevallen het eerste prototype geen volledige afspiegeling van de functionaliteit van het uiteindelijke systeem, maar dient het veeleer als bewijs van de juistheid van de onderliggende ideeën en concepten.

Daarom wordt in veel projecten in eerste instantie het probleem in kaart gebracht, geanalyseerd en gemodelleerd, waarbij pas in tweede instantie aandacht wordt besteed aan oplossingsmethoden. Het zal duidelijk zijn dat de nadruk bij deze aanpak niet ligt op de vastlegging van zoveel mogelijk kennis van een expert. Veeleer gaat het om de constructie van een krachtig model van het probleemdomein. De inbreng van experts bestaat in dit stadium uit het wegwijs maken van de kennisanalisten in de literatuur en in de problemen van het domein. Ook wordt, vooral bij gebruik van KADS, veel aandacht besteed aan de terminologie van de expert, die wordt vastgelegd in een woordenboek. Pas wanneer het domein in een model is vastgelegd, worden experts te hulp geroepen om het model uit te breiden met heuristische kennisregels. Een systeem dat op zo'n model is gebaseerd, kan gemakkelijker worden uitgebreid dan een sterk op de oplossing gericht systeem. Wanneer het onderliggende model van het probleem compleet genoeg is, kan het ook dienen als diepe kennis waarop voor uitleg kan worden teruggevallen.

Zolang er nog geen algemene geldige methode voor de ontwikkeling van kennissystemen is, bieden de beproefde methoden voor de ontwikkeling van informatiesystemen een redelijk uitgangspunt. Zeker wanneer de verwachte integratie van kennis- en informatietechniek doorzet, zullen ook de ontwerpmethoden worden geïntegreerd. Daarmee zal de behoefte aan een afzonderlijke methode voor de ontwikkeling van kennissystemen verdwijnen.



### Technieken voor kennisverwerving

Geschreven materiaal zoals handboeken en protocollen kan worden gebruikt als bron van kennis voor de ontwikkeling van een kennisstelsel. Ervaren gebruikers van dit materiaal vormen een tweede mogelijke bron, die in de meeste gevallen minstens zo belangrijk is. Hun praktijkkennis is echter niet beschikbaar in geschreven vorm. De kennisanalist moet deze kennis afleiden uit hardop-denkenprotocollen, uit de antwoorden die experts en gebruikers op zijn vragen geven, uit analyse van hun handelingen bij het oplossen van problemen en uit analyse van hun commentaar op voorgelegde modellen en prototypen. Ook een bedrijfskundige analyse van industriële processen en werkwijzen kan bijdragen aan de specificatie van het te ontwikkelen systeem (zie bijv. par. 8.6).

Het afleiden van de kennis en de werkwijzen die experts hanteren bij het oplossen van problemen is een moeizaam proces. Naarmate experts meer competent zijn, zijn zij vaak minder in staat de kennis te beschrijven die zij bij het oplossen van problemen gebruiken [14]. Bovendien gebruiken veel experts een eigen jargon en hebben zij ook bijzondere perceptuele vaardigheden verworven. Een specialist ziet een röntgenfoto anders dan een student, een ervaren oefenmeester ziet in korte tijd meer details in de acties van zijn spelers dan een willekeurige toeschouwer. De beschrijving die een expert geeft, moet daarom worden vertaald naar een beschrijving die bruikbaar is voor anderen [241].

De expert zal een deel van de theoretische kennis die aan zijn handelingen ten grondslag ligt, zijn vergeten. In veel gevallen gebruikt hij geen formele kennis, maar is zijn handelen gebaseerd op door ervaring verworven intuïtie. Vaak wordt als kenmerkende eigenschap van experts gezegd, dat zij niet redeneren, maar weten. Daarvan hoeven zij zich niet bewust te zijn. Soms blijkt dat een expert verkeerde veronderstellingen heeft over zijn eigen denkproces. Wat een expert vertelt, geeft niet altijd de kennis weer die hij hanteert. Het is de taak van de kennisanalist de juiste kennis te vinden. In de praktijk krijgen experts die betrokken zijn bij de vastlegging van hun kennis in kennisystemen, door dit proces ook zelf beter inzicht in hun eigen kennis.

De dochter van een kennisanalist vraagt haar oma: 'Oma, hoe bak je toch zulke lekkere appeltaarten?'

Oma antwoordt, na enig gepeins: 'Ik ga naar de keuken, dan was ik mijn handen, vervolgens doe ik een schoon schort aan, en dan bak ik een lekkere appeltaart.'

In sommige gevallen speelt de expert niet de rol van voornaamste

kennisbron, maar die van referent. Hij voegt zijn kennis toe door kritische beoordeling van modellen en prototypen. Daarin kan kennis zijn vastgelegd die niet afkomstig is van experts, maar van andere bronnen, zoals gebruikers of bedrijfskundige analyse. Het doel is hierbij niet de vastlegging van zoveel mogelijk expertkennis, maar de ontwikkeling van een systeem dat de toets der kritiek kan doorstaan. Onder experts worden in dit geval ook specialisten gerekend, die het systeem toetsen en beoordelen zoals zij ook een collega, adviseur of medewerker zouden beoordelen. Deze aanpak biedt plaats voor inbreng van toekomstige gebruikers en wordt daarom ook steeds meer in de traditionele systeemontwikkeling toegepast.

In [242] worden vijf technieken voor de verwerving van kennis van experts onderscheiden. Één daarvan is gebaseerd op ondervraging, de andere vier op observatie. Ook in [243, 244] worden een aantal technieken en hun toepassing besproken. In de praktijk blijkt dat de wijze waarop kennis aan de expert wordt ontlokt voor een groot deel wordt bepaald door voorkeuren en karaktereigenschappen van kennisanalist en expert. Algemeen geldige methoden en technieken zijn nog niet beschikbaar. Volgens sommige auteurs is de voornaamste taak van de kennisanalist het enthousiasmeren van de expert, die immers zelden de initiatiefnemer is van de ontwikkeling van een systeem dat zal beschikken over zijn kennis. Het komt vaak voor dat de expert al doende gemotiveerd raakt en er zelfs een competitie plaatsvindt tussen expert en systeem, totdat het systeem voldoende competentie heeft bereikt.

Vaak wordt gekozen voor een combinatie van systematische ondervraging, observatie, hardop denken bij de uitvoering van taken, schaaltechnieken en andere technieken die veelal afkomstig zijn uit de psychologie. Een veel gebruikte techniek is de *protocolanalyse*. Gesprekken en uitgesproken gedachten van experts worden daartoe opgenomen en woordelijk uitgewerkt. Bij het hardop denken wordt de expert gevraagd zelf zijn handelingen te verklaren en de onderliggende gedachten zo goed mogelijk te structureren. Volgens [244] zijn hardop-denkcyclen vooral nuttig om de redeneerstrategieën van experts te vinden.

Kennisverwerving is een cyclisch proces waarbij het ontlokken van informatie en het daaruit reconstrueren van kennis elkaar afwisselen. Het proces wordt herhaald tot een bruikbaar model is gemaakt van de wijze waarop problemen in het beschouwde domein moeten worden opgelost en van de kennis die daarvoor nodig is. Recente inzichten en aanbevelingen over kennisverwerving zijn te vinden in [245, 241, 246].



### 7.3 Keuze van programmatuur en modaliteit

#### Programmatuur

De programmatuur waarover de ontwerper van een kennisysteem kan beschikken, varieert van programmeertalen tot ontwikkelomgevingen en voorgeprogrammeerde bouwstenen. De groeiende belangstelling voor de praktische toepassing van kennisystemen heeft de ontwikkeling van commerciële gereedschappen sterk gestimuleerd (zie bijlage). Sommige ontwikkelomgevingen beschikken over hulpmiddelen voor het opsporen van fouten, het genereren van programmatuur enz. Deze voorgeprogrammeerde faciliteiten kunnen de kennisanalist ontlasten en maken het mogelijk dat ook minder ervaren ontwerpers in betrekkelijk korte tijd een kennisysteem kunnen ontwikkelen. Hier staat tegenover dat naarmate de werking en de structuur van het kennisysteem meer zijn vastgelegd, het aantal domeinen waarvoor het gereedschap in aanmerking komt, afneemt. Eenvoudige kennisystemen kunnen worden ontwikkeld met behulp van 'lege kennisystemen' ('empty shells'), waarin alle componenten zijn voorgeprogrammeerd behalve het kennisbestand. De bruikbaarheid van lege systemen is beperkt, omdat problemen van enige complexiteit al gauw een afwijking van de 'ingebakken' inferentie-strategie vereisen en er dus kennis van kennistechniek nodig is om deze afwijkingen te kunnen realiseren. De meeste lege systemen bieden daartoe echter nauwelijks aanknopingspunten. Ook koppeling van kennisystemen aan andere systemen wordt vaak bemoeilijkt door toepassing van lege systemen.

Iedere soort gereedschap vereist een eigen werkwijze bij het gebruik. Voor de ontwikkeling van complexe systemen zijn krachtige gereedschappen nodig. Om daarmee te leren werken, kan men kiezen uit diverse cursussen en stages, die maanden in beslag kunnen nemen. Het gebruik van een klein leeg systeem dat draait op een microcomputer kan in enkele dagen worden geleerd. Daarmee kunnen echter geen complexe systemen worden ontwikkeld.

De huidige gereedschappen zijn nog niet zo ver ontwikkeld dat voor het maken van complexe systemen de inbreng van programmeurs overbodig is. In de meeste projecten wordt daarom een beroep gedaan op ervaren programmeurs die specifieke componenten op maat maken. Voor een deel betreft dit componenten die alleen een functie hebben tijdens de systeemontwikkeling, andere zijn bestemd voor de eindgebruiker. Een groot aantal van de eerste soort componenten, waaronder diverse hulpmiddelen en bouwstenen, is geïntegreerd in de geavanceerde omgevingen voor systeemontwikkeling die momen-

teel te koop zijn (zie bijlage). Maar voor het echte maatwerk blijven voorlopig programmeurs nodig.

### Modaliteit en uitleg

De *modaliteit* van een kennissysteem is de verschijningsvorm die samenhangt met de wijze waarop het systeem in een bepaalde omgeving moet functioneren. De modaliteit bepaalt hoe het systeem zich presenteert aan de gebruiker, de faciliteiten die worden geboden en de rol die het systeem daarbij speelt. Deze rol wordt vaak aangeduid in de benaming (adviesstelsysteem, intelligente assistent enz.). Het belangrijkste aspect van de modaliteit is de wijze waarop het kennissysteem de gebruiker ondersteunt. Daarbij is het *verschil in kennis* tussen systeem en gebruiker een belangrijke factor. Een systeem met veel meer domeinkennis dan zijn gebruiker, zoals een *docentsysteem*, dient zelf bij te houden wat de gebruiker weet en niet weet [1] en dient te beschikken over goede faciliteiten om de gebruiker uitleg te geven. Bij een *adviesstelsysteem* dat zijn gebruiker ondersteunt met hoogwaardig advies zijn deze faciliteiten minder essentieel en vaak in de praktijk niet ver uitgewerkt. Adviessystemen worden vooral ingezet als steun bij moeilijke gevallen. Deze systemen kunnen de rol spelen van een collega, bijvoorbeeld een specialist in een verwant domein. Heeft het systeem de modaliteit van *assistent*, dan kan het worden ingezet om deskundige gebruikers te ontlasten van routineproblemen. In dat geval heeft de gebruiker zelf een behoorlijke kennis van het domein en hoeft nog minder aandacht te worden besteed aan de inrichting van de communicatie tussen systeem en gebruiker. Assistentensystemen zijn te vergelijken met traditionele beslissingsondersteunende systemen, die de gebruiker bij een beslissingsproces stap voor stap helpen door de uitvoering van goed omschreven taken. Ook voorzetsystemen voor natuurlijke taal, kennissystemen als ingebouwde gebruiksaanwijzing in apparaten en 'intelligente' hulpsystemen hebben een dergelijke ondersteunende modaliteit. Een extra functie die bij al deze modaliteiten kan voorkomen, is die van *controleur*, die bijvoorbeeld functioneert als specialist die een voorgestelde werkwijze op volledigheid, consistentie of opvolgen van voorschriften beoordeelt.

De keuze van een bepaalde modaliteit heeft gevolgen voor de diepgang en de reikwijdte van de kennis in het systeem, de oplossingsstrategie en de wijze van communicatie met de gebruiker. In [241] wordt veel aandacht besteed aan de keuze van de juiste modaliteit aan de hand van een analyse van de werkwijzen van toekomstige gebruikers en de beschikbare kennis en oplossingsmethoden.

Van groot belang bij de ontwikkeling van een kennissysteem is ook de keuze van het moment waarop het systeem de gebruiker in het proces



van probleemoplossing moet ondersteunen. In sommige situaties zal het systeem al eerder dan de gebruiker met het probleem bezig zijn, bijvoorbeeld bij de besturing van continue processen. In andere gevallen roept de gebruiker het systeem pas te hulp wanneer hij er zelf niet meer uit komt. Bij diagnostische problemen is in het begin het aantal mogelijkheden zeer groot. Daarbij kan een oppervlakkig kennissysteem, met een grote reikwijdte en een beperkte diepgang, goede ondersteuning bieden bij de inperking van de mogelijke oorzaken. Wanneer eenmaal een diagnose is gesteld, is een diepere analyse nodig van de gevolgen van mogelijke ingrepen. Dan is er behoefte aan een systeem met een grote diepgang en een beperkte reikwijdte, bijvoorbeeld een systeem dat 'alles' afweet van een bepaald soort storing of component. Bepaling van het moment van ondersteuning dient te gebeuren in nauw overleg met de toekomstige gebruikers, waarbij wordt onderzocht hoe deze het probleem zonder en met systeem (zouden) oplossen.

Kennissystemen die hun gebruiker advies geven op het niveau van echte experts en ook in staat moeten zijn tot het geven van uitleg zoals een expert dat kan, hebben daarvoor veel kennis nodig. Behalve de oppervlakkige kennis voor probleemoplossing, is diepe kennis nodig voor uitleg. Omdat die diepe kennis in de meeste huidige kennissystemen ontbreekt, wordt in AI-laboratoria van veel universiteiten en onderzoeksinstituten gewerkt aan een tweede generatie, die minder beperkingen moet hebben dan de huidige (zie hoofdstuk 3). Vooral in de procesindustrie worden veel experimentele systemen voorzien van diepe kennis (zie par. 5.3).

De huidige techniek is vooral geschikt voor de ontwikkeling van kennissystemen die worden ingezet als assistent of adviserende collega. Ook de modaliteit van een expertsysteem is realiseerbaar, maar dan vooral in zeer beperkte domeinen, waar de adviezen weinig uitleg behoeven.

#### 7.4 Integratie in het bedrijf

Als een kennissysteem wordt ontwikkeld om niet-deskundigen te ondersteunen, kan de kennisanalist zich niet beperken tot analyse van de wijze waarop een expert de problemen oplost, maar moet hij zich ook verdiepen in de wijze waarop de gebruikers problemen oplossen zonder kennissysteem. De nadruk ligt dan niet op kennis en werkwijzen van experts, zo die al beschikbaar zijn, maar op analyse van de problemen bij de oplossing waarvan het kennissysteem een rol zal krijgen.

Daarom is het van belang dat de praktijkomgeving in het ontwerp wordt betrokken. Deze kan sterk verschillen van de laboratoriumom-

geving waarin het systeem in eerste instantie wordt ontwikkeld. Deze overweging heeft ook geleid tot toepassingen van kennistechniek waarbij niet de ontwikkeling van volledige, zelfstandige kennisystemen voorop staat, maar die van gebruikersvriendelijke voorzetsystemen en van informatiesystemen waarin kennisystemen zijn geïntegreerd. Uit deze integratie van kennis- en informatietechniek wordt een groot aantal toepassingen verwacht.

Aangezien in de meeste organisaties waar kennisystemen worden ontwikkeld reeds andere systemen worden gebruikt, ligt het voor de hand aansluiting te zoeken bij de gegevens en procedures die in deze systemen zijn vastgelegd. Uiteindelijk zijn kennisystemen, net als informatiesystemen, computertoepassingen. Om gebruik te kunnen maken van de reeds ontwikkelde systemen en vastgelegde gegevens zijn koppelingen nodig. Soms wordt ook gekozen voor volledige integratie van het kennisysteem in de omgeving waarin de andere systemen draaien. Daarvoor is het nodig dat het uiteindelijke kennisysteem draait op conventionele apparatuur onder het bijbehorende besturingssysteem.

Sinds 1987 zijn er steeds meer leveranciers die gereedschappen aanbieden waarmee dit kan worden gerealiseerd of waarmee kennisystemen meteen op conventionele apparatuur kunnen worden ontwikkeld. Daarom wordt voor de uiteindelijke versie van een kennisysteem in de industrie vaak gekozen voor herschrijven in een conventionele programmeertaal, zoals FORTRAN of C. Programma's in deze talen draaien op conventionele apparatuur ook meestal sneller dan programma's in LISP, zodat ook een operationeel voordeel wordt behaald. Verwacht wordt dat deze ontwikkeling zal doorgaan, waarbij de rol van speciale AI-werkstations, zoals LISP-machines, vooral zal komen te liggen bij ontwerp en ontwikkeling van prototypen. De ontwikkeling van het definitieve systeem zal steeds meer plaatsvinden op 'mainframes', mini- of microcomputers. Voor toepassingen waarbij geen grote hoeveelheden reeds vastgelegde gegevens of reeds ontwikkelde rekenprocedures nodig zijn, maar waar snelheid van het redeneren met grote kennisbestanden voorop staat, blijft een duidelijke plaats voor kennisystemen op AI-werkstations bestaan [239].

### Validiteit

Voordat een systeem in gebruik wordt genomen, dient het zorgvuldig te worden beproefd. Meestal wordt het pas vrijgegeven als het een groot aantal praktijkgevallen goed heeft opgelost. Toch is een dergelijke beproeving niet voldoende. Nadat een kennisysteem zijn uiteindelijke omvang heeft bereikt, is het vaak niet meer zo overzichtelijk en begrijpelijk dat de juistheid eenvoudig kan worden aangetoond. Het aantonen van de validiteit is echter essentieel, zeker als het



kennissysteem moet kunnen worden ingezet bij problemen waarvoor mensen nog geen oplossing hebben gevonden en waarmee geen gedocumenteerde praktijkervaring bestaat. Goed ontwerp en ontwikkeling volgens strikte richtlijnen dienen dan te worden aangevuld met controles achteraf.

Op diverse plaatsen worden hulpmiddelen ontwikkeld voor evaluatie en verificatie van kennissystemen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van bestaande technieken uit de 'software engineering' [247], maar ook van speciaal voor kennissystemen ontwikkelde verificatietechnieken (zie bijv. [248]).

Uit de traditionele automatisering is bekend dat alleen eenvoudige programmatuur zich leent voor mathematische bewijzen van correctheid. Controle achteraf kan niet alle fouten opsporen. Bovendien kan wel de aanwezigheid van fouten worden aangetoond, maar niet de afwezigheid. Worden bij de beproeving van een kennissysteem fouten geconstateerd, dan ontbreken meestal de gereedschappen om aan te geven of deze voortkomen uit een fout in het model of uit een programmeerfout. Voor controle achteraf is bovendien een gedetailleerde beschrijving van het systeem nodig, waaraan de uiteindelijke werking kan worden getoetst. Een dergelijke gedetailleerde specificatie wordt niet altijd opgesteld. Zeker wanneer een systeem bij stukjes en beetjes wordt ontwikkeld, wordt in de praktijk weinig aandacht besteed aan de documentatie van de werking. Programmeerfouten kunnen ten dele worden voorkomen door generatie en hergebruik van programmatuur. Vooral de object-georiënteerde programmeertechniek biedt daarvoor mogelijkheden (zie hoofdstuk 3). Ontwerpfouten zijn hiermee echter niet uit te sluiten.

## 7.5 Vier fasen van invoering

De ontwikkeling en invoering van een eerste kennissysteem in een bedrijf geschiedt in vier fasen:

*Oriëntatie.* Kennismaking met AI, kennistechniek en kennissystemen, literatuurstudie, bezoek aan symposia, organisatie van interne lezingen en inleidende cursussen.

*Onderzoek.* Organisatie-onderzoek en haalbaarheidsstudies. Afbakening van een geschikt probleemdomen en planning van activiteiten. Het opsporen en kiezen van kennisbronnen, verwerving en analyse van kennis, analyse van het probleemdomen, keuze van gereedschappen voor de ontwikkeling van een demonstratieprototype.

*Ontwikkeling.* In deze fase vindt de eigenlijke ontwikkeling van het kennissysteem plaats. Daarbij gaat het om een systeem dat echt zal worden gebruikt. Daartoe wordt het demonstratieprototype uitgebreid tot, of vervangen door een compleet systeem. Van groot belang

in deze fase is een praktijkproef van het complete systeem onder werkelijke gebruiksomstandigheden.

*Onderhoud.* Na invoering van het uiteindelijk systeem dient het te worden onderhouden. De kennis mag niet verouderen en ook andere aspecten die de bruikbaarheid kunnen beperken, dienen te worden herzien.

Aangezien het gaat om niet of slecht gestructureerde problemen, is het niet mogelijk, zoals bij traditionele informatiesystemen, analyse en ontwerp strikt gescheiden uit te voeren. Veeleer ligt een incrementele aanpak voor de hand, waarbij stukjes en beetjes van het domein aan deze activiteiten worden onderworpen. Daarbij vindt invoering in eerste instantie plaats in een laboratoriumomgeving. Zodra het laboratoriumprototype van het kennissysteem voldoende is ontwikkeld, kan het in de praktijk worden beproefd. Aan het einde van de ontwikkelingsfase wordt alles op maat gemaakt en worden de definitieve programmeertaal en apparatuur gekozen. De onderhoudsfase wordt in par. 7.6 apart behandeld.

Bij deze indeling is uitgegaan van een levenscyclus, vergelijkbaar met die van informatiesystemen [249]. Een van de grootste verschillen is het ontbreken van een strikte grens tussen ontwikkeling en onderhoud. Een kennissysteem is geen statisch geheel. Het dient samen te werken met mensen en machines en mee te veranderen wanneer deze veranderen. Zolang het leervermogen van kennissystemen nog niet vergelijkbaar is met dat van mensen, zal hun kennis periodiek moeten worden geactualiseerd. Verder is het voor een goede samenwerking met mensen essentieel dat het systeem kan worden afgestemd en aangepast aan de wensen van de gebruiker, die veranderen naarmate hij meer ervaring krijgt.

## 7.6 Gebruik, beheer en onderhoud

Bij de ontwikkeling van kennissystemen moet rekening worden gehouden met technische en organisatorische aspecten van invoering en gebruik. Kennissystemen vergen vooralsnog een grote capaciteit. Aangezien deze systemen voorlopig vooral zijn bedoeld voor individueel gebruik, is invoering op grote schaal afhankelijk van de beschikbaarheid van voldoende krachtige computers voor persoonlijk gebruik. Wil men op korte termijn tot invoering van kennissystemen overgaan, dan dient de uiteindelijke apparatuur zorgvuldig te worden gekozen.

De hoge ontwikkelingskosten van kennissystemen zijn slechts ge-



rechtvaardigd bij jarenlang gebruik of bij grote baten. Een en ander zal sterk afhangen van de mate waarin de gebruikers het systeem kunnen (laten) aanpassen aan hun eigen specifieke situatie. De gebruiker zal, zeker bij intensief gebruik, na verloop van tijd prijs stellen op het mogelijke gebruik van sluiptwegen, afkortingen en aanpassing aan de eigen werkwijze.

Kennissystemen bieden door hun structuur meer mogelijkheden voor aanpassingen dan traditionele systemen. Daarvoor dienen wel faciliteiten aanwezig te zijn die eenvoudig kunnen worden bediend. Daarom worden bij sommige systemen speciale gereedschappen ontwikkeld die de gebruiker kan toepassen voor onderhoud en kleine wijzigingen. Dit neemt niet weg dat de gebruiker voor grote aanpassingen een beroep moet kunnen doen op echte kennisanalisten.

Voortdurende aanpassing aan de veranderende werkelijkheid is essentieel voor de langdurige bruikbaarheid van systemen. Aangezien bij ontwikkeling met behulp van prototypen de overgang tussen ontwikkeling en onderhoud geleidelijk verloopt, kunnen sommige hulpmiddelen voor ontwikkeling ook tijdens het onderhoud worden gebruikt, mits ontwikkeling en gebruik plaatsvinden op dezelfde of vergelijkbare apparatuur. Omdat, net als bij conventionele systemen, niet kan worden gegarandeerd dat de oorspronkelijke bouwers ook steeds voor onderhoud beschikbaar zullen zijn, zijn goede documentatie en een begrijpelijke werking belangrijk. Bovendien moet de consistentie van de kennis na wijzigingen kunnen worden onderzocht. Dit stelt hoge eisen aan alle faciliteiten voor kennisverwerving en systeemontwikkeling.

### Kennisbeheer

Een van de problemen bij het onderhoud van kennissystemen is het ontstaan van nieuwe kennis. Mensen kunnen leren uit ervaring, maar dit gebeurt veelal niet in discrete stappen. Zolang er nog geen continue lerende kennissystemen zijn, dient de kennis in kennissystemen periodiek te worden bijgewerkt. Daarbij kan een taak zijn weggelegd voor *kennisbeheerders*, die nieuwe kennis signaleren en de samenhang met aanwezige, reeds in systemen vastgelegde, kennis controleren. Vastlegging en beheer van kennis is van toenemend belang voor het bedrijfsleven. Kennissystemen kunnen helpen de doelmatigheid en effectiviteit van het kennisbeheer te vergroten. Er moet echter al een organisatorische basis voor het beheer van kennis zijn voordat kennissystemen hiervoor zinvol kunnen worden ingezet. De belangrijkste aspecten hierbij zijn:

- vaste procedures voor vastlegging en onderhoud van kennis en de signalering van nieuwe kennis;
- de aanwezigheid van kennisbeheerders;

- de daadwerkelijke toevoeging van nieuw verworven kennis als duidelijk is dat hiermee het bedrijfsresultaat zal worden vergroot (ook als deze organisatorische en functionele veranderingen ten gevolge zou hebben).

Een bedrijf met een adequate organisatie voor kennisverwerving en -beheer kan ook zonder kennissysteem ervaringskennis beter benutten. Kennis voor eigen gebruik of gebruik door collega's kan voorlopig sneller op schrift worden gesteld dan vastgelegd in een kennissysteem. Schriftelijk vastgelegde kennis is echter niet goed toegankelijk voor effectief kennisbeheer. Het grote voordeel van kennissystemen tegenover traditioneel gedocumenteerde kennis is dat kennis dan sneller beschikbaar en direct operationeel is. Kennissystemen kunnen bovendien hun gebruiker 'actief' helpen bij de oplossing van problemen. In veel gevallen zullen kennissystemen daardoor de katalysator zijn die effectief kennisbeheer op gang brengt.

Het feit dat kennissystemen kennis operationeel maken, stelt bijzonder hoge eisen aan deze kennis en uiteraard ook aan kennisverwerving, -representatie en -onderhoud. Dit geldt vooral als deze systemen werknemers moeten ondersteunen die weinig ervaring hebben in de evaluatie van de adviezen van het systeem.

Het domein waarin een kennissysteem kan worden toegepast, is per definitie begrensd. Vaak berust de kennis over deze begrenzingen alleen bij de ontwerper. Het is nog niet goed mogelijk dergelijke metakennis in het systeem zelf onder te brengen. Er wordt veel onderzoek gedaan naar methoden voor het geleidelijk doen afnemen van de competentie van een kennissysteem aan de grenzen van zijn domein ('graceful degradation'), maar hiervoor bestaat nog geen standaardoplossing. Kennis over de toepasbaarheid van een systeem dient dus te worden overgedragen op de gebruiker, opdat deze het systeem niet toepast in domeinen waarvoor het niet geschikt is.

Vastgelegde kennis kan bovendien onvolledig of verouderd zijn. Het is niet ondenkbaar dat de autoriteit van een expert nog geldt terwijl zijn kennis al niet meer geheel opgaat. Aan ervaringskennis ligt bovendien theoretische kennis ten grondslag, waardoor de ervaringskennis slechts in een bepaalde context geldig is. Het is mogelijk dat de onderliggende diepe kennis tijdens de kennisverwerving niet volledig wordt gevonden. Als de context later verandert, kan de vastgelegde kennis ongemerkt ongeldig worden. Ook als men de context heeft kunnen vastleggen, blijft het een probleem dat men veranderingen in het bedrijf op tijd moet signaleren en de consequenties daarvan voor de kennisbestanden moet zien te vinden.

Het zal duidelijk zijn dat de invoering van kennissystemen hoge eisen stelt aan een goede organisatie voor kennisbeheer.



## Onderhoud

Bij systemen die op veel plaatsen worden gebruikt, is het ondoenlijk op alle lokaties deskundigen beschikbaar te houden voor onderhoud en aanpassing. In zo'n situatie dienen de systemen zelf over faciliteiten te beschikken of dient van een centrale afdeling uit regelmatig overleg met de gebruikers te worden gevoerd. Deze situatie is bekend uit de traditionele automatisering.

De wijze van onderhoud wordt bepaald door de mate waarin de gebruiker zelf actief kan of mag zijn. Wanneer de gebruiker het systeem louter als instrument gebruikt, kan niet worden verwacht dat hij een grote rol speelt bij het onderhoud. Wel kan een gebruiker in zo'n situatie signaleren wanneer het systeem uitbreiding of aanpassing behoeft. De kennisbeheerders hebben dan tot taak vast te stellen welke kennis in aanmerking komt om aan het systeem te worden toegevoegd. Het onderhoud zal dan centraal plaatsvinden. Deze werkwijze is vooral geschikt bij systemen met een groot aantal gebruikers; dan kan worden voorkomen dat er te veel versies van een systeem ontstaan.

Er zijn ook situaties denkbaar waarin de gebruiker een grotere rol krijgt bij beheer en onderhoud, bijvoorbeeld wanneer een systeem slechts één gebruiker heeft. Deze kan de beschikking krijgen over faciliteiten waarmee hij kleine wijzigingen zelf kan aanbrengen. In dat geval is periodieke toetsing de voornaamste taak van de kennisbeheerder. Groot onderhoud gebeurt centraal, maar tussentijdse aanpassingen kunnen, mits controleerbaar, decentraal plaatsvinden. De gereedschappen voor decentraal onderhoud dienen faciliteiten te bieden voor vastlegging van aard en tijdstip van de wijzigingen. In de praktijk blijken daarvoor grote hoeveelheden gegevens te moeten worden vastgelegd. Dit vormt een extra drempel voor de ontwikkeling van systemen die zonder tussenkomst van kennisanalisten hun kennis kunnen vermeerderen.

De keuze tussen centraal of decentraal onderhoud is niet alleen afhankelijk van het aantal gebruikers, maar ook van de complexiteit van het systeem, de beschikbaarheid van specifieke gereedschappen, de kennis van de gebruikers en het beleid van het bedrijf. Om invoerings- en onderhoudsproblemen te voorkomen, leveren de toekomstige gebruikers soms een of meer mensen aan de projectgroep die het systeem ontwikkelt. Dezen functioneren als junior-kennisanalist, die al doende wordt opgeleid en later zal zorgen voor beheer en onderhoud van het systeem [3].

Aangezien er in de praktijk nog weinig kennissystemen worden gebruikt, bestaat er nog weinig ervaring met onderhoud. Een systeem als XCON vereist een jaarlijkse onderhoudsinspanning die even groot

is als de inspanning tijdens de ontwikkeling in het begin van de jaren tachtig. Het systeem is inmiddels meer dan tien maal zo groot als de eerste versie. Bovendien is XCON aangevuld met een groot aantal kennissystemen op verwante gebieden (zie par. 4.2). De functionaliteit is daarmee in de loop der jaren sterk toegenomen, zodat eigenlijk geen sprake is van onderhoud, maar van stapsgewijze uitbreiding. Dankzij de structuur van het kennissysteem is dat tot nu toe steeds goed mogelijk gebleken. Dat kan van traditionele systemen niet worden gezegd.

Invoering en gebruik van kennissystemen gaan vaak gepaard met wijzigingen in organisatie en infrastructuur. Van Digital Equipment Corporation is bekend dat de invoering van de XCON-familie van kennissystemen grote consequenties heeft gehad voor de organisatie. Ook de invoering van PDS bij Westinghouse heeft geleid tot herziening van werkwijzen en organisatiestructuur (zie par. 5.2).



---

## 8. De aanpak in de Nederlandse industrie

### 8.1 Koninklijke/Shell Groep

De Koninklijke/Shell Groep omvat werkmaatschappijen in meer dan honderd landen en negen servicemaatschappijen die advies en andere diensten verlenen aan de werkmaatschappijen. Shell Internationale Research Maatschappij is de servicemaatschappij voor onderzoek en coördineert de activiteiten van twaalf exploratielaboratoria buiten de Verenigde Staten. De laboratoria specialiseren zich op specifieke terreinen waaronder productie, smeermiddelen, brandstoffen en chemicaliën, robotica en besturingseenheden, fabricageprocessen, biotechnologie en non-ferro metalen.

Onderzoek in de laboratoria wordt gefinancierd door de verschillende divisies zoals Exploratie en Productie, Chemicaliën, Raffinage, Marketing enz. Ook is er een post op de begroting voor 'corporate research' die wordt gebruikt als 'kiemgeld' voor het volgen van nieuwe technische ontwikkelingen.

#### Onderzoek naar kennissystemen

De sterke betrokkenheid van Shell bij alle aspecten van onderzoek leidde onvermijdelijk tot onderzoek naar kennissystemen. In 1981 gebruikte Shell een deel van het kiemgeld voor onderzoek naar kennissystemen. Dit onderzoek werd uitgevoerd in zes laboratoria en had twee doelen:

- uitvinden wat kennistechniek is en kan en wat de werking en de bruikbaarheid zijn;
- vaststellen of kennistechniek toepasbaar is voor het onderzoekgebied van de afzonderlijke laboratoria.

In een van de laboratoria, het Koninklijke/Shell Exploratie en Productie Laboratorium (KSEPL) te Rijswijk, werd een speciale groep opgezet om te fungeren als centrum van deskundigheid. Twee medewerkers van het KSEPL waren een jaar aan Carnegie-Mellon University verbonden. De meeste anderen hebben bij de Carnegie Group cursussen KNOWLEDGE CRAFT gevolgd of speciale opleidingen gevolgd bij het Massachusetts Institute of Technology. In 1987 waren bij het KSEPL acht medewerkers en enkele studenten bezig met de ontwikkeling van kennissystemen.

Het evaluatieprogramma duurde ongeveer drie jaar en resulteerde in positieve conclusies. Als voornaamste voordelen van het gebruik van kennissystemen zag Shell behoud en verspreiding van deskundigheid, alsmede verhoging van de produktiviteit en van de mogelijkheden van deskundigen. Er werd een terugverdienperiode van ongeveer een jaar verwacht. Ook werd geconcludeerd dat kennissystemen voordelen zouden bieden voor Shell-activiteiten die voldoen aan deze criteria:

- het gebied van toepassing moet technisch rijp zijn (een kennissysteem is geen vervanging voor kennis);
- de deskundigheid moet beschikbaar zijn;
- de taak die het systeem moet uitvoeren, moet repetitief van aard zijn en een expert minstens een paar uur in beslag nemen.

Zelfs als aan deze voorwaarden wordt voldaan, verdient een algoritmische oplossing toch nog de voorkeur als expertkennis in het op te lossen probleem een ondergeschikte rol speelt.

### Projecten

Al tijdens de evaluatie zijn de Shell-laboratoria begonnen met diverse projecten. In totaal zijn dat er een kleine honderd. Het eerste kennissysteem werd van 1982 tot 1985 in Engeland ontwikkeld in samenwerking met het Turing Institute te Glasgow. Dit systeem is inmiddels operationeel en helpt bij de selectie van herbiciden. In 1987 waren enkele volgende systemen gereed voor beproeving door gebruikers.

De meeste projecten in de onderzoekcentra zijn wetenschappelijk en technisch. De toepassingen variëren van procesbewaking en ontwerpen van produkten tot voorzetsystemen voor reeds bestaande programmatuur voor simulatie en analyse. De Information and Computing Service, een administratieve servicemaatschappij, ontwikkelt een aantal kleine systemen op commercieel gebied. Deze worden in enkele maanden tijd ontwikkeld met behulp van lege systemen ('shells') en microcomputers. In de loop van 1986 waren er ongeveer twintig systemen in ontwikkeling voor toepassingen zoals 'cash flow', belastingen en projectplanning.

Het KSEPL voert zo'n tien projecten uit op het gebied van exploratie en produktie van olie en gas. Het grootste systeem (MENDEL/LOGIX) is ontworpen voor petrofysici die olie- en gasvoorkomens beoordelen. Twee medewerkers van het KSEPL begonnen in 1984 aan dit project als stagiaires aan Carnegie-Mellon University. Het systeem is diverse malen herschreven, waarbij de kennis steeds verder werd gestructureerd. MENDEL is ontwikkeld in OPS5 op diverse VAX-machines en daarna voor beproeving in de praktijk herschreven in FORTRAN. Daardoor nam de snelheid een factor honderd toe. GEOLOGIX dient als voorzetsysteem voor MENDEL en moet het



geologen gemakkelijker maken dit systeem te gebruiken. Een ander voorzetsysteem (RESSIX) helpt bij het gebruik van simulatieprogrammatuur. Het is geschreven in COMMON-LISP op een SYMBOLICS en een VAX en daarna herschreven in C. Het systeem zal draaien op een VAX, die dient als voorzetmachine voor de CRAY-1 waarop het eigenlijke simulatieprogramma draait. Dit systeem heeft met enige andere geleid tot de ontwikkeling van GENIX, een leeg systeem dat in verschillende talen op diverse computers kan draaien. GENIX wordt ook buiten het KSEPL toegepast.

Het Koninklijke/Shell Laboratorium Amsterdam (KSLA) werkt aan een aantal middelgrote systemen, waaronder een voor de interpretatie van de uitvoer van een lineair programmeringsmodel.

In Engeland is Shell actief in enkele ALVEY-projecten. Een van die projecten is de ontwikkeling van een systeem voor de samenstelling van onder andere smeeroliën en landbouwchemicaliën.

In Frankrijk wordt gewerkt aan de ontwikkeling van kennissystemen voor procesbesturing en voor interpretatie van alarmsignalen in de fabricage. Andere systemen geven advies over brandstoffen en over corrosie in raffinaderijen.

### Gereedschappen

Na een tussentijdse evaluatie van twintig projecten werd gekozen voor SYMBOLICS 3600 LISP-machines als standaardapparatuur voor de ontwikkeling van kennissystemen. Voor grote systemen is de standaardontwikkelomgeving KNOWLEDGE CRAFT. ART en KEE bleken voor grote systemen minder geschikt. Daarnaast worden diverse programmeertalen gebruikt, waaronder LISP, PROLOG, FORTRAN, PASCAL en C.

Het is de bedoeling dat de meeste systemen uiteindelijk zullen draaien op conventionele apparatuur zoals VAX-en. Daarvoor worden ze geconverteerd naar C of FORTRAN. Voor de ontwikkeling van kennissystemen blijft Shell echter de voorkeur geven aan SYMBOLICS en KNOWLEDGE CRAFT. In 1986 waren in Rijswijk reeds vier SYMBOLICS geïnstalleerd.

### Toekomstverwachtingen

In 1987 waren diverse systemen klaar voor beproeving in de praktijk. Ook waren reeds enkele systemen in gebruik. Bij een van deze systemen is een terugverdientijd geconstateerd van enkele maanden, zowel door verhoging van de doelmatigheid als door toename van de produktiviteit. Na 1987 zal de nadruk liggen op grote systemen, omdat Shell van deze systemen de grootste opbrengsten verwacht. Ook parallelle systemen zullen aandacht krijgen in het onderzoek.

Buiten de onderzoekcentra neemt het vertrouwen in kennistechniek eveneens toe. Werd de ontwikkeling van kennissystemen in 1985 en 1986 nog bijna geheel gefinancierd uit het 'corporate research'-budget voor kiemgeld, in 1987 en 1988 wordt van het tweemaal zo hoge budget meer dan de helft opgebracht door werkmaatschappijen.

Shell verwacht dat in 1990 in een derde deel van al zijn grote informatiesystemen een kennissysteem zal zijn geïntegreerd en dat dat in 2000 voor alle Shell-systemen het geval zal zijn. Kennistechniek zal daarmee geen speciaal vakgebied meer zijn, maar deel uitmaken van systeemontwikkeling in het algemeen.

Een uitgebreide (Engelstalige) weergave van de activiteiten bij Shell, waarop dit overzicht mede is gebaseerd, is te vinden in [250].

## 8.2 Hoogovens Groep

Bij Hoogovens Groep werken ongeveer 30.000 mensen in de divisies Staal, Aluminium, Industriële Toelevering, Technische Dienstverlening, Handel en Deelnemingen.

In 1984 vond een inventarisatieronde op het gebied van kennissystemen plaats. Daarna is van de oprichting af deelgenomen in de Industrial Expert Systems Club van Sira in Engeland. Sinds 1985 is er een Werkgroep Expertsystemen. Afdelingen verantwoordelijk voor automatisering, onderzoek en nieuwbouw uit het Staalbedrijf IJmuiden, HAS-Nederland en de Centrale Staf nemen hieraan deel. De leden van deze werkgroep hebben zich op het vakgebied georiënteerd door bestudering van literatuur, symposiumbezoek en contacten met universiteiten en bedrijven, waaronder Sira, Battelle, de Technische Universiteiten Delft en Eindhoven, de Rijksuniversiteit Leiden, de Universiteit van Amsterdam, DAF Trucks, Shell en de leveranciers SPL (nu Systems Designers), Lithp Systems, Bolesian Systems, CPP en Tektronix. Aangezien de meeste andere industriële bedrijven in Nederland ook nog in de oriënterende fase verkeerden, kon daar weinig hulp worden gevonden.

Na de eerste oriëntatie besloot men te beginnen met een aantal proefprojecten. De verwachting was dat het inzicht in de bruikbaarheid van kennissystemen zou worden vergroot en dat demonstratieprototypen de voordelen van kennissystemen zouden kunnen tonen. Uit diverse budgetten is een bedrag van enkele tonnen bijeengebracht voor de ontwikkeling van twee proefsystemen. Gekozen werd voor diagnose van produktiestoringen in een koudwals (het project CRASHLOG) en diagnose van storingen aan een informatiesysteem voor opslag en verzending van produkten. Beide projecten zijn uitgevoerd door studenten, begeleid door deskundigen van Hoogovens. Daarbij is gebruikt gemaakt van advies, methode en gereedschappen van Lithp Systems.



De eerste ervaringen bij Hoogovens leerden dat de meeste leveranciers zich in de verstrekking van informatie beperkten tot de werking van hun eigen produkten. Ter voorbereiding van het overleg met leveranciers over keuze van gereedschappen en mogelijke samenwerking in projecten werden daarom selectiecriteria van gereedschappen verzameld, zoals:

- goede ondersteuning door de leverancier;
- zoveel mogelijk faciliteiten voor kennismanipulatie;
- lage prijs;
- bruikbaarheid op beschikbare apparatuur.

Na onderzoek van de gereedschappen DELFI, ACQUAINT, KES, APES en SAGE (zie bijlage) is gekozen voor ACQUAINT, waarvan de leverancier bereid bleek de projecten intensief te begeleiden.

Doel van de eerste projecten was het vergroten van inzicht door het opdoen van eigen ervaring. Daarom is de studenten die de projecten uitvoerden, gevraagd de prototypen goed te documenteren. Ook vonden regelmatig voortgangsbesprekingen plaats. De projecten werden na elkaar uitgevoerd.

### Het project CRASHLOG

In het project CRASHLOG werd een prototype ontwikkeld voor diagnose van produktiestoringen bij een koudwals. Het doel was:

- onderzoek naar bruikbaarheid van kennissystemen;
- ervaring opdoen met ontwikkeling;
- aantonen van bruikbaarheid aan bedrijfsleiders en gebruikers.

Verwacht werd dat toepassing van diagnosesystemen een grote kans zou maken en dat deze systemen daarom een grote demonstratiewaarde zouden hebben. Ook was er een expert op dit gebied beschikbaar. Behalve de externe adviseur had geen van de vijf betrokkenen ervaring met de ontwikkeling van kennissystemen. Allen waren deeltijds beschikbaar. Gezien de korte termijn waarop de student zou afstuderen, is enigszins overhaast begonnen. Nadat de student relevante handboeken had bestudeerd, heeft hij de experts onderzocht en de protocollen geanalyseerd. Daarna werd een aantal prototypen gebouwd. Na verloop van tijd werden ook gebruikers bij het project betrokken om te helpen bij de ontwikkeling van het gebruikersinterface. Daaraan werd veel aandacht besteed. De ontwikkeling van het demonstratieprototype kostte zes maanden, waarin 800 manuren ontwikkeling, voornamelijk van de student en 200 manuren ondersteuning. De totale kosten van de ontwikkeling van het systeem waren ca. f 60.000. Het prototype zal niet worden uitgebouwd tot een operationeel systeem; daarvoor zou koppeling met een gegevensbestand nodig zijn. Een dergelijke investering kon eind 1987 onvoldoende worden gemotiveerd.

### Het tweede project

Het tweede project had hetzelfde doel als het eerste. Na vijf vraaggelbesprekken met de experts werd een systeem gebouwd dat storingen simuleerde van een informatiesysteem voor opslag en verzending van een gereed produkt. Aan de hand van de werking van dit systeem verwierf men ook kennis over de werkwijzen van de experts bij het oplossen van storingen. Aan de hand van de methode 'model oriented prototyping', gebaseerd op de inzichten van Wielinga (zie hoofdstuk 7), is vervolgens in acht maanden een demonstratieprototype gebouwd. Daaraan is ongeveer één manjaar aan ontwikkeling besteed. De totale kosten voor dit systeem bedroegen ca. f 150.000. Er is geen inbreng geweest van gebruikers. De nadruk in dit project lag op de interpretatie van kennis. Voor ondersteuning van de gangbare werkwijzen was apparatuur nodig die op dat ogenblik niet beschikbaar was. Het project heeft de aandacht opnieuw gevestigd op de taakverdeling tussen eerste- en tweedelijns onderhoud. Als resultaat daarvan zijn werkinstructies voor de betreffende medewerkers opgesteld.

### Het derde project

Het doel van dit project was operators te adviseren over de distributie van gassen. Hoogovens produceert namelijk een aantal energierijke gassen als nevenprodukt van de staalfabricage. De operators van het energieverdelingscentrum van Hoogovens verdelen deze gassen tussen de eigen fabrieksinstallaties en een centrale van het Provinciaal Energiebedrijf Noord-Holland. De distributie moet de veiligheid van het gasleidingnet waarborgen en economisch optimaal zijn.

Het project is gekozen uit het informatieplan van de afdeling Energie van Hoogovens, waar men behoefte had aan een dergelijk adviessysteem. De problematiek rond dit onderwerp scheen zich goed te lenen voor het bouwen van een kennissysteem. Er was voldaan aan een aantal condities waaraan volgens ingewijden de omgeving moet voldoen om een kennissysteem te doen slagen. Dat waren:

- via algoritmen en mathematische modellen lukt het niet te komen tot advies over een optimale verdeling;
- er is een zeer ervaren operator aanwezig en beschikbaar;
- de operator heeft een diagnostische taak;
- er worden in de praktijk vuistregels, grove schattingen en onzekere verwachtingen gehanteerd.

De geringe beschikbaarheid van studenten in de eerste projecten en de inmiddels gesignaleerde behoefte aan ervaring met automatiseringsprojecten in een industriële omgeving deden de voorkeur uitgaan naar inzet van eigen mensen. Het project werd in vijf maanden afgerond.



In een presentatie na afloop van het project reageerden bedrijfsleiding en gebruikers positief, vooral omdat de nadruk lag op de wijze waarop een operator het proces bekijkt.

Een eerste prototype is in 1987 door HAS gedemonstreerd op de Efficiency Vakbeurs. Na op handen zijnde wijzigingen in de bedrijfsvoering wordt een volledig systeem ontwikkeld.

### Het vervolg

Als vervolg op deze projecten zal Hoogovens zich verder oriënteren. Naast het bestuderen van literatuur en het volgen van ontwikkelingen bij anderen doet Hoogovens mee aan gezamenlijke proefprojecten, zoals op het gebied van storingsdiagnose in de staalfabricage volgens het converter-proces. Dit project is door British Steel geïnitieerd in het programma van de Industrial Expert Systems Club van Sira in Engeland.

Doelstellingen en werkplan van de werkgroep worden heroverwogen en bijgesteld. Hoogovens concludeert dat het invoeren van kennissystemen een vorm van automatisering is, waarbij in het bedrijf aanwezige automatiseringservaring zal moeten worden ingezet. Materiedeskundigheid van de kennisanalist bleek noodzakelijk voor een doelmatige aanpak. Het bleek mogelijk met een investering van ongeveer een half manjaar prototypen te ontwikkelen die een redelijke indruk gaven van de toepasbaarheid van een kennissysteem in het gekozen toepassingsgebied. Met het aldus verworven inzicht konden de direct betrokkenen bij de storingsdiagnose uit het tweede project de taakuitvoering verbeteren zonder direct een kennissysteem te bouwen.

### 8.3 Akzo

Akzo is een internationaal bedrijf, bestaande uit zes divisies met een groot aantal werkmaatschappijen. In totaal werken er 65.000 mensen. De automatisering is gedecentraliseerd. Systeemontwikkeling vindt bij de divisies plaats. Onderzoek gebeurt bij de divisies en centraal bij Akzo Data Services. Stafafdelingen, werkmaatschappijen en het adviesbureau Akzo Systems ontwikkelen en ondersteunen de automatisering. De afdeling Akzo Computer Zaken heeft een coördinerende taak. De Computer Systems Managers van de divisies hebben regelmatig overleg met de automatiseerders in de werkmaatschappijen en stafafdelingen.

In 1985 ontstonden de eerste concrete plannen voor kennissystemen en besloot men de eerste systemen te ontwikkelen. Dit gebeurde in het Akzo Research Laboratorium samen met enkele produktdivisies. De

initiatiefnemer van Akzo Research werd benoemd tot aanspreekpunt voor kennissystemen met als taak de uitwisseling van informatie te stimuleren.

Voor een uitgebreide oriëntatie op kennissystemen volgde men bij Akzo in 1986 en 1987 opleidingen en voerde men kleine projecten uit, waarvan zes in 1987. In een daarvan waren reeds prototypen ontwikkeld, de andere waren nog in de beginfase.

### Het eerste project

Een van de eerste projecten moest leiden tot een systeem dat adviseert bij de keuze van plastics op grond van produktspecificaties. Bij de ontwikkeling van een prototype werden studenten informatica van de Landbouwniversiteit Wageningen en de Technische Universiteit Delft ingeschakeld. De kosten van het project werden gedragen door Akzo Computer Zaken, Akzo Research en de betreffende divisie. Men ontwikkelde het systeem in eerste instantie op apparatuur die Akzo huurde van de firma WestMount Technology. Omdat het systeem uiteindelijk was bedoeld voor verkopers, diende het te draaien op een microcomputer. De ontwikkeling zou plaatsvinden op een werkstation, waarbij men gebruik maakte van de ontwikkelomgeving KES, die op beide computers werkt. Men ontwikkelde een prototype van het systeem tussen juni 1986 en juni 1987, dat in de loop van 1987 door enkele experts werd beproefd.

### Andere projecten

Een tweede project, over een systeem voor de selectie van beschermende lagen, was analoog aan het eerste. Een student van de Technische Universiteit Delft moest de kennis van een expert die vervroegd met pensioen zou gaan, vastleggen in een prototype.

Andere projecten hebben onder andere betrekking op onderzoek naar de toepasbaarheid van kennissystemen bij diagnose en besturing van processen, kwaliteitsbewaking en een inhoudelijke bijdrage aan een ESPRIT-project over vloeistofchromatografie.

Behalve bij de genoemde universiteiten heeft Akzo ook inlichtingen over kennissystemen ingewonnen bij Shell, Philips, WestMount Technology en de Werkgroep Expertsystemen Asi.

Na een interne presentatie besloot men tot een inleidende cursus voor mensen die betrokken waren of zouden zijn bij de ontwikkeling van kennissystemen bij Akzo. De cursus werd georganiseerd in samenwerking met een extern bureau (AITTB te Amsterdam) en voor een belangrijk deel gefinancierd uit een regionale overheidssubsidie. De cursus bestond uit twee delen. Twaalf mensen volgden het eerste deel, dat inleidend en op de praktijk gericht was. Zes hiervan volgden ook



het tweede meer fundamentele deel, waarin werd ingegaan op enkele methoden en waarin werd geëxperimenteerd met diverse gereedschappen. Beide delen duurden 14 dagen.

### **Gereedschappen en systeemontwikkeling**

Er is nog geen keuze gemaakt voor standaardgereedschappen. Tot nu toe is ervaring opgedaan met een groot aantal uiteenlopende gereedschappen en zijn twee werkstations (APOLLO en VAX WORKSTATION 2000) aangeschaft. De genoemde projecten zijn ontwikkeld met KES. In de cursus is gewerkt met PERSONAL CONSULTANT, SMALLTALK, LISP en PROLOG. Bij een van de divisies wordt ook gebruik gemaakt van een kant-en-klaar kennissysteem, LHASA, dat wordt ingezet bij de planning van organische synthese van farmaca.

Het waren voornamelijk studenten die de prototypen ontwikkelden; zij werden daarbij begeleid door domeindeskundigen uit de divisies en deskundigen van Engineering en Research. Er waren geen problemen bij de samenwerking tussen de experts en de als kennisanalist optredende studenten. De kennisanalisten hadden zich grondig voorbereid op de gesprekken met de experts, onder andere door literatuurstudie. Daarbij was het waarschijnlijk voordelig dat het toekomstige ingenieurs waren. Een van de conclusies was dat de kennisanalist minstens zoveel domeinkennis dient te hebben als de gebruiker voor wie hij een systeem ontwikkelt.

### **Beleid**

Na de geschetste brede oriëntatie is Akzo in 1987 begonnen met de formulering van beleidspunten. Voor een verdere oriëntatie en het in huis halen van kennis werd in 1987 samengewerkt met externe bureaus, universiteiten (o.a. de Universiteit van Leuven) en leveranciers (o.a. Lithp Systems).

## **8.4 Unilever**

In het Unilever Research Laboratorium te Vlaardingen heeft de Centrale Stafafdeling Informatie, Computing en Communicatie in 1987 een afdeling voor kennissystemen opgezet. In deze afdeling van drie personen worden kleine projecten uitgevoerd voor diverse Unileverbedrijven.

Unilever is in Nederland voorzichtig begonnen. De eerste belangstelling voor AI was al in de jaren zeventig gesignaleerd, maar de eerste kleine projecten vonden in Nederland in 1986 plaats.

De betrokkenen hebben informatie ingewonnen uit literatuur, sympo-

sia en contacten met andere laboratoria van Unilever, met name die in Port Sunlight in Engeland. Daar werkt men al sinds het begin van de jaren tachtig aan kennissystemen. Een succesvol systeem uit Port Sunlight helpt chemisch analisten bij de uitvoering van weinig voorkomende analyses waarmee de meeste analisten weinig ervaring hebben, maar die op zich niet erg complex zijn.

Evenals bij de ontwikkeling van traditionele informatiesystemen, maakt Unilever bij kennissystemen veel gebruik van prototypen. Voorlopig is gekozen voor gebruik van eenvoudige gereedschappen (lege shells) en uitvoering van kleine projecten.

De eerste twee projecten hadden beide tot doel het behoud van de kennis van een vertrekkende expert. In een daarvan fungeerde een afstudeerder van de Technische Universiteit Delft als kennisanalist, in het andere project een eigen medewerker van Unilever. De projecten werden betaald uit het algemene budget van het Research Laboratorium.

De resulterende demonstratieprototypen kregen uiteenlopende reacties. In één geval bleek de verworven kennis zeer beperkt in omvang. In het andere project was in de beginfase onvoldoende stilgestaan bij de afbakening van de toepassing, zodat tijdens het project niet duidelijk was wie de gebruikers van het systeem zouden moeten zijn. Om teleurstellingen in vervolgprojecten te voorkomen, werkte men daarna voornamelijk in opdracht van gebruikers en besteedde men veel aandacht aan analyse van de gebruikersorganisatie en de communicatie tussen expert(s) en kennisanalist.

De ervaringen bij Unilever wijzen uit dat vijf deskundigheden nodig zijn voor de ontwikkeling van nuttige kennissystemen. Ervaring met kennisanalyse, computerkennis, methodologische kennis, domeinexpertise en de ervaring van gebruikers zijn noodzakelijk gebleken. Deze deskundigheden hoeven niet in één persoon verenigd te zijn, maar ervaring en persoonlijkheid van de kennisanalist zijn van groot belang gebleken. Een kennisanalist zonder kennis van het domein waarin een systeem wordt ontwikkeld, krijgt grote problemen bij de verwerving van kennis door communicatie met experts. De afstudeerder in het eerste project bleek bijvoorbeeld wel computerkennis en ervaring met kennisanalyse te hebben, maar vooral de communicatie met experts en gebruikers verliep soms moeizaam door zijn gebrek aan domeinkennis en ervaring.

Het Unilever Research Laboratorium denkt niet in de eerste plaats aan toepassingen voor eigen intern gebruik. Kennissystemen zullen worden ontwikkeld voor gebruikers bij de bedrijven. Voor de ontwikkeling van systemen voor daadwerkelijk gebruik geeft Unilever bij voorkeur de projectleiding in handen van een gebruiker. Ook wordt pas aan een project begonnen wanneer gebruikers daarom



vragen. Men was eind 1987 niet van plan de techniek te gaan uitdragen. Ook zal het Research Laboratorium geen haalbaarheids-onderzoek doen als gebruikers daar niet om vragen. Valse verwachtingen worden op die manier voorkomen.

## 8.5 DSM

DSM is een internationaal opererend chemisch concern met een personeelbezetting van 27.000 mensen waarvan ongeveer 11.000 in Limburg. De ontwikkelingen op het gebied van kennissystemen zijn nauwlettend gevolgd. Een medewerker van de stafafdeling ISA (Informatie Systemen en Automatisering) heeft door zelfstudie, het bezoeken van beurzen en seminars en deelname in de Werkgroep Expertsystemen kennis over dit vakgebied opgebouwd. Op grond van deze oriëntatie is gekozen voor een geleidelijke aanpak. Daarbij bleek de acceptatie van kennistechniek te worden bevorderd door bijdragen van deskundigen uit het toepassingsgebied dat voor DSM interessant is, de chemie. Zo hebben enkele Belgische hoogleraren inleidende lezingen gehouden over kennissystemen in de chemie. Deze lezingen hebben bijgedragen tot beter begrip voor kennistechniek. Uit twintig projectvoorstellen werd slechts een klein aantal geselecteerd. In de meeste gevallen bleken de divisies niet meteen bereid een dure expert beschikbaar te stellen. Het aantal betrokkenen is daardoor beperkt gebleven.

In een eerste project ontwikkelde een student een prototype van een kennissysteem voor diagnose van een proces bij de fabricage van zwavelzuur. De keuze van gereedschappen werd bepaald door de standaardapparatuur waarop bij DSM reeds werd gewerkt. Daarom is gekozen voor een MICROVAX van DEC en de ontwikkelomgeving KES, geleverd door WestMount Technology. De kosten voor de ontwikkeling van een prototype bleven onder de twee ton, waarvan 80% personele kosten en 20% apparatuur en programmatuur. De kosten werden voor de helft opgebracht uit een concernbudget, de andere helft was afkomstig van de stafafdeling ISA. De bereidheid van produktdivisies tot investeren was nog gering. Vooral de tijd van experts is duur. Toch bleek langdurige samenwerking van kennisanalist en expert onmisbaar. Kennisanalisten konden weliswaar veel kennis vinden in geschreven bronnen, maar deze kennis was onvoldoende voor de ontwikkeling van een systeem.

De ervaring met dit proefproject was dat de techniek voor de bouw van kennissystemen voldoende ver is ontwikkeld om bedrijfsmatig te kunnen worden ingezet. Een van de kritische succesfactoren bleek de 'sociale intelligentie' van de kennisanalist te zijn.

Met de Universiteit van Leuven wordt samengewerkt aan de ontwik-

keling van een kennissysteem voor een waterzuiveringsinstallatie met een capaciteit van 1 miljoen inwonerequivalenten. Aan de werkgroep nemen medewerkers van DSM Research en Ontwikkeling, DSM-operators en studenten uit Leuven deel. De resultaten waren eind 1987 zeer hoopgevend. Een tweede project wordt voorbereid op het terrein van energiegebruik.

De stafafdeling ISA heeft materiaal verzameld dat kan worden gebruikt voor beslissingen over investeringen in de ontwikkeling van zinvolle kennissystemen. Aangezien ontwikkeling van een bruikbaar systeem veel duurder is dan ontwikkeling van een prototype en aangezien een bruikbaar systeem nooit af is, zijn behoorlijke investeringen nodig.

Samenvattend mag worden gesteld dat DSM de oriëntatiefase achter de rug heeft. Voor de invoering en ontwikkeling van kennissystemen is een geleidelijke aanpak gekozen. Deze aanpak sluit aan bij de bedrijfscultuur en maakt de opbouw van een eigen groep kennisanalisten mogelijk door opleiding van geschikte medewerkers en het aantrekken van externe deskundigen. Gelet op de gekozen aanpak zal de verspreiding van deze nieuwe kennistechniek voorlopig geleidelijk blijven gaan.

## 8.6 Papierindustrie

De Nederlandse papierindustrie beleeft, na een periode van sanering in de jaren zeventig, opnieuw een bloeiperiode. Deze gaat gepaard met een sterke toename van de investeringen. Bij nieuwbouw of vernieuwing van papiermachines wordt aandacht besteed aan verbeterde procesbeheersing. Bij moderne apparatuur wordt een groot deel van de besturing van het proces ingebouwd in procescomputers en PLC's (Programmable Logic Controller). Het gevolg hiervan is dat de operator slechts hoeft in te grijpen bij storingen die door de besturingsapparatuur niet kunnen worden gecorrigeerd. Daardoor doet hij weinig ervaring op met dagelijkse procesinstellingen en bijsturingen en met het verhelpen van storingen. Deze ervaring is wel aanwezig bij operators die nog hebben gewerkt aan machines zonder procescomputers. Hun kennis en ervaring zijn voor een papieronderneming een kostbaar bezit.

Een deel van de kennis en ervaring van deze operators is in een kennissysteem vastgelegd. Het project is uitgevoerd door de Projectgroep Bedrijfskunde van TNO. Deze groep maakt deel uit van een aantal branchegerichte TNO-instituten (Vezel, Hout, Leder en Schoenen) en adviseert onder andere over kennisoverdracht en kennissystemen. Het project bestond uit een haalbaarheidsonderzoek, ontwikkeling van een demonstratiesysteem en ontwikkeling van een prototype. Dit prototype werd in 1987 in gebruik genomen.



### Onderzoek naar de haalbaarheid

Het onderzoek naar de haalbaarheid was er op gericht kennisgebieden te identificeren die een rol spelen bij het doen functioneren van een papiermachine. Een projectgroep bestaande uit een papiertechnoloog, een kennisanalist en twee bedrijfskundigen voerde het onderzoek uit. De papiertechnoloog heeft vooral bijgedragen aan de opleiding van de projectgroep en aan het beoordelen van de omvang van de benodigde kennis van papier- en procestechniek. De kennisanalist heeft zich georiënteerd op de dagelijkse praktijk van de procesbeheersing. De bedrijfskundigen maakten een inventarisatie van de gebieden waar het ter beschikking hebben van kennis kan leiden tot verbetering van de procesbeheersing en reductie van kosten. De methode die werd gebruikt voor de bepaling van de kosten van procesbeheersing in een bedrijf is ontwikkeld door de Projectgroep Bedrijfskunde TNO [251].

In samenwerking met de procesoperators is een aantal kennisintensieve gebieden geïdentificeerd en daarna vergeleken en getoetst op omvang en mogelijk belang voor een verbeterde procesbeheersing. Het resultaat van deze toetsing en de bedrijfskundige onderbouwing van organisatie en kosten van de procesbeheersing zijn met de betrokken onderneming besproken. Na deze bespreking werden voor de toepassing van kennissystemen geselecteerd:

- diagnose van kwaliteitsafwijkingen in het eindproduct;
- planning en uitvoering van onderhoud.

Ook hebben een kennisanalist en een bedrijfskundige een klein demonstratiesysteem ontwikkeld voor het domein 'diagnose van kwaliteitsafwijkingen'. Het systeem is gebruikt bij voorlichting aan medewerkers van het bedrijf.

### Ontwikkeling van het prototype

Na het haalbaarheidsonderzoek is een schatting gemaakt van de omvang van het domein 'diagnose van kwaliteitsafwijkingen'. Het aantal mogelijke kwaliteitsafwijkingen is geschat aan de hand van de reeds beschikbare gegevens. De omvang van de kwaliteitsafwijkingen is bepaald aan de hand van vraaggesprekken met medewerkers en een (niet volledige) inventarisatie van het aantal mogelijke oorzaken voor een kwaliteitsafwijking. Deze gegevens en de tijd die de kennisverwerking voor het demonstratiesysteem in beslag nam, zijn gebruikt om de inspanning te schatten die nodig is voor ontwikkeling van het uiteindelijke systeem.

Het doel van het systeem is advisering bij het opsporen en wegnemen van mogelijke oorzaken van kwaliteitsafwijking. Het systeem moet ervaren produktiemensen ondersteunen met een systematische pre-

sentatie van relevante informatie. Ook kan minder ervaren productiepersoneel in opleiding worden ondersteund. Dit stelt hoge eisen aan de uitlegfaciliteiten van het systeem. Daarom is gekozen voor de mogelijkheid procestechnische informatie over een bepaald probleem op het beeldscherm te laten verschijnen.

### Verspreide kennis

De kennis over het onderwerp is gespreid over een aantal mensen. Dit wordt mede veroorzaakt door de wijze waarop de productie is georganiseerd: volcontinu, in vijf ploegen. Aangezien één bepaalde oorzaak voor een kwaliteitsafwijking slechts enkele malen per jaar voorkomt, kan het gebeuren dat iemand reeds enkele jaren in het bedrijf werkt en daarmee nog nooit te maken heeft gehad. Dit betekent dat de kennisverwerving bij een aantal mensen dient plaats te vinden. Hoewel de meeste literatuur vrij negatief is over het benaderen van meer dan een deskundige vanwege mogelijke verschillen van mening, zijn de ervaringen in dit project anders. In het algemeen konden de mensen elkaars kennis zonder tegenstrijdigheden aanvullen. Werd strijdigheid vermoed, dan werd een en ander besproken. Zo nodig werden elkaar tegensprekende ideeën in het kennissysteem opgenomen.

Verwerving van kennis van diverse mensen had als voordeel dat de mensen die later met het kennissysteem zouden werken, al vroeg tijdens de ontwikkeling bij het systeem werden betrokken. Dit heeft de acceptatie van het systeem bevorderd.

Voor de ontwikkeling van dit kennissysteem is gekozen voor 'rapid prototyping'. Daardoor konden de mensen in het bedrijf de ontwikkeling bijsturen. Bovendien bleek dat prototyping de ontlocking van kennis goed ondersteunt. Het is namelijk gemakkelijker gepresenteerde kennis te bekritisieren dan die kennis helemaal zelf te verwoorden. Het systeem is ontwikkeld met PERSONAL CONSULTANT PLUS. Het bevat ruim 500 regels met kennis over ongeveer 200 oorzaken van kwaliteitsafwijkingen, die samen ongeveer 90% uitmaken van alle in het bedrijf bekende oorzaken. De gecompileerde versie van het kennisbestand draait op een XT-compatibele microcomputer met een acceptabele snelheid. Het systeem is niet gekoppeld aan apparatuur voor procesbesturing omdat dergelijke koppelingen nog niet nodig of wenselijk zijn.

Het systeem is, mede dankzij de grote betrokkenheid van de gebruikers, in brede kring geaccepteerd. Het is reeds een aantal keren voorgekomen dat ervaren operators het systeem als geheugensteun gebruikten. Zij konden daarmee problemen sneller oplossen en kosten besparen. Vaak ontstaan er discussies tussen ervaren en beginnende operators, die bijdragen aan de opheldering van onduidelijkheden en het leerproces van de beginnende operators versnellen.



De ontwikkeling van het systeem heeft een aantal bijwerkingen gehad. Er ontstond onder de operators een algemene discussie over kwaliteit en kwaliteitsafwijkingen. Dat heeft er onder andere toe geleid dat operators experimenteerden met nieuwe procesinstellingen, waardoor hun kennis over de processen is toegenomen. De interesse voor het vastleggen van kennis is sterk gegroeid en het aantal werkinstructies is toegenomen. Dit kan worden beschouwd als een van de belangrijkste uitkomsten van het project en maakt het op zichzelf al de moeite waard.

### 8.7 Océ-van der Grinten

Océ-van der Grinten is een Nederlandse onderneming met vestigingen in 25 landen. Océ is werkzaam op de gebieden informatie, communicatie en documentatie. In ca. 90 landen brengt Océ-van der Grinten kopieerapparaten en -materialen voor kantoor en tekenkamer op de markt, alsmede systemen en programmatuur voor kantoorautomatisering en de daarbij behorende grafische apparatuur en materialen. Het overgrote deel hiervan is afkomstig uit eigen ontwikkeling en productie.

Het hoofdkantoor, de onderzoeksector, de internationale marketingafdelingen en het grootste deel van de productie zijn in Venlo gevestigd. De jaaromzet van Océ-van der Grinten is ongeveer een miljard gulden en het aantal medewerkers 11.500 (van wie 4.000 in Nederland).

De sector Research en Development (R & D) bestaat uit drie afdelingen: Research, Development en Engineering, te zamen 950 man. De afdeling Research (ruim 100 man) houdt zich vooral bezig met toegepast onderzoek. Op deze afdeling begon rond 1985 op aanbeveling van een interne studiegroep en na een aantal bezoeken aan Amerikaanse AI-bedrijven het onderzoek naar toepassing van kunstmatige intelligentie. De belangstelling richt zich vooral op taal en spraak en kennissystemen. Eind 1987 werkten hieraan acht personen met een zeer diverse achtergrond: psychologie, informatica, wiskunde, natuurkunde, sterrenkunde en taalwetenschappen. Omdat het nog niet mogelijk was mensen met voldoende ervaring te werven, is deskundigheid opgebouwd door externe stages (onder andere bij de Katholieke Universiteit Nijmegen), literatuurstudie en deelneming aan symposia, conferenties en cursussen. Deze groep is ondergebracht in een groter geheel dat geconcentreerd is op gebruikersvriendelijkheid. Behalve de vaste staf is er plaats voor stagiaires en afstudeerders.

### Kennissystemen

De groep Kennisgebaseerde Systemen heeft kennis en ervaring over methoden en technieken opgedaan, haalbaarheidsstudies verricht en prototypen ontwikkeld. Tevens is een middel ontwikkeld ter ondersteuning van 'rapid prototyping'. Na deze oriënterende periode van algemeen AI-onderzoek is het onderwerp steeds meer in de richting van kennissystemen gegaan, met als doel het aftasten van de mogelijkheden dergelijke systemen te integreren in de kantooromgeving. Vooral op het gebied van gebruikersvriendelijkheid zijn er legio toepassingen. Hierbij komt het belang van een interface voor natuurlijke taal steeds naar voren. Een ander punt van aandacht betreft systemen ter ondersteuning van Océ-activiteiten.

Op dit moment lopen er twee projecten. Het eerste betreft integratie van kennissystemen en 'database management'-systemen. In dit project wordt nauw samengewerkt met de Taal- en Spraakgroep. Er wordt gebruik gemaakt van PROLOG en LISP. Met 'rapid prototyping' is inzicht verkregen in de complexiteit en haalbaarheid. Het tweede project betreft een systeem voor diagnose van storingen. Kennisacquisitie via gesprekken met experts en het zelf bekend raken met de technische problematiek spelen hierbij een belangrijke rol.

### Taal en spraak

De Taal- en Spraakgroep verricht verkennend en explorerend onderzoek op deelgebieden van de taaltechniek. Onderwerpen zijn bijvoorbeeld de ontwikkeling van een geïntegreerd systeem waarin een aantal intelligente hulpmiddelen voor de programmatuur een gebruiker moet ondersteunen in alle fasen van het verwerken van een document ('editorial support system'). Ook interfaces voor natuurlijke taal, 'content scanning' en toepassingen van spraak worden onderzocht. Men doet fundamenteel onderzoek naar de basismodulen die voor dergelijke taalverwerkende systemen nodig zijn. Ook doet men studies naar toepassingen. In dit onderzoek werkt men nauw samen met de Vakgroep Taaltechnologie van de Katholieke Universiteit Nijmegen en met interne onderzoeksgroepen. Delen van het onderzoek gebeuren in het kader van een ESPRIT-project (de ontwikkeling van een intelligent werkstation in het kantoor). Men verzorgt de interface voor natuurlijke taal voor dit werkstation. Océ-van der Grinten concentreert zich daarbij vooral op het Engels.

### Samenwerkingspatronen

Océ-van der Grinten doet verkennend onderzoek met daarbij de opdracht contacten te onderhouden met competente onderzoeksgroe-



pen. Daarbij prevaleert de competentie ver boven de afstand. Op 'halve-dag' afstand onderhoudt men betrekkingen met de Katholieke Universiteit Nijmegen, het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), het Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD Bonn), de Universiteit Twente en de Vrije Universiteit Brussel.

### Technische infrastructuur

Océ-van der Grinten heeft een duidelijke voorkeur voor ontwikkeling van kennissystemen op standaardwerkstations, onder meer in verband met integratie. Eind 1987 gebruikte men een SUN-3 met PROLOG als ontwikkelomgeving. Verder heeft men een SYMBOLICS en een aantal microcomputers met GCLISP. Op een daarvan draait het lege systeem GOLDWORKS. Binnenkort volgt uitbreiding met een SUN-SERVER en drie werkstations en zal de SYMBOLICS in deze omgeving worden geïntegreerd.

### Toekomst

Het onderzoek zal gaandeweg meer op producten worden gericht. Verkennend onderzoek zal voorlopig echter ook blijven plaatsvinden. In 1988 zullen de lopende projecten worden voortgezet. Men gaat er daarbij van uit dat de kennistechniek binnen enkele jaren volwassen genoeg is om de ontwikkelde technieken en toepassingen een wezenlijk onderdeel van toekomstige Océ-systemen te laten vormen. Hierbij moet vooral worden gedacht aan ondersteuning van de gebruikers.

## 8.8 Comprimo

Comprimo is een internationaal georiënteerd Nederlands ingenieursbureau met een vaste staf van ruim 1.400 mensen, waarvan ongeveer 600 in de hoofdvestiging te Amsterdam. Het houdt zich bezig met het ontwerp en de bouw van installaties voor de olie- en gasproductie, oliaffinaderijen, chemische fabrieken, installaties voor gasbehandeling en zwavelterugwinning, energie-opwekking en milieu- en veiligheidsprojecten.

Op de procesafdeling houdt een gespecialiseerde groep zich hoofdzakelijk bezig met de uitvoering van studie-opdrachten en met automatiseringszaken van de afdeling.

Comprimo is sinds 1985 bezig met kennissystemen. Om een algemeen inzicht te krijgen in de mogelijkheden en onmogelijkheden van de toepassing van kennissystemen voor 'computer aided engineering' (CAE) begon men medio 1985 met een haalbaarheidsonderzoek in

opdracht van het Ministerie van Economische Zaken. De projectgroep was samengesteld uit medewerkers van de groep Maatschappelijke Technologie van TNO (TNO-MT), Bredero Energy Systems en Comprimo. De Industriële Raad voor Energie en Milieu (IREM) was door de opdrachtgever belast met het toezicht op de uitvoering van het project. De projectgroep bestond uit een projectleider, een adviseur, twee projectcoördinatoren, vier domeinexperts en twee automatiseringsdeskundigen.

Het doel van het project was het verkrijgen van kennis over de ontwikkeling van technische kennissystemen, door:

- ervaring op te doen met kennissystemen;
- onderzoek naar de mogelijkheden tot integratie met bestaande (reken)programmatuur;
- onderzoek naar gebruik voor hulp bij operatortaken;
- bevordering van toepassingen bij het ontwerpen.

Het onderwerp van deze studie was de ontwikkeling en toepassing van kennissystemen voor het ontwerpen van technische systemen. Als voorbeeld en als leidraad is gekozen voor het ontwerp van een systeem voor ruimteverwarming in relatie met een compressorwarmtepomp.

Het onderzoek spitste zich toe op de vraag of het kennissysteem op een redelijke termijn praktisch toepasbaar zou zijn. Ook werd een verkennend marktonderzoek gedaan naar de mogelijke gebruikersgroepen van een dergelijk kennissysteem. Tijdens het onderzoek zijn twee vingeroefeningen gehouden, waarbij in beide gevallen een klein prototype werd ontwikkeld. Tijdens het praktijkonderzoek is getracht het ontwerp van het kennissysteem zo algemeen mogelijk te houden. Het onderzoeksproject begon in augustus 1985 en werd halverwege 1986 afgesloten.

### Gereedschappen

De algemene conclusie van de projectgroep was dat het met de huidige middelen goed mogelijk is kennissystemen te ontwikkelen die toepasbaar zijn voor CAE. Ook bleek dat lege systemen niet bruikbaar zijn voor het opzetten van technische toepassingen: diverse faciliteiten ontbraken. De meeste lege systemen bieden onder andere onvoldoende rekenfaciliteiten. Bij de overdracht van grote hoeveelheden gegevens tussen het kennissysteem en de rekenprogrammatuur traden moeilijkheden op. Hierbij moet wel worden aangetekend dat sinds het project in 1986 werd afgesloten er veel aan lege systemen is verbeterd en vernieuwd.

De keuze van de gereedschappen werd overigens door de omstandigheden opgelegd. Zo werd het eerste kennissysteem ontwikkeld met



PERSONAL CONSULTANT op een microcomputer. De keuze kwam voort uit het contact met de stichting AITTB. Daar er bij Comprimo goede contacten bestonden met CDC Nederland te Rijswijk, is het tweede systeem ontwikkeld met het lege systeem KES. Comprimo kreeg voor drie maanden toegang tot KES op een VAX van TNO. Het systeem werd geleverd en geïnstalleerd door CPP Nederland, dat ook een korte cursus verzorgde.

Tijdens het haalbaarheidsonderzoek is getracht zoveel mogelijk informatie te verkrijgen over de toen leverbare apparatuur en programmatuur. Bij de beoordeling van de gereedschappen werd vooral gelet op de mogelijkheden voor communicatie of koppeling met andere programmatuur. Verder werd gekeken naar de mogelijkheid met het systeem zelf rekenkundige bewerkingen uit te voeren. Belangrijk was eveneens de overdraagbaarheid van de operationele versie. De groep had voorkeur voor de mogelijkheid het kennisbestand te structureren en daar ontstond dan ook het besef dat voor de uiteindelijke ontwikkeling van kennissystemen geavanceerde ontwikkelomgevingen de voorkeur verdienen boven lege systemen.

### Procesautomatisering

Comprimo is eveneens actief op het gebied van de procesautomatisering en is er van overtuigd dat kennistechniek ook hier zal worden toegepast. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van een kennissysteem voor de operator. Weliswaar gaat het hier om een systeem voor computeroperators, maar de hierbij opgedane kennis en ervaring zullen eveneens toepasbaar zijn op operatortaken in de procesindustrie. Begin 1987 is Comprimo daarom begonnen aan een tweede project op het terrein van kennissystemen voor intern gebruik. Dit project zal moeten resulteren in een kennissysteem dat de operators van de eigen computerafdeling moet ondersteunen.

In een eerste fase van het project hebben twee hts-studenten enige maanden aan het systeem gewerkt. Ook werd medewerking verkregen van de computerleverancier. Comprimo hoopt met dit project meer kennis op te doen over de ontwikkeling en het gebruik van kennissystemen. Het kan deze kennis goed toepassen in de procesautomatisering, aangezien Comprimo veel specifieke kennis heeft over chemische en petrochemische processen.

### Bevindingen

Een opmerkelijke ervaring was dat het begrip kennissysteem pas echt bij de leden van de projectgroep ging leven toen het eerste prototype aan hen werd gedemonstreerd.

De beschikbaarheid van experts bleek een knelpunt. Omdat in de

eerste fase van het project de achtergronden van de experts verschillend waren, was ook de aanpak van het werk verschillend, hetgeen in eerste instantie tot begripsverwarring bij de kennisanalisten leidde. Achteraf kan worden gesteld dat het project zeer veel heeft bijgedragen tot begrip van het domein bij de kennisanalisten.

De kracht van een kennissysteem voor technisch ontwerpen ligt volgens Comprimo niet zozeer in het opstellen en uitvoeren van berekeningen, maar veel meer in het interpreteren en evalueren van de uitkomsten en in het adviseren van de ontwerper. Zo zal een kennissysteem voor operatortaken niet de taak van de operator overnemen, maar helpen de werkzaamheden optimaal uit te voeren. Ook de afdeling programmatuurontwikkeling van Comprimo volgt deze AI-ontwikkeling van dichtbij. Daarbij wordt kennistechniek gezien als een volgende generatie hulpmiddelen bij het programmeren.

### 8.9 HCS Technology

HCS Technology bestaat uit twintig werkmaatschappijen met ruim 800 vaste en 200 tijdelijke medewerkers. HCS is georganiseerd in de HCS Computer Groep voor industriële automatisering, netwerken, dienstverlening en visuele communicatie en de HCS Electronics Groep voor de handel. De HCS Computer Groep omvat een aantal bedrijven voor programmatuur en apparatuur op maat voor geavanceerde systemen voor productiebesturing en beheer in de proces- en fabricage-industrie. Deze bedrijven voeren tevens afgeronde automatiseringsprojecten uit in opdracht van derden. In de dienstverlening houdt een aantal ondernemingen zich bezig met advies aan en detachering van automatiserings- en technische specialisten.

HCS voorziet een toenemende rol voor AI-technieken in industriële automatisering, industriële beveiligingen en automatisering van gebouwen. Voor de laatstgenoemde toepassing levert HCS microcomputersystemen voor klimaatregeling en energiebesparing. HCS onderzoekt de mogelijkheden voor kwalitatieve optimalisatiestrategieën. Op die wijze wordt gepoogd een verdergaande energiebesparing te bereiken.

Het onderzoek naar AI op de industriële beveiligingsmarkt spitst zich toe op het in een kennissysteem verwerken van de kennis over instrumentele beveiligingen om daarmee de tijd voor definitie en ontwerp van industriële beveiligingssystemen aanzienlijk te bekorten. Een complicatie hierbij is de benodigde bundeling van verdeelde kennis, zoals die van de procestechnoloog, de instrumentatietechnicus, de onderhoudstechnicus en niet in de laatste plaats die van de wetgever met zijn richtlijnen en voorschriften.



De industriële automatiseringsmarkt omvat voor HCS de automatisering in de procesindustrie (de behandeling van vloeistoffen en gassen) en in de fabricage-industrie (productie en assemblage van componenten). De procesindustrie is al relatief lang geautomatiseerd; vaak worden processen bestuurd die zonder automatisering onbeheersbaar zouden zijn. Door de snelle ontwikkeling van de computertechniek bleek het mogelijk steeds grotere en complexere processen uit een centrale bedieningsruimte te bewaken. Zo is het voor een FAST/SCADA-systeem van HCS niet ongebruikelijk dat gegevens van meer dan 15.000 procesvariabelen centraal worden verzameld (SCADA = Supervisory Control And Data Acquisition). De procesoperator dient dan al zijn cognitieve vaardigheden te gebruiken om uit de veelheid van informatie juist die gegevens te selecteren die op dat moment belangrijk zijn voor de veilige voortgang van het productieproces. Hier kunnen op AI gebaseerde systemen in de vorm van 'intelligente' alarmeringssystemen of snelle diagnosesystemen uitkomst bieden. Deze systemen kunnen in plaats van het melden van symptomen (bijv. druk te laag, temperatuur te hoog) direct één of meer oorzaken afleiden (bijv. motor defect, lekkende aanvoerleiding). Deze diagnose zal zijn gebaseerd op kennis van de productiefaciliteit (zie hoofdstuk 5). De strategie van HCS is zodanige voorzieningen in zijn systemen te integreren dat de eindgebruiker de benodigde proceskennis zelf eenvoudig kan inbrengen. Hiermee wordt de effectiviteit van HCS-systemen vergroot en kan de vaak vertrouwelijke procesinformatie in het productiebedrijf blijven.

Het onderzoek van HCS is vooral gericht op object-georiënteerde programmatuur. Een belangrijk thema is de overgang van diepe kennis (bijv. de differentiaalvergelijkingen waarmee het thermisch gedrag van een oven wordt beschreven) naar ondiepe kennis (bijv. dat bij externe verhitting de interne temperatuur zal stijgen).

In de fabricage-industrie is de automatisering veel recenter dan in de procesindustrie. Sommige deelgebieden zijn echter al wel vergaand geautomatiseerd. Computer Integrated Manufacturing (CIM) kan zich in een toenemende belangstelling verheugen en vormt ook voor HCS het belangrijkste uitgangspunt voor deze markt. Evenals bij de procesindustrie speelt ook hier het kwalitatief modelleren van de productiefaciliteit een belangrijke rol. Aan een produktiemodel kunnen functies worden toegevoegd, zoals diagnose, maar vooral ook planning en werkvoorbereiding. Omdat het aantal mogelijkheden van orders met dezelfde produktiemiddelen groot is, wordt de werkvoorbereiding zeer complex, zeker als men streeft naar een optimum.

Een tweede punt van aandacht is het verzamelen van kwaliteitsgegevens en de terugkoppeling daarvan in de levenscyclus van produkten. De kwaliteitsgegevens worden dan niet alleen gebruikt voor het bijsturen van de productie, maar ook voor het genereren van

richtlijnen voor de werkvoorbereiding, de procesplanning en zelfs het produktontwerp.

HCS ziet AI als middel en zeker niet als doel. Men legt daarom niet de nadruk op de ontwikkeling, maar op de toepassing van reeds beschikbare AI-gereedschappen en -technieken. Gezien de complexiteit van die toepassingen zullen zeer krachtige gereedschappen nodig zijn, die een koppeling mogelijk maken met conventionele programmatuur. HCS wil die gereedschappen integreren in zijn produktiepakket en ze als gebruikersvriendelijk beschikbaar stellen aan eindgebruikers.

### 8.10 Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium

Het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) is het centrale instituut in Nederland voor onderzoek op het gebied van lucht- en ruimtevaart. Het NLR geeft technisch-wetenschappelijk advies en ondersteuning aan overheidsinstanties, industrie, en civiele en militaire vliegtuiggebruikers.

#### Beleid

Het informaticabeleid van het NLR is gericht op een integrale aanpak van technische en organisatorische aspecten van automatisering. Daarmee kan innovatie worden gestimuleerd. In het informaticabeleid van het NLR past het streven naar vastlegging van kennis in de infrastructuur, dat wil zeggen in het stelsel van samenhangende apparatuur en programmatuur voor informatievoorziening van de gehele organisatie.

Toen uit de eerste projecten bleek dat kennissystemen kunnen worden toegepast (zij het in nauwkeurig omschreven omstandigheden), is kennistechniek tot een speerpunt in het beleid verheven. Inmiddels is mede daardoor in de Hoofdafdeling Informatica (ca. 150 medewerkers) een vakgroep tot stand gekomen, die zich speciaal bezighoudt met het bouwen van kennissystemen voor toepassingen in de lucht- en ruimtevaart, het ontwikkelen van hulpmiddelen daarvoor en de uitvoering van onderzoek. Verder fungeert de Werkgroep Expert Systemen (WEXS) van het NLR als informeel forum voor onderzoekers en ontwikkelaars.

#### Projecten

Begin 1984 zijn initiatieven ontwikkeld bij de Operations Research Groep van de Hoofdafdeling Vliegtuigen en bij de Afdeling Numerieke Wiskunde en Applicatieprogrammering van de Hoofdafdeling



Informatica. De eerstgenoemde houdt zich bezig met toepassing van kennissystemen voor praktijkproblemen bij vliegtuiggebruikers en werkt samen met de tweede. Deze laatste houdt zich, behalve met ontwikkeling van kennissystemen, ook bezig met onderzoek naar en ontwikkeling van hulpmiddelen.

Het doel van de eerste projecten was kennismaking met de mogelijkheden van AI-technieken om die te beoordelen naar bruikbaarheid voor technische toepassingen. Kennis werd opgedaan bij de Vakgroep Technische Toepassingen van de Informatica van de Technische Universiteit Delft, diverse internationale literatuurbestanden (o.a. van NASA) en door het volgen van cursussen in het buitenland. Ook is deelgenomen aan de projectgroep CAD en AI van het CIAD. Met het uit dit project verkregen pakket DELFI-2 is geëxperimenteerd op de centrale computer van het NLR, de CYBER 180/855. Toen voldoende inzicht was verkregen in de mogelijke toepassingen van kennistechniek, zijn enkele demonstratieprojecten georganiseerd, intern en voor twee belangrijke opdrachtgevers. Het eerste onderzoek is gefinancierd uit het onderzoekbudget van de Hoofdafdeling Informatica.

### Ontwikkeling van systemen

Bij het NLR wordt een kennissysteem ontwikkeld als onderdeel van een groter informatiesysteem. Integratie of koppeling van het kennissysteem met andere systemen is daarbij noodzakelijk, zowel met rekenprogrammatuur in FORTRAN en PASCAL als met gegevensbestanden (o.a. Oracle, via SQL-'statements' in de produktieregels of via externe procedures). Soms wordt het kennissysteem aangeroepen als moduul in een programmapakket en soms wordt van het kennissysteem uit andere programmatuur aangeroepen.

Kennissystemen worden ontwikkeld wanneer een probleem beter met kennistechniek kan worden opgelost dan op een andere manier. Dit geldt in de lucht- en ruimtevaart voor die complexe technische toepassingen, die alleen met redeneren kunnen worden opgelost. De inspanning van het ontwikkelen van een kennissysteem is slechts de moeite waard als:

- kennis beschikbaar en toegankelijk is;
- voldoende geld kan worden uitgetrokken;
- de lijnorganisatie actief meewerkt aan de beleidsvorming;
- het beschikbaar maken van kennis van groot belang is.

Een kennissysteem wordt ontwikkeld door een projectgroep, waarin opdrachtgever en NLR zijn vertegenwoordigd. De projectleider is meestal een NLR-deskundige uit het toepassingsgebied. Het NLR levert bovendien informatici. De opdrachtgever levert vakdeskundigen en de mensen die het systeem uiteindelijk zullen gebruiken.

Een dialoog tussen experts van de opdrachtgever en deskundigen van het NLR biedt meestal het eerste aanknopingspunt. Inwerken via handboeken is meestal niet nodig, omdat de meeste betrokkenen reeds lang in dit vakgebied werken. Bestudering van handboeken is vaak wel nuttig om achtergrondinformatie te verschaffen aan de betrokken informatici die niet deskundig zijn in het vakgebied. De uiteindelijke eindgebruikers worden betrokken bij het opstellen van de functionele eisen en bij het beproeven van het laboratoriumsysteem. Soms zijn de eindgebruikers de experts zelf; dan zijn ze uiteraard bij het gehele proces betrokken.

Tot nu toe heeft het NLR geen gebruik gemaakt van inbreng van leveranciers, omdat geen externe producten worden gebruikt. Nederlandse leveranciers van pakketten bleken ten aanzien van de wensen van het NLR:

- te weinig inzicht te hebben in het (vaak buitenlandse) produkt dat ze leveren, of
- te weinig invloed te kunnen uitoefenen op de verdere ontwikkeling daarvan, of
- geen mogelijkheden te hebben het gereedschap aan te passen aan de infrastructuur van het NLR.

Daarom heeft het NLR een eigen gereedschap ontwikkeld, genaamd NEXT (NLR Engineering X-pert system Toolkit). Meestal worden voor elk project enige aanpassingen aan en of uitbreidingen van NEXT gemaakt. Naast het algemene stuk van de gebruikersinterface in NEXT, moet ook een van de toepassing afhankelijk deel worden gemaakt. Hieraan wordt in het algemeen veel tijd besteed. Harde cijfers ontbreken, maar het is zeker meer dan een kwart van de totale ontwikkelingsinspanning.

Het NLR heeft regelmatig contact met het CIAD en de Werkgroep Expertsystemen. Ook werkt men voor onderzoek en ontwikkeling samen met Nederlandse relaties in de lucht- en ruimtevaart, de Technische Universiteit Delft en de Universiteit van Amsterdam. Verder heeft men contacten met diverse bedrijven (o.a. Boeing), organisaties (o.a. NASA) en universiteiten in het buitenland om ervaringen uit te wisselen.

Verwerving van kennis gebeurt door vraaggesprekken met experts en protocolanalyse. In de ontwikkeling van informatie- en kennissystemen heeft het NLR een geformaliseerd voortraject opgenomen, waarin eerst de grenzen van de technische mogelijkheden worden bepaald, al dan niet door ontwikkeling van een prototype. Vervolgens worden alternatieve mogelijkheden bepaald met de bijbehorende grenzen van kosten en reikwijdte. Hiertoe wordt meestal een proefsysteem ontwikkeld dat een goed beeld geeft van de mogelijkheden.

De ontwikkelingstijd is afhankelijk van de moeilijkheid en de omvang van het project en ook van de beschikbare tijd van schaarse



specialisten. Demonstratieprojecten die niet triviaal zijn, kosten het NLR enige manmaanden. Van grotere projecten verwacht men dat ontwikkeling en onderhoud jaren zullen duren.

### Conclusies en verdere plannen

Tot eind 1987 hebben de systemen, zowel intern als extern, de volgende effecten gehad voor het NLR:

- verduidelijking van de mogelijkheden en onmogelijkheden van kennistechniek;
- opdrachten voor kennissystemen voor specifieke toepassingen;
- indiening van wensen van gebruikers van NEXT en het telkens verwezenlijken ervan in een volgende versie;
- theoretisch onderzoek naar aanleiding van een aantal praktijkproblemen.

Voor de klanten aan wie het NLR systemen heeft geleverd, was het voornaamste effect dat deskundigen gemakkelijker informatie gaan verschaffen. Voor optimaal gebruik van gereedschappen, zijn deskundigen nodig die het gereedschap tot in alle bijzonderheden kennen. Die ondersteuning aan de gebruikers van NEXT is essentieel in de nazorg van het NLR.

De contacten van het NLR met bedrijven en instellingen in binnen- en buitenland zijn belangrijk voor de uitwisseling van ideeën en ervaringen. Deze zullen dan ook in stand worden gehouden en waar mogelijk geïntensiveerd. De lijn van de afgelopen jaren zal worden voortgezet. Op korte termijn betekent dit het ontwikkelen van een nieuwe versie van NEXT (versie 2.0). Deze versie zal een hybride mechanisme voor kennisrepresentatie hebben, gebaseerd op frames en produktieregels. Ook zal een betere scheiding worden aangebracht tussen besturing en inferentie en zullen de koppelingsmogelijkheden met gegevensbestanden worden uitgebreid.

### 8.11 TNO

TNO bestaat uit een groot aantal instituten en hoofdgroepen. In een aantal daarvan werden in 1987 kennissystemen ontwikkeld. De Contactgroep Kennissystemen (CKS) is een informeel overlegorgaan van de medewerkers in deze projecten en is vertegenwoordigd in het Dwarsverband Informatie-Technologie. In dit dwarsverband zitten afgevaardigden uit de hoofdgroepen, die samen een goed overzicht hebben van de informatica-activiteiten in TNO. Dit dwarsverband stimuleert projecten en activiteiten door middel van subsidies. Ook geeft het dwarsverband adviezen over informatietechniek aan de Raad van Bestuur.

### Nieuwe instituten

De Raad van Bestuur van TNO besloot in 1985 het Instituut voor Toegepaste Informatica (ITI) en het Instituut Informatie-Technologie voor Productie-automatisering (ITP) op te richten. Het ITI heeft als functie 'het toepassen van technieken uit de informatietechnologie ter verbetering van het functioneren van TNO, bedrijfsleven en overheid'. Om deze functie te kunnen uitvoeren, is het ITI het centrale punt dat moet zorgen voor de verspreiding van informatietechniek in de TNO-instituten. Er is geld beschikbaar voor een verkennend onderzoek; dit kan later leiden tot contractonderzoek en projecten. De andere TNO-instituten staat het overigens vrij het ITI of een extern bedrijf in te schakelen.

Het ITI bestaat uit vier groepen, waaronder de groep 'Knowledge Based Systems'. Deze is betrokken bij diverse projecten waarin kennissystemen worden ontwikkeld. Kennis op het terrein van AI is vergaard door opleiding, symposia en zelfstudie. Men maakt gebruik van op de markt verkrijgbare gereedschappen, maar er wordt ook eigen programmatuur ontwikkeld. Bij de ontwikkeling van complete systemen wordt voorlopig uitgegaan van de klassieke ontwikkelingsmethode. Op die manier is een kennissysteem ontwikkeld met de kennis van een vleestechnoloog. In totaal heeft dit project 2.500 manuren gekost, inclusief de presentatie in de bedrijfstak.

### Overzicht van projecten

Samen met de hoofdgroep Maatschappelijke Technologie bouwt het ITI een kennissysteem dat operators in de procesindustrie moet adviseren. De operators worden gevraagd en ongevraagd geadviseerd. Dit kennissysteem zal ook worden gebruikt bij de opleiding van nieuwe operators.

De groepen 'Knowledge Based Systems' en 'System Development Support' werken samen in de bouw van een kwaliteitssysteem voor ontwerp en bouw van AI-programmatuur. Als praktijkgeval wordt aan een kennissysteem gewerkt dat ontwerpers van schepen moet bijstaan in een bepaalde fase van hun werk. In dat systeem wordt dat deel van de kennis opgenomen dat ontwerpers, eerder dan gebruikelijk, kan adviseren over constructieve aspecten. Een grafische uitvoer is daarbij essentieel, evenals de interactie met rekenmodulen. Daartoe wordt het kennissysteem ingebed in andere programmatuur.

Voorts verricht het ITI verkennend onderzoek naar de mogelijkheden van conditiebewaking ten behoeve van preventief onderhoud. Het project zal worden voortgezet in een richting die afhangt van de belangstelling uit het bedrijfsleven.



Het Metaalinstituut TNO neemt deel aan een ESPRIT-project over flexibele assemblage (zie hoofdstuk 4). In het Instituut voor Zintuigfysiologie onderzoekt men het ontlocken van kennis. Daarbij kijkt men niet alleen naar de toepasbaarheid van vraaggesprekken, maar ook naar andere technieken. Men hoopt technieken te ontwikkelen die minder tijdrovend zijn dan bijvoorbeeld protocolanalyse en die leiden tot verwerving van objectieve kennis.

### Intern symposium

In het najaar van 1987 organiseerde de TNO een symposium waarin de diverse projecten aan belangstellenden werden gepresenteerd. De projecten waarin kennissystemen worden ontwikkeld, gaan over zeer uiteenlopende gebieden, waaronder milieu, vleesverwerkende industrie, papierindustrie (zie par. 8.6), seismische interpretatie, preventie van gehoorschade, bouwnormen en computerondersteunde instructie [252].

## 8.12 Het MIKEP-project

Het project 'Methode voor de integratie van kennis in het engineering- en productieproces' (MIKEP) begon in april 1986 op initiatief van FDO Technische Adviseurs (Stork Demtec). Het project moet leiden tot praktisch toepasbare kennissystemen voor het vastleggen van produkt- en produktiekennis en een uitgewerkte methode voor de ontwikkeling van dergelijke systemen in het midden- en kleinbedrijf. De nadruk ligt op bedrijven die produkten leveren in kleine series of enkelstuks fabriceren. Voor een belangrijk deel gaat het om bedrijven in de machine-, metaal- en elektrotechnische industrie. In Nederland zijn dat ca. 1.900 bedrijven met in totaal 230.000 werknemers.

In het project werken ASM Fico Tooling, Stork Werkspoor Diesel, Stork Brabant, Stork Demtec, de Technische Universiteit Delft (Wiskunde en Informatica) en de Universiteit Twente (Elektrotechniek) samen. In 1987 waren er 19 personen aan bezig, waarvan 4 voltijds (studenten). Stork Demtec heeft de leiding. Het project verloopt in vijf fasen, waarvan de eerste twee zijn uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken. In de eerste fase is een aantal toepassingsgebieden in kaart gebracht, waaruit in de tweede fase verkoop en ontwerpen zijn gekozen voor een haalbaarheidsstudie, de ontwikkeling van een aantal prototypen en een aanzet voor de te ontwikkelen methode. Deze fase is in december 1987 afgesloten. In de volgende paragraaf worden de bevindingen van de eerste twee fasen en de plannen voor de volgende fasen beschreven.

### Informatiebehoefte

Sterke standaardisatie is strijdig met produktvernieuwing, produktontwikkeling en klantgericht aanbieden. De complexiteit van producten (machines, apparaten, fabrieken, gereedschappen) leidt echter tot een grotere behoefte aan informatie bij de verkoopstaf. Naast mechanische componenten hebben elektromechanische componenten, elektronica en programmatuur hun intrede gedaan. De behoefte aan informatie, het beheer hiervan en de beheersing van de informatiestroom worden steeds sterker gevoeld. Ook met de introductie van CAD en CAM komt de noodzaak van een goed informatiebeheer nadrukkelijk naar voren. De verscheidenheid aan betrokken vakdisciplines en de verregaande specialisatie maken het nodig produktkennis en de functies van die kennis vast te leggen en beter bruikbaar te maken. Daarbij is een methodische aanpak van belang.

### Verkoopondersteuning

Bij alle deelnemende bedrijven bleken structurering en vastlegging van kennis voor de afdeling verkoop een knelpunt te zijn. Oplossing daarvan kan resulteren in een grote rendementsverbetering. In de eerste fase van het project is daarom onderzocht hoe produkt- en produktiekennis beter kunnen worden gebruikt bij de verkoop van technische producten. Bij Stork Werkspoor Diesel, Stork Brabant en ASM Fico Tooling is een prototype van een kennissysteem voor eenzelfde toepassing gebouwd.

Bij Stork Werkspoor Diesel gaat het om de configuratie van grote dieselmotoren aan de hand van specificaties en functionele eisen. Er wordt onderzocht hoe dit systeem kan worden geïntegreerd met een CAD-systeem voor de snelle vervaardiging van offertetekeningen. Er is gebruik gemaakt van PERSONAL CONSULTANT PLUS en DBASE III. De resultaten zijn veelbelovend. De slechte integratiemogelijkheden van PERSONAL CONSULTANT PLUS en DBASE III vormen echter een handicap.

Bij Stork Brabant is kennis over een produktgroep ('stomer') in een kennissysteem vastgelegd. Verkopers gebruiken dit systeem om de wensen van klanten vast te stellen. Stomers hebben een relatief eenvoudige samenstelling, maar zijn gebaseerd op complexe processen. Verkopers kunnen daarom ongewild verkeerde aanbevelingen doen. Door gebruik van het kennissysteem neemt de juistheid van de aanbevelingen toe en kan beter worden voldaan aan de wensen van de klant, ook als deze worden gewijzigd. De eerste reacties van de gebruikers zijn zeer positief. Om meer te weten te komen over de gebruiksaspecten van een dergelijk systeem, overweegt men beproe-



ving op een draagbare microcomputer. Verwacht wordt dat de betreffende ontwerpgroep dan veel minder tijd hoeft te besteden aan ondersteuning van de verkoop.

Een tweede systeem betreft rotatiedrukmachines. Deze bevatten veel componenten, maar zijn in tegenstelling tot stomers gebaseerd op eenvoudige processen. Naar aanleiding van de opgedane ervaringen met aanpak en gereedschappen is voor dit prototype gekozen voor het lege systeem GOLDWORKS.

In de tweede fase van het MIKEP-project is een aanzet uitgewerkt van de te ontwikkelen methode. Daarbij zijn delen van bestaande methoden voor informatie-analyse (IDEF, D2S2) ingepast.

Op basis van de conclusies van de eerste twee fasen en de positieve reacties op de prototypen zijn de volgende fasen uitgewerkt en is subsidie bij het Ministerie van Economische Zaken aangevraagd voor een demonstratieproject informatietechnologie. Enkele conclusies zijn:

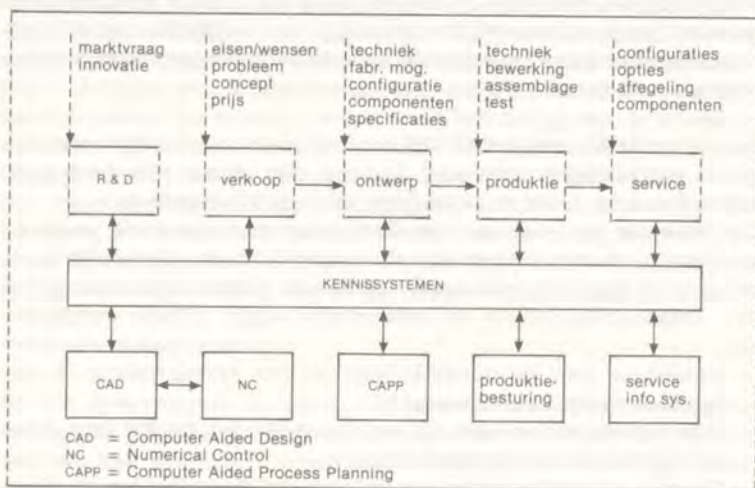
- Essentieel voor de ontwikkeling van een kennissysteem is een functionele produktstructuur.
- Een kennissysteem kan niet tot stand komen zonder intensieve deelname van de ontwerpafdelingen.
- Op de markt verkrijgbare lege systemen voldoen niet aan de eisen. Bovendien zijn de mogelijkheden voor integratie met andere toepassingen te beperkt.
- De huidige methoden van systeemontwikkeling zijn deels toepasbaar bij de ontwikkeling van kennissystemen.
- Veel projecten zijn mislukt door het ontbreken van een methodiek.
- Een kennissysteem voor het gekozen domein is zinvol; op de ontwerp- en verkoopafdelingen zijn aanzienlijke rendementsverbeteringen haalbaar.

In de volgende fase van het MIKEP-project wil men de bestaande prototypen omzetten in operationele systemen. Kennis- en gegevensbestanden worden aangevuld met nieuwe produktgegevens. Belangrijk wordt de integratie met de reeds aanwezige informatiesystemen, bijvoorbeeld die voor produktiebesturing. Deze integratiestap moet dubbele informatie voorkomen en zorgen voor het doorlopend actualiseren van het kennissysteem. Het kennissysteem vormt daarbij de koppeling tussen informatie en kennis enerzijds en de reeds aanwezige toepassingen anderzijds.

Doel is onder andere het verminderen van het aantal onderdelen, kostenverlaging, kortere doorlooptijd voor offertes en orderverwerking en betere nacalculaties. De ontwikkelde methodiek moet resulteren in een toepasbare methode.

In afb. 8.1 is de plaats aangegeven van het kennissysteem tussen de

betrokken afdelingen en de reeds aanwezige informatiesystemen. Uit de afbeelding blijkt dat het kennissysteem de koppeling vormt tussen de beschikbare informatie en kennis enerzijds en de reeds aanwezige computertoepassingen anderzijds.



Afb. 8.1 Het MIKEP-project.

### 8.13 ESPRIT II

Het European Strategic Programme for R & D in Information Technology (ESPRIT) kent een aantal aandachtsgebieden. In 1987 is ESPRIT II begonnen. Daarin is 'knowledge engineering' een afzonderlijk gebied geworden, naast onder andere 'system design', 'application support systems', 'office systems' en 'computer integrated manufacturing'. In het werkprogramma van ESPRIT II wordt kennistechiek aangegeven als een sleuteltechniek voor die industriële toepassingen waar snel moet worden omgegaan met complexe informatie. De snelheid waarmee de Europese industrie kennistechiek zal weten toe te passen, zal volgens de toelichting op het werkprogramma van ESPRIT II een significante invloed hebben op de concurrentiekracht van Europa in de jaren negentig. ESPRIT II zal zich beperken tot de ontwikkeling van demonstratiesystemen en specificaties. In ESPRIT II zal aan de volgende gebieden in de kennistechiek aandacht worden besteed:

- kennisverwerving, leren;
- modellen voor adapterende en lerende systemen;



- kennisrepresentatie;
- formele talen voor redeneren met tijd en onzekerheid;
- formele methoden voor de specificatie van kennissystemen;
- ontwikkelomgevingen;
- integratie van kennissystemen;
- modulaire kennissystemen, hergebruik van kennisbestanden;
- doelmatige gebruikersfaciliteiten die gebruik maken van natuurlijke taal en van visuele en auditieve ondersteuning;
- evaluatie van kennissystemen.

Voor snelle systemen zullen nieuwe apparatuur en programmatuur worden geïntegreerd. Daarbij zal rekening worden gehouden met ontwikkelingen op het gebied van parallelle systemen en systeemontwerp.

Een coöperatief systeem wordt gevormd door de integratie van kennissystemen en andere systemen ten behoeve van één toepassing. Daarvoor zullen modellen en protocollen voor informatie-uitwisseling worden ontwikkeld.

Onderzoek zal worden gedaan naar natuurlijke taal, grafische mogelijkheden, spraakherkenning, modellen van de gebruiker en combinaties van deze technieken. Ook zullen kennissystemen worden ontwikkeld om andere systemen te verbeteren of beter bedienbaar te maken. In eerste instantie wordt gedacht aan voorzetsystemen. Verder zal onderzoek worden gedaan naar de levenscyclus van kennissystemen. Enkele demonstratiesystemen zullen in de industriële praktijk worden geëvalueerd. Er zal onderzoek worden gedaan naar kennistechnieken en architecturen die geschikt zijn voor de omgang met de zeer grote kennisbestanden die voor veel industriële toepassingen nodig zijn. Ook zal ernaar worden gestreefd modulaire kennisbestanden te ontwikkelen die in diverse toepassingen bruikbaar zijn (hergebruik van kennisbestanden).

Omdat kennistechniek nog een jong vakgebied is, zal een aantal specifieke onderwerpen van onderzoek dienen als leidraad in dit deel van ESPRIT II. Dat zijn:

- uitlegfaciliteiten;
- redeneren over tijd;
- leren;
- kennisverwerving.

Andere onderwerpen zijn:

- probleemspecificatie;
- onderhoud van kennissystemen;
- validatie;
- gezond verstand;
- modellen van de gebruiker;
- gedistribueerde kennisbestanden.

---

## 9. Sociaal-organisatorische aspecten

### 9.1 Beperkingen en mogelijkheden van kennissystemen

#### Sensationele verhalen

Kennissystemen en AI geven vaak aanleiding tot sensationele verhalen. Leveranciers doen spectaculaire voorspellingen. Onderzoekers beloven gouden bergen. De financiering van hun onderzoek is immers mede afhankelijk van de verwachtingen over de mogelijke resultaten [253, 254]. De termen kunstmatige intelligentie en kennissysteem beloven echter meer dan met de huidige techniek kan worden bereikt. Grote doorbraken worden op korte termijn niet verwacht. Daarom dient bij de invoering van kennissystemen rekening te worden gehouden met de beperkingen die in hoofdstuk 3 zijn geschetst.

#### Mensen worden niet overbodig

Er bestaat gegronde twijfel of kennissystemen ooit mensen kunnen evenaren. Kennissystemen zijn tenslotte slechts kundig binnen een zeer klein domein. De hoeveelheid kennis waarover een kennissysteem beschikt, valt in het niet bij de kennis van een mens.

Hoewel AI zich ook bezig houdt met het denken van de mens, gaat het bij toepassingen van kennistechniek in de praktijk niet om het namaken van de mens. Dat zou het creatief gebruik van de specifieke eigenschappen van computers in de weg staan. De oorspronkelijke gedachte aan een kennissysteem dat zich in een Turing-test zou kunnen meten met menselijke experts, is ondergeschikt geraakt aan de andere commercieel interessante en technisch haalbare toepassingsmogelijkheden van computers en kennistechniek. In veel projecten ligt de nadruk daarom niet op natuurgetrouwe imitatie van menselijke denkprocessen. Er kunnen ook kennissystemen worden ontwikkeld die taken krijgen die mensen nooit hebben gehad.

Wat men op dit gebied wel en niet mogelijk acht, is een kwestie van uitgangspunten. Wie er van uitgaat dat mensen in alle opzichten zijn te beschrijven als informatieverwerkende systemen, zal verwachten dat computers met behulp van AI veel menselijke eigenschappen kunnen krijgen. In [254] is een aantal voorbeelden gegeven van de consequenties van dit uitgangspunt. Specialistische kennis staat nooit op



zichzelf, maar is ingebed in de algemene kennis die zich bij ieder mens met gezond verstand van de geboorte af ontwikkelt en deze tot menselijk handelen in staat stelt. Kennissystemen missen deze kennis. In [255] is een overzicht gegeven van punten waarop de mens daardoor volgens velen superieur zal blijven.

Uiteraard zullen kennissystemen bepaalde taken overnemen van mensen. Dat is inherent aan automatisering. Maar de supervisie over de werking van deze gereedschappen blijft in handen van mensen. Willen zij dat goed kunnen doen, dan dient hun rol al bij het ontwerp te zijn ingebouwd (zie par. 6.2). Gebeurt dat niet, dan neemt de kans op mislukkingen toe. Voorschriften helpen slechts ten dele; het ontwerp moet rekening houden met de menselijke maat (voor human factors zie [256]).

Mensen zijn in staat de relatieve ernst van situaties of de onafhankelijkheid van symptomen te beoordelen. Ook kunnen mensen begrijpen wat er in een organisatie van hen wordt verlangd of wat een opdrachtgever werkelijk bedoelt.

De meestbelovende toepassingen van kennissystemen liggen daarom op die gebieden waar de combinatie van menselijke en computervermogens kan leiden tot betere oplossingen. Daarbij is het belangrijk dat de gebruiker een goed inzicht heeft in de mogelijkheden en beperkingen van deze systemen en dat zij zijn aangepast aan de vermogens van de gebruikers.

Behalve kennissystemen, inzetbaar voor taken in domeinen waar sommige mensen zeer goed in zijn, worden ook kennissystemen ontwikkeld die de mens helpen bij taken waar niemand goed in is. Voorbeelden daarvan zijn tegenfeitelijk redeneren (zou Y zijn opgetreden als X er niet was?), redeneren met negatieve evidentie voor hypothesen, selectie van gegevens, redeneren over de consequenties van complexe interacties [257].

Kennissystemen kunnen mensen dienen als gereedschap. Zij vormen daarin een nieuwe klasse, te gebruiken ter versterking van menselijke kennis en denkvermogens, zoals andere gereedschappen menselijke spierkracht of zintuiglijke mogelijkheden versterken.

Wanneer machines kunnen redeneren, kan men zich afvragen wat er op de lange termijn voor de mens overblijft. Aangezien er nog zeer weinig kennissystemen in gebruik zijn, is nog niet met zekerheid te zeggen wat de gevolgen zullen zijn. Wel kunnen, zoals in de volgende paragrafen, vragen worden gesteld en kan worden aangegeven welke gebieden aandacht behoeven.

Door toepassing van kennisgereedschappen kunnen problemen op een hoger abstractieniveau worden opgelost. De complexiteit van deze gereedschappen vereist een zorgvuldig beheer. Kennisbeheer-

ders zullen nieuwe kennis moeten signaleren en toevoegen. Ook zullen zij in staat moeten zijn gebreken op te heffen en de vastgelegde kennis te beveiligen tegen onbevoegd of onjuist gebruik.

## 9.2 Organisatorische aspecten

### Invoering van kennistechniek

Mechanisatie heeft geleid tot vastlegging van menselijke kennis in machines en besturingsalgoritmen. Kennistechniek maakt een volgende stap in deze ontwikkeling mogelijk. De rol van de mens verschuift steeds meer van productie naar ontwerp en innovatie. Hij zal in nieuwe vormen van samenwerking met machines en computers omgaan. Daarbij horen nieuwe organisatiestructuren. Bepaalde taken worden overgenomen door de computer, andere worden complexer en er komen ook nieuwe taken bij. Daarom hoort technische innovatie samen te gaan met sociale innovatie, de aanpassing van organisatiestructuren aan het gebruik van nieuwe techniek [258, 259]. Om problemen te voorkomen, dient de invoering niet louter te worden bepaald door de technische mogelijkheden. Er dient rekening te worden gehouden met de capaciteiten van de gebruikers.

Het nut van de verspreiding van ervaringskennis, opgeslagen in computersystemen die kunnen uitleggen hoe de ervaring wordt toegepast, dient te worden afgewogen tegen de mogelijke risico's. Ervaringskennis heeft voor een bedrijf strategische waarde. Het beheer, de beveiliging en het onderhoud van kennis en alle bijbehorende systemen vormen een nieuwe functie. Periodieke of permanente controle van in kennissystemen vastgelegde bedrijfskennis kan de taak worden van toekomstige kennisaccountants.

### Behoefte aan opleiding

Snelle technische veranderingen hebben grote gevolgen voor de opleidingsbehoefte van technici. De waarde van kennis en vaardigheden neemt snel af, de behoefte aan bij- en omscholing neemt toe. Een voorbeeld is te zien bij geïntegreerde schakelingen. Deze werden oorspronkelijk met microscopen geïnspecteerd, maar daarvoor worden nu robots gebruikt. Binnen de tien jaar is daarmee het nut van de hiervoor benodigde vaardigheid verdwenen en moeten de specialisten worden omgeschoold [260].

Kennistechniek kan daarbij te hulp komen als een deel van de te verwerven kennis kan worden vastgelegd in kennissystemen, bijvoorbeeld in systemen die de bediening van andere systemen vergemakkelijken. Maar naarmate het aantal kennissystemen toeneemt, groeit



ook de behoefte aan mensen die deze systemen kunnen ontwikkelen en onderhouden. Ook deze mensen zullen moeten worden opgeleid. Bedrijven dienen een strategische keuze te maken uit gebieden waarin ontwikkeling van menselijke expertise zal worden gestimuleerd en gebieden waarin menselijke expertise kan worden vervangen door kennissystemen.

### **De gebruiker blijft verantwoordelijk**

Als een mens en een kennissysteem elkaar niet 'begrijpen', is het voor de mens nauwelijks mogelijk de adviezen van het systeem op te volgen. Hij zal niet graag verantwoordelijkheid dragen voor de gevolgen van het opvolgen van een onbegrepen advies. De gebruiker moet daarom inzicht hebben in de werking en de beperkingen van het systeem. Uitlegfaciliteiten zijn voor interactieve systemen van groot belang. Zeker bij kennissystemen voor ontwerp en simulatie is uitleg belangrijk. Bij elke stap moet de gebruiker kunnen ingrijpen. Steeds worden immers beslissingen genomen met consequenties voor latere stappen.

In de toekomst kunnen kennissystemen wellicht metakennis gebruiken om te voorkomen dat zij adviezen geven die hun competentie te buiten gaan. Voorlopig is het de mens die actie onderneemt en daar zelf voor verantwoordelijk is. Hij moet zijn gereedschappen dus met zorg kiezen en adviezen kritisch beoordelen.

Omdat mensen nu eenmaal verschillend zijn, zouden kennissystemen die met mensen moeten samenwerken eigenlijk in staat moeten zijn zich aan te passen aan hun individuele gebruikers of zich door die gebruikers te laten aanpassen. Zolang dat technisch nog niet goed mogelijk is, dienen de gebruikers extra voorzichtig te zijn.

## **9.3 Sociale aspecten**

### **Gevolgen voor de werkgelegenheid**

Net als andere vormen van automatisering heeft invoering van kennissystemen gevolgen voor de werkgelegenheid. Routinewerk wordt in toenemende mate verricht door machines (robots, kennissystemen). Het ingrijpen wanneer de machine er niet meer uitkomt, blijft mensenwerk. Ook de creatieve arbeid die dient plaats te vinden voordat de machines aan het werk kunnen, is typisch mensenwerk. Door de mogelijkheden van de kennistechniek kunnen complexere problemen worden aangepakt en dat leidt tot nieuwe taken voor computers en mensen. Er komen ook taken bij voor mensen die de systemen moeten ontwerpen, besturen en onderhouden. Een goed

productiesysteem maakt immers nog niet automatisch goede producten. Het zijn de menselijke gebruikers die de ideeën moeten hebben en die bepalen waarvoor de systemen worden gebruikt [254].

Hoewel de meeste deskundigen het erover eens zijn dat kennissystemen gevolgen zullen hebben voor de werkgelegenheid, is men het er niet over eens wat deze gevolgen zullen zijn [261]. In Duitsland is geconcludeerd dat kennissystemen geen wezenlijk andere gevolgen voor de werkgelegenheid hebben dan automatisering in het algemeen [262]. Gebruik van kennissystemen zal in principe kunnen leiden tot hogere produktiviteit en lagere uitval. Dit kan twee organisatorische consequenties hebben. Men kan hetzelfde werk doen met minder mensen, of men kan met hetzelfde aantal mensen meer werk verzetten. Meer werk betekent niet alleen een hogere produktie, maar bijvoorbeeld ook constantere kwaliteit, meer flexibiliteit, alsmede een produktie die beter is afgestemd op de vraag. In de praktijk heeft automatisering beide gevolgen. Het lijkt niet onwaarschijnlijk dat gebruik van kennissystemen dezelfde effecten zal hebben als automatisering in het algemeen.

### Gevolgen voor experts

Wanneer deskundigheid in kennissystemen beschikbaar is, kan men zich afvragen wat er gebeurt met experts. Zullen zich nog nieuwe experts ontwikkelen? Krijgen opleidingen een andere vorm en inhoud?

Er zijn diverse redenen waarom kennissystemen menselijke experts niet overbodig zullen maken. Een eerste reden is gelegen in de beperkingen van kennissystemen. Een andere is dat mensen in moeilijke gevallen vaak meer dan één deskundige willen raadplegen [260]. Er zal behoefte blijven bestaan aan contra-expertise.

Experts kunnen ook zelf gebruik maken van kennissystemen, namelijk voor routinewerk en als hulpmiddel bij moeilijke gevallen. Bovendien ontstaat expertise niet van de ene dag op de andere. Het genereren van nieuwe kennis kan daarom ook niet worden overgelaten aan computersystemen. Hoewel kennissystemen kunnen worden gebruikt om kennis door vastlegging te behouden, is voor de ontwikkeling en het onderhoud van dergelijke systemen wel inzicht over de werking en de vastgelegde kennis nodig. Voor onderhoud en uitbreiding is het bovendien essentieel dat men ook nog na verloop van tijd dit inzicht behoudt.

Bovendien dreigt er een gevaar dat experts in wording niet de kans krijgen zich te ontwikkelen omdat zij niet in de gelegenheid worden gesteld praktijkervaring op te doen op gebieden waar kennissystemen worden toegepast.



### Sociale verschraling

Het gebruik van kennissystemen kan leiden tot sociale verschraling. Deze verschraling is al geconstateerd bij gebruikers van CAD-werkstations. Dezen raken geïsoleerd van hun collega's en communiceren slechts met en via hun werkstation [263]. Gebruikers van computers vertonen soms zelfs de neiging eigenschappen van hun computersysteem te projecteren op collega's. Bovendien wordt het, vooral wanneer de gereedschappen een bepaalde 'intelligentie' vertonen, verleidelijk de verantwoordelijkheid voor beslissingen of fouten af te schuiven op de computer.

Onderzoek van Kiesler (zie [263]) heeft uitgewezen dat managers die elektronisch communiceren, grotere risico's nemen. Persoonlijke communicatie gaat gepaard met risicomijdend gedrag. In elkaars fysieke aanwezigheid besteden mensen meer aandacht aan het benadrukken van hun gezichtspunten en het inbrengen van subtiele, maar belangrijke informatie. Bij elektronische communicatie worden minder woorden gebruikt en nemen deelnemers meestal geen blad voor de mond. Door het ontbreken van een sociale context voelt men zich vrij zich zo uit te drukken. Ook nemen personen die in een direct gesprek weinig aan bod zouden komen, langs elektronische weg gemakkelijker het woord. Sociale status speelt daarbij een geringere rol dan bij niet-elektronische communicatie. In een systeem voor elektronische post kan met evenveel moeite een boodschap worden verstuurd aan duizenden mensen als aan één. Computerberichten kunnen worden verzonden wanneer het de zender schikt. Een afspraak maken is niet nodig. Een achterhaalde boodschap kan gemakkelijk worden gewist en vervangen door een nieuwe. Daardoor is de drempel tot elektronische communicatie laag voor wie eenmaal de techniek beheerst. Tegenover deze gemakken staat echter een aantal nadelen, zoals het ontbreken van een sociale context. Een zender kan niet uit houding, gezichtsuitdrukking of andere non-verbale uitingen van de ontvanger opmaken hoe zijn boodschap overkomt. De ontvanger krijgt alleen een boodschap en geen ondersteunende informatie over de zender, zoals briefhoofd of handtekening. Sfeer, toon, verbondenheid of sociale normen spelen geen rol in elektronische communicatie. Kinderen leren daardoor bijvoorbeeld sneller spelen met computers dan met elkaar. Zo zal een computer geen ruzie maken of boos worden als hij een spelletje verliest [264].

Als techniek een plaats krijgt tussen mensen onderling, houdt dat een gevaar in. Wie de techniek niet gebruikt, wordt niet gehoord. Wat de instrumenten niet kunnen meten, wordt voor het gemak genegeerd. Wat niet berekenbaar is, past niet in het systeem. Wat niet op het scherm verschijnt, krijgt geen aandacht. Het gevaar dreigt dat de

gebruiker van geautomatiseerde systemen de wereld alleen nog maar door een beeldscherm ziet.

Tussenkost van systemen vergroot de afstand tussen mensen. Banken die hun klanten de faciliteiten aanbieden van geldautomaten en telebankieren, hebben gemerkt dat baliemedewerkers minder goed op de hoogte zijn van wat onder de klanten leeft. Om de band met de klant nauwer aan te halen, laat men baliemedewerkers een breder dienstenpakket aanbieden. Daarbij worden zij ondersteund door kennissystemen waarin kennis over deze diensten beschikbaar is [3].

### Wordt de mens afhankelijk van de computer?

Menselijke kennis is nooit in al zijn facetten reproduceerbaar. Mensen zijn in staat te leren en hun kennis te ontwikkelen in een veranderende omgeving. Zolang er nog geen lerende systemen zijn, is kennis in een kennissysteem statisch. Dergelijke kennis is wel dupliceerbaar, maar voor het juiste gebruik blijven mensen nodig.

Daarmee is niet gezegd dat iedereen daar steeds bij betrokken zal zijn. Wanneer informatie en kennis door een druk op de knop beschikbaar zijn, ligt het voor de hand dat vaardigheid op de betreffende gebieden bij sommigen zal verdwijnen. Het aantal mensen dat van dergelijke domeinen meer weet dan de computer zou kunnen afnemen. Scholieren die gewend zijn rekenmachines te gebruiken, verwaarlozen hun hoofdrekenvaardigheid. Is de batterij op, dan wordt er niet meer gerekend. Dit gevaar dreigt uiteraard ook bij adviessystemen die bij besluitvorming worden gebruikt.

Het gebruik van gereedschappen gaat gepaard met andere werkwijzen. Wie een tekstverwerker gebruikt, maakt zich weinig zorgen om tikfouten. Deze kunnen eenvoudig worden verbeterd. De invoersnelheid kan daarom hoger zijn dan op een gewone schrijfmachine. De invoer eist minder aandacht, zodat de schrijver zich kan concentreren op de inhoud. Is hij deze werkwijze eenmaal gewend, dan is schrijven op een gewone schrijfmachine een stuk moeilijker geworden, tenzij men een grote hoeveelheid tikfouten voor lief neemt. Ook bij het gebruik van kennissystemen kan men verleren problemen op te lossen zonder deze gereedschappen.

De beschikbaarheid van kant en klare kennis kan remmend werken op de ontwikkeling van eigen kennis. Een deskundige van Carnegie-Mellon University vergeleek de opkomst van computernetwerken met de opkomst van de lopende band [254]. Universiteiten worden daarmee tot fabrieken, waar aan de lopende band kennis wordt geproduceerd. Bij het gehalte van deze kennis wordt in dergelijke beschouwingen meestal niet stilgestaan.



### Verdere informatie en aanbevolen literatuur

In Duitsland heeft in 1987 een commissie met onder andere medewerkers van het Battelle-Institut een rapport aan de Bundestag gepresenteerd over 'Chancen und Risiken von Expertensystemen in Produktion, Verwaltung, Handwerk und Medizin' [262]. Men concludeert onder andere dat voorspellingen op dit gebied nog niet mogelijk zijn, dat kennissystemen een belangrijke speerpunt in de automatisering zijn, maar van geringer belang dan de ontwikkeling van micro-elektronica. De situatie in Duitsland lijkt weinig af te wijken van die in Nederland, zij het dat in Nederland relatief meer systemen worden ontwikkeld in de dienstensector [3] en in Duitsland de industrie voorop loopt.

Meer over gevolgen en beperkingen van kennissystemen is te vinden in [253, 254, 255, 261, 265, 267]. [265] bevat bovendien een uitgebreide bibliografie. De Nederlandse situatie wordt besproken in [3, hoofdstuk 8 van dit boek, 268 en 269].

---

## Bijlage Gereedschappen

Voor ontwikkeling en onderhoud van kennissystemen zijn diverse gereedschappen beschikbaar. In deze bijlage ligt de nadruk op de gereedschappen die commercieel verkrijgbaar zijn. Uiteraard veroudert een overzicht van commerciële produkten snel. Daarom worden in dit boek slechts categorieën en voorbeelden gegeven (zie afb. B.1). Uitgebreidere overzichten zijn te vinden in [268, 270] en in vele rapporten van marktonderzoeken, bijvoorbeeld [271]. Het tijdschrift 'Kennissystemen' besteedt speciaal aandacht aan produkten die in Nederland verkrijgbaar zijn en hier worden gebruikt [272]. Ook het Babbage Institute for Knowledge and Information Technology (BIKIT) te Gent publiceert rapporten over gereedschappen, vooral voor gebruik op microcomputers [273].

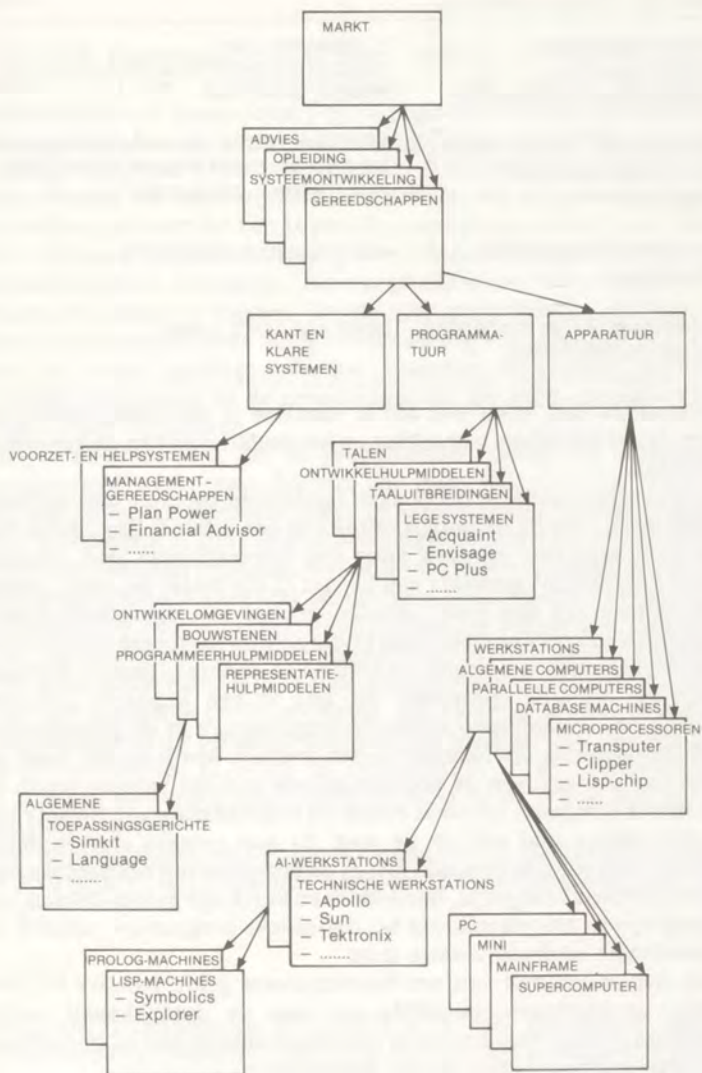
### B.1 Programmatuur

Kennissystemen kunnen worden ontwikkeld met conventionele programmeertalen zoals FORTRAN of PASCAL, maar dat is niet gebruikelijk. Meestal wordt gebruik gemaakt van een taal die speciaal geschikt is voor symboolverwerking. De bekendste talen voor symboolverwerking zijn LISP en PROLOG. PROLOG is eigenlijk geen gewone programmeertaal, maar behoort – met OPS5 en ROSIE – tot de representatietalen. Dergelijke talen hebben een ingebouwd mechanisme voor representatie en toepassing van kennis. Andere speciale talen, zoals SMALLTALK en FLAVORS, zijn vooral geschikt voor object-georiënteerd programmeren. Naast en gebaseerd op deze programmeer- en representatietalen is er veel andere programmatuur. Daarvan bestaan verscheidene categorieën (zie tabel B.1). Sommige hulpmiddelen fungeren als bouwstenen, die bijvoorbeeld kunnen worden gebruikt voor de ontwikkeling van systemen voor simulatie, natuurlijke taal of toepassingen in een bepaalde bedrijfstak. In deze bijlage zal een aantal representatieve voorbeelden worden behandeld. Meer gedetailleerde beschrijvingen zijn onder andere te vinden in [270 en 268].

#### Talen

Bij de keuze van een taal is het niet alleen van belang dat deze de juiste representatiemethoden en inferentiemogelijkheden bezit voor speci





Afb. B.1 De markt voor gereedschappen.

Tabel B.1 Programmatuur.

programmeertalen	C, (COMMON) LISP
speciale talen en programmeerhulpmiddelen	FLAVORS, INTERLISP, OPS5, POPLOG, PROLOG, SCHEME, SMALLTALK
lege systemen (empty shells) en eenvoudige ontwikkel- omgevingen	ACQUAINT, DELFI-2, ENVISAGE, ESP/ADVISOR, EXPERTEASE, FRAME ENGINE, GOLDWORKS, KES, PERSONAL CONSULTANT PLUS, XI
geavanceerde ontwikkel- omgevingen	ART, KEE, KNOWLEDGE CRAFT
bouwstenen en op toepassing gerichte uitbreidingen	LANGUAGE CRAFT, SIMKIT

fieke problemen, maar ook dat is voorzien in efficiënte faciliteiten voor de ontwikkeling, aanvulling en het onderhoud van de kennisbestanden.

Hoewel conventionele talen deze faciliteiten meestal niet hebben, wordt soms toch bij de ontwikkeling van een uiteindelijke versie van een kennissysteem gekozen voor een conventionele taal. Daarbij wordt veel gebruik gemaakt van de taal C, die onder het UNIX-besturingssysteem op een grote verscheidenheid aan computers draait. Herschrijven in een taal als C kan nodig zijn, bijvoorbeeld wanneer het systeem zal worden gebruikt temidden van andere systemen (bijvoorbeeld op dezelfde computer) die alle in een bepaalde taal zijn geschreven. Omdat in zo'n situatie programma's in de gebruikelijke taal vermoedelijk doelmatiger zullen werken, wordt er dan vaak de voorkeur aan gegeven de productieversie van het kennissysteem in die taal te schrijven. Dit staat echter de ontwikkeling van prototypen in een andere taal niet in de weg. Er kan immers een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen de ontwikkeling van prototypen, waarbij ontwikkelingstijd, flexibiliteit en krachtige hulpmiddelen van belang zijn en het gebruik van het definitieve programma, waarbij de operationele snelheid voorop staat.

Voor het onderhoud van het kennissysteem geldt, behalve bij zeer kleine aanpassingen, hetzelfde als voor de ontwikkeling, zodat systemen die zijn geschreven in een conventionele taal na onderhoud opnieuw zullen moeten worden geschreven.

Een van de belangrijkste criteria bij de keuze van een taal is de beschikbaarheid van een beproefde ontwikkelomgeving. Het schrijven van een kennissysteem is een lang en moeilijk proces, dat gebaat is bij krachtige hulpmiddelen. Hierbij is het van belang te letten op de verschillen in toepasbaarheid van dergelijke hulpmiddelen. Een hulpmiddel dat bij uitstek geschikt is voor diagnostische problemen leent zich vaak minder goed voor ontwerpproblemen.



## LISP

LISP (LISt Processing) is in de jaren vijftig op MIT ontwikkeld als speciale taal voor *symbolverwerking*. In LISP bestaat geen onderscheid tussen de programma's en de gegevens waarmee de programma's werken. Een programma kan dus zelf als invoer dienen voor een ander programma. De besturing in LISP-programma's geschiedt vaak door middel van *recursie*, dat wil zeggen dat een programma zichzelf net zolang uitvoert tot aan bepaalde condities is voldaan. LISP heeft een modulair karakter waarin iedere moduul bestemd is voor een bepaalde *functie*. Dit maakt LISP zeer geschikt voor het vastleggen van kennis in regels en frames. Omdat LISP-programma's zelf bepalen hoeveel geheugenruimte nodig is voor opslag van gegevens, kent LISP ook de functie '*garbage collection*', waarmee ongebruikte gegevens worden opgeruimd en de geheugenruimte die deze gegevens innamen, wordt vrijgegeven.

LISP is een lage taal, die de programmeur dwingt tot omvangrijk programmeerwerk, maar die ook alle mogelijkheden biedt voor de ontwikkeling van gereedschappen en uitbreidingen. Zo heeft menige LISP-programmeur zijn eigen uitbreidingen geschreven. Hierdoor zijn veel LISP-dialecten ontstaan. Met de introductie van het als standaard bedoelde COMMON-LISP lijkt de wildgroei van dialecten tot stand te zijn gebracht. Vele fabrikanten van apparatuur kiezen voor COMMON-LISP als het dialect dat op hun apparatuur beschikbaar wordt gesteld. Het grote aantal haakjes in LISP-programmatuur maakt LISP-programma's soms tamelijk onoverzichtelijk. Daarom zijn diverse aanvullingen ontwikkeld die programmering in LISP vergemakkelijken, zoals de *ontwikkelssystemen* FLAVORS en INTERLISP-D en de LISP-machines. SCHEME is een versie van COMMON-LISP die veel wordt gebruikt op microcomputers.

Een goed overzicht van de LISP-dialecten en hun ontstaan is te vinden in [270 en 271]. In [274] wordt ingegaan op theoretische aspecten van LISP.

## PROLOG

PROLOG (PROgramming in LOGic) is in 1972 ontwikkeld aan de Universiteit van Marseille. De taal is van oudsher populair in Europa, maar sinds 1986 ook in de Verenigde Staten. In Japan is PROLOG gekozen als taal voor 'vijfde generatie' computersystemen. Deze keuze komt mede voort uit de veronderstelling dat PROLOG zich beter dan LISP leent voor programmering van parallele computers. Na verloop van tijd is men in Japan echter afgestapt van PROLOG en overgeschakeld op een eigen taal, KLI, die wel overeenkomsten vertoont met PROLOG, maar breder toepasbaar is [275, 276].

PROLOG is gebaseerd op een bepaalde vorm van logica, waarin feiten en regels over objecten en over relaties tussen objecten kunnen worden vastgelegd. Inferentie in PROLOG geschiedt terugwaarts. PROLOG is vooral geschikt gebleken voor toepassingen op het gebied van natuurlijke taal en gegevensbestanden. Ook ontwerpprogramma's waarin randvoorwaarden een grote rol spelen, lenen zich voor ontwikkeling in PROLOG.

Systeemontwikkeling in PROLOG kan voor beginnende gebruikers gemakkelijker zijn dan gebruik van LISP, omdat PROLOG-programma's beter leesbaar zijn. Ook voor PROLOG zijn hulpmiddelen verkrijgbaar. Sinds 1986 zijn er speciale PROLOG-machines ontwikkeld in het kader van het Japanse 'vijfde generatie' project [268]. Ook zijn er diverse ontwikkelomgevingen in ontwikkeling. In [273 en 271] wordt een aantal versies van PROLOG besproken. In [278 en 279] wordt de theorie uitgewerkt.

#### *SMALLTALK, OPSS, POPLOG en ROSIE*

Steeds meer programmeerhulpmiddelen en ontwikkelomgevingen bieden faciliteiten voor *object-georiënteerd* programmeren. Een taal die daarvoor speciaal is ontwikkeld, is SMALLTALK [280]. SMALLTALK/V is een goedkope versie voor gebruik op microcomputers.

OPSS is oorspronkelijk ontwikkeld aan Carnegie-Mellon University als uitbreiding van LISP voor psychologisch onderzoek [281, 282]. Later is het door de computerfirma Digital Equipment Corporation gebruikt voor de ontwikkeling van het XCON-systeem voor de configuratie van computers.

In OPSS wordt kennis gerepresenteerd in de vorm van produktieregels. De taal leent zich daarom vooral voor de ontwikkeling van produktiesystemen die louter uit regels bestaan. Het systeem maakt gebruik van vooruit redeneren en heeft twee ingebouwde strategieën voor conflictoplossing (de keuze van één regel als verscheidene regels gelijktijdig worden geactiveerd).

POPLOG biedt een combinatie van onder andere LISP en PROLOG [283]. Het is in Nederland verkrijgbaar, onder andere op VAX-computers. ROSIE is voor eigen gebruik ontwikkeld door de Rand Corporation. De taal lijkt op Engels en biedt faciliteiten voor ontwikkeling van systemen die communiceren met gegevensbestanden. ROSIE is gebaseerd op LISP.

#### **Lege systemen**

Lege systemen, ook wel bekend als 'shells', zijn kennissystemen zonder kennis. De kennisanalist hoeft alleen nog maar domeinkennis



in te voeren. Het inferentiemechanisme en andere faciliteiten zijn reeds ingebouwd. De meeste lege systemen hebben een vaste vorm van kennisrepresentatie, meestal gebaseerd op produktieregels (zie hoofdstuk 3).

Er zijn veel lege systemen te koop. De prijzen variëren sterk. De meeste zijn zeer beperkt toepasbaar en lenen zich slechts voor de ontwikkeling van kleine kennissystemen. Er zijn lege systemen ontwikkeld in LISP en verscheidene andere talen. Het gemak van lege systemen heeft geleid tot een grootscheepse ontwikkeling van commerciële systemen die geschikt zijn voor een microcomputer.

In Nederland zijn twee van dergelijke systemen ontwikkeld. DELFI-2 is ontwikkeld aan de Technische Universiteit Delft. ACQUAINT is ontwikkeld door Lithp Systems en wordt als tot nu toe enig Nederlands AI-product ook in het buitenland verkocht. De nieuwste versies van DELFI (DELFI-3, in ontwikkeling in 1988) en ACQUAINT bieden meer faciliteiten dan de traditionele lege systemen en worden ook wel tot de ontwikkelomgevingen gerekend.

Het belangrijkste voordeel van lege systemen is dat de kennisanalist zich niet hoeft te bekommeren om de ontwikkeling van een speciaal inferentiemechanisme of de keuze van een representatievorm. Ook speciale communicatiefuncties, zoals koppelingen en uitlegfaciliteiten, hoeven niet meer te worden ontworpen. Andere voordelen zijn de winst aan programmeertijd en het feit dat voor het gebruik geen grote ervaring met specifieke AI-technieken nodig is. Daarom zijn lege systemen vooral aantrekkelijk voor de snelle ontwikkeling van prototypen.

### Ontwikkelomgevingen

Voorbeelden van ontwikkelomgevingen, die vooral zijn bedoeld voor gebruik op krachtige microcomputers (met 80386 of 68020 processor) zijn PERSONAL CONSULTANT, KES, NEXPERT en GOLDWORKS. KES draait bovendien op machines met het UNIX-besturingssysteem. Ook PROLOG kan men als een elementaire programmeeromgeving beschouwen, waarin de representatievorm en het inferentiemechanisme zijn vastgelegd. De meeste lege systemen en eenvoudige ontwikkelomgevingen zijn afkomstig uit de Verenigde Staten. Er zijn de laatste jaren echter ook diverse Europese produkten ontwikkeld.

De grotere ontwikkelomgevingen draaien veelal op werkstations en soms op minicomputers. In deze ontwikkelomgevingen zijn faciliteiten voorgeprogrammeerd die de eigenlijke ontwikkeling vereenvoudigen. De componenten van het kennissysteem en diverse faciliteiten kunnen door de gebruiker zelf worden samengesteld uit de bouwstenen die in een ontwikkelomgeving aanwezig zijn. De laatste jaren

komen er ook steeds meer ontwikkelomgevingen voor gebruik op mainframes, zoals diverse producten van Aion Corporation, het verwante ESE van IBM en TWAICE, de diagnoseshell van Nixdorf.

In de praktijk is gebleken dat systemen waarin de kennis is vastgelegd in heuristische produktieregels, een beperkte toepasbaarheid hebben. Voor ingewikkelde problemen is ook diepe kennis nodig. Daarvoor zijn objecten en frames zeer geschikt. Ontwikkelomgevingen bieden de mogelijkheid tot ontwikkeling van hybride systemen, waarin enkele vormen van kennisrepresentatie worden gecombineerd. Ook laten de meeste ontwikkelomgevingen diverse programmeertechnieken toe.

Een voorbeeld van een ontwikkelomgeving is KEE (Knowledge Engineering Environment), ontwikkeld door Intellicorp [284]. In 1987 waren er ongeveer 1.500 exemplaren van dit gereedschap in gebruik. Ook in Japan is KEE populair. Met KEE kan men geavanceerde kennissystemen ontwikkelen, waarin van zowel frames als produktieregels gebruik wordt gemaakt. KEE is in Nederland onder andere verkrijgbaar bij Unisys en ook IBM is van plan met een versie van KEE te komen. Vooral het laatste betekent een grote erkenning voor dit produkt. Andere vergelijkbare ontwikkelomgevingen zijn ART (Automatic Reasoning Tool) van Inference Corporation en KNOWLEDGE CRAFT van Carnegie Group Inc. [285]. Alle zijn in Nederland verkrijgbaar. Ook LOOPS van Xerox behoort tot deze categorie; het is goedkoop verkrijgbaar, maar wordt niet ondersteund en is sinds 1987 in Nederland niet meer officieel leverbaar.

In het algemeen zijn deze geavanceerde ontwikkelomgevingen onontbeerlijk voor de ontwikkeling van complexe kennissystemen. Vaak is echter ook nog programmering in een lagere taal nodig, omdat de huidige ontwikkelomgevingen nog niet alle faciliteiten standaard bieden.

### Aanvullende componenten

Ter aanvulling van de grote ontwikkelomgevingen zijn diverse voorgeprogrammeerde uitbreidingen te koop. Als aanvulling op KEE is SIMKIT leverbaar, dat faciliteiten biedt voor de ontwikkeling van simulatieprogrammatuur. Als uitbreiding op KNOWLEDGE CRAFT bestaan LANGUAGE CRAFT, voor programmering van systemen die natuurlijke taal verwerken, en SIMULATION CRAFT voor simulatie. Ook zijn er uitbreidingen, gericht op toepassing in bepaalde bedrijfstakken of voor taken die in diverse gebieden voorkomen. Voorbeelden van de laatste categorie zijn PICON (zie par. 5.3) voor procesbesturing en TEST voor diagnose [286]. Ook zijn er diverse systemen voor storingsdiagnose en de planning van fabricage. Deze systemen zijn nog niet



compleet, maar bevatten basiskennis van het betreffende domein. Deze kennis dient te worden aangevuld met de specifieke kennis van de gebruikersorganisatie en de daar werkzame experts. Dergelijke producten zijn vooral in de financiële wereld sterk opgekomen. Ze worden daar veelal gebruikt door gespecialiseerde staffunctionarissen en managers.

## B.2 Apparatuur

### Conventionele computers

Veel kennissystemen zijn ontwikkeld met en worden gebruikt op conventionele computers. Vooral de VAX-minicomputers van Digital Equipment Corporation worden veel gebruikt, maar kennissystemen kunnen ook op mainframes en supercomputers worden ontwikkeld. Tijdens oriëntatie en onderzoek wordt veel gebruik gemaakt van microcomputers. Gezien de lage prijs van microcomputers en het grote aantal geïnstalleerde apparaten, is er een grote markt voor gereedschappen die op microcomputers kunnen worden gebruikt. Bovendien ligt de verhouding tussen prijs en prestatie bij microcomputers gunstiger dan bij grotere systemen. Vooral van de nieuwste microprocessors (INTEL 80386, in mindere mate MOTOROLA 68030) wordt veel verwacht. Er is dan ook een groot aanbod op dit gebied. Behalve microcomputers worden in Nederland ook veel technische werkstations en diverse UNIX-computers gebruikt.

### Speciale computers

Voor de commerciële toepassing van kennissystemen zijn korte ontwikkelingstijd en hoge operationele snelheid van groot belang. Daarom zijn speciale voor AI-toepassingen geschikte computers ontwikkeld, zoals LISP-machines (bijv. SYMBOLICS, EXPLORER), en PROLOG-machines (Mitsubishi, Fujitsu). Ook technische werkstations (SUN, APOLLO, HP, TEKTRONIX, VAX-station, IBM-RT) kunnen worden gebruikt. Het voordeel van deze systemen is dat zij volledig ter beschikking staan van één gebruiker en speciaal geschikt zijn voor de ontwikkeling van complexe systemen. In [270] is een uitstekend overzicht gegeven van deze en vergelijkbare systemen. In [276] wordt ingegaan op de eigenschappen van de PSI (Personal Sequential Inference machine), de PROLOG-machine die is ontwikkeld in het Japanse 'vijfde generatie' project. Deze machine heeft een zeer groot werkgeheugen (honderden Mb), in vergelijking met LISP-machines (tientallen Mb) en microcomputers (ca. 1 Mb). In 1987 werd ook een Engelse PROLOG-machine aangekondigd, de DLM (Declarative Language Machine) van British Aerospace.

*LISP-machines*

LISP-machines zijn speciaal ontwikkeld voor efficiënte ontwikkeling en verwerking van LISP-programma's [287, 288]. Het zijn krachtige minicomputers voor persoonlijk gebruik, waarvan het besturingssysteem in LISP is geschreven. De LISP-machine is in de jaren zeventig op MIT ontwikkeld. De ontwikkeling van de LISP-machine betekende een grote stimulans voor het academische AI-onderzoek. LISP-machines waren aanvankelijk zeer duur in vergelijking met traditionele persoonlijke computers. De prijzen daalden echter gestaag. In 1986 werden in de Verenigde Staten enkele duizenden LISP-machines gebruikt. In Japan waren het enkele honderden, in Nederland circa tien.

In 1986 werkten diverse bedrijven aan de ontwikkeling van LISP-machines op één chip. Texas Instruments bracht in 1987 de eerste op zo'n chip gebaseerde machine op de markt (EXPLORER II). Andere leveranciers deden aankondigingen. Toch wordt betwijfeld of de LISP-machine zich na de komst van 32 bits-microcomputers lang kan handhaven. In 1987 ging het duidelijk slecht met de meeste fabrikanten van LISP-machines. De pionier, LMI, werd opgekocht door een Canadese computerfirma. Andere bedrijven moesten personeel ontslaan. Wanneer LISP-chips leverbaar zullen zijn op insteekkaarten voor gebruik in microcomputers zal het belang van specifieke LISP-machines waarschijnlijk afnemen, al missen microcomputers nu nog de grafische capaciteiten van een LISP-machine of van een werkstation.

*Werkstations*

Werkstations zijn computers die kunnen worden gebruikt voor technische toepassingen zoals ontwerp van micro-elektronicascakelingen, animatie en speciale effecten, opmaak van publikaties enz. Bekende leveranciers zijn Sun, Apollo, Tektronix en HP. Ook grote apparatuurfabrikanten als Digital Equipment Corporation en IBM leveren werkstations.

Werkstations, die slechts door één persoon tegelijk worden gebruikt, bieden de verwerkingscapaciteit van een minicomputer en het bedieningsgemak van een Apple Macintosh. Een van de opvallende uiterlijke kenmerken van een werkstation is het grote scherm met een hoog oplossend vermogen [289].

Voor LISP en op LISP gebaseerde ontwikkelomgevingen bieden alleen de grotere werkstations evenveel verwerkingskracht als de echte LISP-machines. De prijs ligt echter wel aanmerkelijk lager, mede door de bredere toepasbaarheid van werkstations en de daardoor grotere markt. In 1986 was de prijs van een werkstation reeds in de orde van grootte van f 50.000 (exclusief programmatuur), slechts twee keer zo



hoog als de prijs van een microcomputer. De goedkoopste werkstations, die niet veel verschillen van de grootste microcomputers kostten in 1987 al minder dan ca. f 25.000.

#### *Nieuwe persoonlijke werkstations*

Marktanalisten verwachten daarom dat werkstations (ontstaan als mini- of supermicrocomputer voor persoonlijk gebruik) en microcomputers qua prijs en prestatie naar elkaar toe zullen groeien. Begin 1986 werden de eerste PC-coprocessoren voor werkstations aangekondigd, waarmee MS-DOS-toepassingen in een afzonderlijk venster op een werkstation kunnen draaien. Ook in de sfeer van hobbycomputers kwamen in 1987 en 1988 diverse werkstations op de markt, voor zeer lage prijzen (o.a. Acorn Archimedes en Atari). Diverse fabrikanten hebben zich toegelegd op de ontwikkeling van betaalbare werkstations voor het onderwijs.

Bovendien zijn ook de fabrikanten van microcomputers bezig met het ontwerp van persoonlijke computers met zeer grote interne geheugens, die de gemakkelijke bediening van de microcomputer combineren met de kracht van een werkstation. Verwacht mag worden dat na 1990 de grenzen tussen werkstations en andere computers voor persoonlijk gebruik zullen zijn vervaagd. Dit is bijvoorbeeld te zien aan de ontwikkeling van de Apple Macintosh, de voorloper van veel van deze machines.

#### **Speciale microprocessors**

Begin 1986 maakte Bell Labs (het onderzoeksinstituut van AT&T) bekend er in te zijn geslaagd een chip te vervaardigen met een ingebakken kennissysteem [290]. Doordat het hele kennissysteem op de chip aanwezig is, kan het veel sneller werken dan wanneer de instructies één voor één uit een computergeheugen moeten worden aangevoerd. De chip, die gebruik maakt van vage logica, kan worden toegepast in robots of computersystemen voor procesbesturing. AT&T verwacht dat in de nabije toekomst diverse geavanceerde apparaten met zulke chips zullen worden uitgerust ten behoeve van bedieningsgemak, foutdiagnose en onderhoud, besturing, communicatie met andere systemen enz.

Texas Instruments is in 1987 begonnen met de produktie van de 'Explorer on a chip', een complete LISP-machine op een chip. Symbolics kondigde in datzelfde jaar de 'Ivory' LISP-chip aan, die van 1988 af behalve COMMON-LISP ook PASCAL, FORTRAN en PROLOG moet ondersteunen. Ook in Japan zijn LISP-chips ontwikkeld.

RISC (Reduced Instruction Set Computers) is een chip met een architectuur die de mogelijkheid biedt voor snelle verwerking van een

beperkt aantal veel gebruikte instructies. Verder is RISC ontworpen om alle programmering in een hogere programmeertaal uit te voeren. Dit is vooral nuttig voor computers die speciaal zijn bedoeld voor een specifiek toepassingsgebied, zoals het geval is bij technische werkstations. Na enige jaren aarzeling zijn steeds meer fabrikanten overgegaan op de ontwikkeling van RISC-werkstations (IBM, HP, Acorn Archimedes en vele andere).

De TRANSPUTER, een door Inmos in 1985 geïntroduceerde RISC-chip, heeft behalve een verwerkingseenheid ook faciliteiten voor communicatie en geheugenopslag op de chip zelf. Hierdoor zijn in theorie zeer hoge verwerkingssnelheden mogelijk en kunnen transputers worden gekoppeld tot parallele systemen zonder dat daarvoor extra programmatuur nodig is. De transputer kan worden geprogrammeerd in een speciale taal, OCCAM, die echter in 1988 nog niet veel werd gebruikt. Wel zijn er hulpprogramma's waarmee de transputer kan worden geprogrammeerd in meer gangbare talen zoals C. In 1987 zijn diverse grafische toepassingen gepresenteerd, waarin enkele transputers zeer snel blijken samen te werken. In een ESPRIT-project wordt gewerkt aan een op Transputers gebaseerde parallele computer.

De CLIPPER van Fairchild is een vergelijkbaar produkt dat bestaat uit drie chips, een 32-bits microprocessor en twee 4K geheugens (CACHE). Deze zeer snelle combinatie (vier keer zo snel als een VAX 11/780) is speciaal ontwikkeld voor verwerking van UNIX-toepassingen.

Verwacht wordt dat de ontwikkeling van deze en andere speciale microprocessors zal leiden tot insteekkaarten en uitbreidingseenheden waarmee microcomputers en werkstations kunnen worden uitgebreid. De rol van speciale LISP- en PROLOG-machines zou daardoor op den duur kunnen afnemen.

#### *Parallele computersystemen*

In parallele computersystemen zijn verscheidene processoren aanwezig, die ieder een eigen taak uitvoeren [291, 292, 293]. Een goed overzicht van de stand van zaken en de diverse architecturen is te vinden in [294]. Parallele verwerking vereist programmatuur waarmee het mogelijk is een aantal transacties tegelijk te laten plaatsvinden. Zo zullen deze systemen een aantal produktieregels tegelijkertijd kunnen toepassen of inferentieketens op een aantal abstractioneniveaus tegelijkertijd kunnen evalueren. In Nederland wordt onder andere bij Philips en aan de universiteiten te Amsterdam en Delft naar dergelijke systemen onderzoek gedaan.

Ook psychologen doen onderzoek naar parallele systemen omdat die qua structuur meer overeenkomen met de menselijke hersenen dan traditionele computerarchitecturen ('connectivisme'), [295, 296, 297]. De CONNECTION MACHINE bestaat in sommige versies uit meer dan 64.000 processoren.



Halverwege 1986 kwamen de eerste parallelle computers op de markt (onder andere van Thinking Machines Inc.). In [294] wordt een overzicht gegeven van een bepaald soort parallelle computers, de 'hypercubes' [298], die al snel populair zijn geworden. In 1987 werden in de Verenigde Staten reeds meer dan 100 hypercubes gebruikt voor onderzoek. Verwacht wordt dat deze en andere parallelle computers in de jaren negentig een grote rol zullen spelen, niet alleen in de AI, maar ook op gebieden waar traditioneel supercomputers worden gebruikt.

In Nederland doen Shell en de Technische Universiteit Delft onderzoek naar toepassingen van hypercubes, onder andere voor parallelle kennissystemen.

---

## Literatuur

- [1] WITTE, J. DE, KWEE, A., *Kennissystemen in het onderwijs*, STT-publikatie nr. 45, Samsom, 1987
- [2] WITTE, J. DE, KWEE, A., *Kennissystemen en medische besluitvorming*, STT-publikatie nr. 46, Samsom, 1987
- [3] KWEE, A., WITTE, J. DE, *Kennissystemen in de dienstensector*, STT-publikatie nr. 47, Samsom, 1987
- [4] SIMON, H.A., *The sciences of the artificial*, MIT Press, 1982
- [5] Rapporten van marktonderzoekbureaus, Ovum, Frost & Sullivan, Heliview en Butler Cox, samengevat in *Kennissystemen*, eerste jaargang, nr. 1 t/m 6, 1987
- [6] *Expertsystemen in organisaties 1987*, Heliview/KTO/STT, 1987
- [7] FEIGENBAUM, E., *Lezing voor de Amerikaanse ambassade*, Den Haag, 18 november 1987
- [8] WINOGRAD, T., *Understanding natural language*, NY Academic Press, 1972
- [9] NEWELL, A. e.a., GPS: a program that simulates human thought, in: *Computers and Thought*, McGraw Hill, 1963
- [10] LAIRD, J.E. e.a., SOAR: an architecture for general intelligence, *Artificial Intelligence*, No. 1, 1987, pp. 1-64
- [11] MARTIN, W.A. e.a., The MACSYMA system, *Proceedings of the Second Symposium on Symbolic and Algebraic Manipulation*, Los Angeles, 1987
- [12] MCDERMOTT, J., R1, *CMU-CS-80-119*, Carnegie-Mellon University 1980
- [13] HARMON, P. e.a., *Expert systems: artificial intelligence in business*, John Wiley & Sons, 1985
- [14] WATERMAN, D.A., *A guide to expert systems*, Addison-Wesley, 1986
- [15] *New Scientist*, 22 November 1984, blz. 17 e.v.
- [16] *Proceedings Esprit 1986 Conference*, North-Holland, 1986
- [17] Review of progress at the MCC, *IEEE Spectrum*, March 1986
- [18] KWEE, A., Waar blijft de vijfde generatie, *Kennissystemen*, eerste jaargang nr. 6, december 1987
- [19] Artificial Intelligence: the second computer age begins, March 1982
- [20] LENAT, D.B., The nature of heuristics, *Artificial Intelligence*, Vol. 19 en 20, 1982, 1983



- [21] ROMANYCIA, M.H. e.a., What is a heuristic, *Computational Intelligence*, May 1985, pp. 47-58
- [22] DREYFUS, H., *Man over machine*, Free Press, 1986
- [23] DREYFUS, H., *What computers can't do*, Harper & Row, 1979
- [24] WEIZENBAUM, J., *Computer power and human reason*, Freeman, 1976
- [25] ROSZAK, TH., *De informatiecultus, computerfolklore en de kunst van het denken*, Meulenhoff, 1986
- [26] HOFSTADTER, D. (ed.), *The mind's I*, Bantam Books, 1981
- [27] HAGOORT, P. e.a. (red.), *Geest, computer, kunst*, Stichting Grafiet, 1986
- [28] NII, P., Blackboard systems, *AI Magazine*, Spring 1986, pp. 38-53
- [29] HAYES-ROTH, B., The blackboard architecture, *Stanford Heuristic Programming Project*, 1983
- [30] BONNET, A., *Kunstmatige intelligentie*, Addison-Wesley, 1987
- [31] BOBROW, D.G. (ed.), *Representation and understanding*, NY Academic Press, 1975
- [32] SCHANK, R.C., *Computer models of thought and language*, Freeman, 1973
- [33] FINDLER, N.V. (ed.), *Foundations of semantic networks*, NY Academic Press
- [34] SIMMONS, R.F., Semantic networks, in: Schank, R.C., *Computer models of thought and language*, Freeman, 1973
- [35] STEFIK, M. e.a., Object oriented programming: themes and variations, *AI Magazine*, Vol. 6, No. 4, 1986, pp. 40-62
- [36] FIKES, R. e.a., The role of frame-based representation in reasoning, *Communications of ACM* 28:9, 1985
- [37] KOWALSKI, R.A., *Logic for problem solving*, North-Holland, 1979
- [38] KOSEKI, Y., Amalgamating multiple programming paradigms in PROLOG, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 76-82
- [39] WINSTON, P.H., *Artificial Intelligence*, Addison Wesley, second edition, 1984
- [40] HAYES-ROTH, F. e.a., *Building expert systems*, Addison-Wesley, 1983, pp. 61 e.v.
- [41] NUTTER J.T., Uncertainty and probability, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 373-379
- [42] *Medes nieuwsbrief*, Onderzoeksgroep Medische Informatie en besliskunde, Academisch Ziekenhuis Groningen, september 1986
- [43] KANAL, L.N., *Uncertainty in artificial intelligence*, North-Holland, 1986

- [44] ZADEH, L.A., The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems, *Fuzzy Sets and Systems* 2, 1983
- [45] SCHOOTEN, A. VAN e.a., Fuzzy expert systems, *Proceedings FBVI Congres 1987*, 1987
- [46] KUIPERS, B., Qualitative simulation, *Artificial Intelligence*, Vol. 29, September 1986
- [47] DEKLEER, J., Qualitative physics, Computer and Thought Lecture, *Proceedings IJCAI 1987*, 1987
- [48] WELD, D., The use of aggregation in qualitative simulation, *Artificial Intelligence*, Vol. 30, No. 1, October 1986
- [49] WILLIAMS, B., Doing time: putting qualitative reasoning on firmer ground, *Proceedings NCAI 1986*, pp. 105-112
- [50] GELERNTER, D., Programming for advanced computing, in: *Scientific American*, October 1987, pp. 65-72
- [51] HAYES, P.J. e.a., Short time periods, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 981-983
- [52] Artikelen van o.a. Tsang, Ladkin, Raulefs, Kumar e.a. en Schaefer, in: *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 456-475, 502-508
- [53] WATERMAN, D.A., ROTHENBERG, J., Rand Corporation, 'Explanation Project', persoonlijke communicatie, 1986
- [54] VELDE, W. VAN DE, *Learning in second generation expert systems*, lezing, diverse symposia, 1986
- [55] CHANDRASEKARAN, B. e.a., Explanation: the role of control strategies and deep models, in: *Expert systems: The user interface*, Ablex, 1987
- [56] TONG, X. e.a., A tool for second generation expert systems, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 91-96
- [57] STRAT, T.M., The generation of explanations within evidential reasoning systems, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 1097-1104
- [58] JORGENSEN, C. e.a., Catching knowledge in neural nets, *AI Expert*, December 1986
- [59] MICHALSKI, R.S., *Machine learning, Vol. 1*, Tioga Press, 1983
- [60] MICHALSKI, R.S., *Machine learning, Vol. 2*, Morgan Kaufmann, 1986
- [61] NOEST, A.J., Rekenen met neuronale netwerken, *Intermediair*, 8 mei 1987, blz. 5-9
- [62] ALEKSANDER, I. e.a., *De herschappen mens*, Aula, 1986
- [63] KEMPEN, G.A.M. (red.), *Kennis, mens en computer*, Swets en Zeitlinger, 1984
- [64] FOX, M.S. e.a., ISIS, a knowledge-based system for factory scheduling, *Expert Systems*, Vol. 1, July 1984



- [65] RIJN, TH.M.J. VAN, Een typologie van productie-eenheden als gereedschap voor diagnose, in: *Informatie*, speciaal nummer, april 1985, blz. 363-374
- [66] VEEN, E.A. VAN e.a., Generic bills of material in assemble-to-order manufacturing, *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 11, 1987, pp. 1645-1658
- [67] SCOWN, S.J., *The artificial intelligence experience: an introduction*, Digital Equipment Corporation, 1985
- [68] RAUCH-HINDIN, W.B., *Artificial intelligence in business, science and industry, Vol. II Applications*, Prentice Hall, 1985, pp. 26-60
- [69] WINSTON, P.H. e.a., *The AI business*, MIT Press, 1984
- [70] MCDERMOTT, J., RI: a rule-based configurator of computer systems, *Artificial Intelligence*, Vol 19, No. 1, 1982
- [71] MCDERMOTT, J., RI: the formative years, *AI Magazine*, Vol. 2, No. 2, 1981, pp. 21-29
- [72] MCDERMOTT, J., RI revisited: four years in the trenches, *AI Magazine*, Vol. 5, No. 3, 1984, pp. 21-32
- [73] TUINZAAD, G.H., *Integrated information processing for design, planning and control of assembly*, TNO-rapport, 1987
- [74] *Onderzoekplan Spin/Flair-2 project 'Intelligente montagecel'*, Technische Universiteit Delft, 1987
- [75] ERVE, A.H. VAN 'T, XPLANE, a knowledge-based process planning expert system, *Proceedings CAPE*, Edinburgh, 1986
- [76] ZDEBLECK, W.J., Process design by computer, *IEEE Spectrum*, May 1983
- [77] NAU, D.S. e.a., Prospects for process selection using AI, in: *Computers in Industry*, No. 4, 1983, pp. 253-263
- [78] FURTH, B., MICLASS, een systematiek voor de invoering van groepentechnologie, in: *Informatie*, jrg. 27, speciaal nummer, april 1985, blz. 415-423
- [79] FURTH, B., Automated process planning, *Proceedings Computer Aided Manufacturing, current status and challenges*, NATO Advanced Study Institute, August-September 1987
- [80] DARBYSHIRE, I. e.a., EXCAP, an expert system approach to recursive process planning, *16th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Tokio, 1984
- [81] DESCOTTE, Y. e.a., GARI: a problem solver that plans how to machine mechanical parts, *Proceedings IJCAI 1981*, 1981
- [82] IWATA, K. e.a., A knowledge-based computer aided process planning system for machine parts, *16th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Tokio, 1984
- [83] MATSUSHIMA, K. e.a., The integration of CAD and CAM by application of AI techniques, *11th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 1982

- [84] JOSHI, S., Process planning formalization in an AI framework, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 1, No. 1, 1986, pp. 45-53
- [85] *Voorstudie Spin-project 'Een werkvoorbereidingssysteem'*, Universiteit Twente/Centrum voor Wiskunde en Informatica, juli 1987
- [86] ERVE, A.H. VAN 'T, XPLANE, a generative computer aided process planning system for part manufacturing, *Annals of the CIRP*, Vol. 35/2, 1986
- [87] ERVE, A.H. VAN 'T, *Generative computer aided process planning for plant manufacturing, an expert system approach*, proefschrift Universiteit Twente, 1988
- [88] PENG SI OW, e.a., Towards an opportunistic scheduling system, *Proceedings 19th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1986
- [89] SMITH, S.F. e.a., Integrating multiple scheduling perspectives to general detailed production plans, *Proceedings SME Conference on AI in Manufacturing*, Long Beach, Ca, 1986
- [90] HEINZ-FISCHER, H. e.a., Expert supervisory control of a flexible manufacturing system, *Esprit Technical Week*, September 1987
- [91] COSIMA projectteam, Development towards an application activity control, in: *Achievements and Impacts, Esprit 1987*, North Holland, 1987, pp. 1648-1661
- [92] CLARK, M. e.a., Artificial intelligence in production scheduling, in: *Achievements and Impacts, Part 2, Esprit 1987*, North Holland, 1987, pp. 1662-1670
- [93] ROBBINS, H., PEPS: the prototype expert priority scheduler, *Proceedings Autofact 1985*, Detroit, 1985, pp. 13-11-13-34
- [94] LEPAPE, C., SOJA: a daily workshop scheduling system, *Expert Systems*, 1985, pp. 196-211
- [95] BRUNO, G. e.a., A rule-based system to schedule production, *IEEE Computers*, July 1986, pp. 32-40
- [96] FOX, M.S., Artificial intelligence in the factory of the future, *Proceedings ACM Computer Science Conference*, 1984
- [97] COLL, A. e.a., Digital simulation of production systems, in: Falster, P. e.a. (ed.), *Modelling production management systems*, Elsevier, 1985, pp. 175-195
- [98] CARRY, A.S., The role of simulation in FMS, in: Kusiak, A. (ed.), *Flexible manufacturing systems: methods and studies*, Elsevier, 1986, pp. 191-208
- [99] OREN, T. e.a., Concepts for advanced simulation studies, *Simulation*, March 1979, pp. 69-82



- [100] HARHEN, H., Artificial intelligence and simulation of manufacturing systems, in: Kugler, H.J. (ed.), *Information Processing 86*, Elsevier, 1986
- [101] REDDY, Y.V. e.a., Knowledge-based simulation, *IEEE Software*, March 1986, pp. 26-37
- [102] MEYER, W. e.a., Knowledge-based real-time supervision in CIM - the workcell controller, in: *Results and Achievements, Esprit 1986*, Elsevier, 1987
- [103] MEYER, W. e.a., Aspects of knowledge-based factory supervisory systems, ESPRIT-Project 932, *ESPRIT Technical Week*, September 1987
- [104] HOLLEY, U.S., *A JIT manufacturing expert system*, Sperry Technical Symposium, May 1986
- [105] ROTHENBERG, J., Knowledge-based simulation, *Abstracts for AAAI Workshop on AI and Simulation*, Rand Corporation, 1986
- [106] BARR, A. e.a., *The handbook of artificial intelligence, Vol. II*, Morgan Kaufmann, 1982, pp. 370-374
- [107] BUNGERS, D., Using expert systems for the customer service of Ford Europe, in: Bernold, Th. (ed.), *Expert systems and knowledge engineering*, North Holland, 1986
- [108] BROWN, J.S. e.a., Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in SOPHIE I, II and III, in: Sleeman, D. (ed.), *Intelligent tutoring systems*, Academic Press, 1982
- [109] SIEGFRIED, E.M. e.a., ACE: taking an expert system from prototype to product, in: Bernold, Th. (ed.), *Expert systems and knowledge engineering*, North Holland, 1986, pp. 121-132
- [110] BONISSONE, P.P. e.a., Expert system for diesel electric locomotive repair, *Human Systems Management*, No. 4, 1984, pp. 255-262
- [111] RAUCH-HINDIN, W.B., *Artificial intelligence in business, science and industry, Vol. II Applications*, Prentice Hall, 1985, pp. 63-71
- [112] LATHAM, B. e.a., Crash diagnostician for VMS, in: Bernold, Th. (ed.), *Expert systems and knowledge engineering*, North Holland, 1986, pp. 199-206
- [113] PREVOST, M.P., Knowledge-based diagnosis of electronic instrumentation, *Proceedings 2nd Conference on AI Applications*, IEEE Computer Society, 1985, pp. 42-48
- [114] STRANDBERG, C. e.a., A troubleshooting aid for non-impact page printing systems, *Proceedings 2nd Conference on AI Applications*, IEEE Computer Society, 1985, pp. 68-74
- [115] PAU, L.F., Survey of expert systems for fault detection, test generation and maintenance, *Expert Systems*, Vol. 3, April 1986, pp. 100-111

- [116] OSBORNE, R.L., Online, artificial intelligence-based turbine generator diagnostics, *AI Magazine*, Fall 1986, pp. 97-103
- [117] FOX, M.S. e.a., Techniques for sensor based diagnosis, *Proceedings 8th IJCAI 1979*, 1979
- [118] PATERSON, A. e.a., Causal reasoning in a real-time expert system, *Journal A*, Vol. 28, No. 3, 1987
- [119] FAWCETT, S., EDF plugs in power, *Expert Systems User*, March 1987
- [120] UNDERWOOD, W.E., A CSA model-based nuclear power consultant, *Proceedings AAAI-82*, 1982, pp. 302-305
- [121] NELSON, W.R., REACTOR, an expert system for diagnosis and treatment of nuclear reactor accidents, *Proceedings AAAI-82*, 1982, pp. 296-301
- [122] THOMPSON, T.H. e.a., A qualitative modeling shell for process diagnosis, *IEEE Software*, March 1986, pp. 6-15
- [123] SUSSMAN, G.J. e.a., Constraints - a language for expressing almost hierarchical descriptions, *Artificial Intelligence*, Vol. 14, 1980, pp. 1-39
- [124] DEKLEER, J., How circuits work, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, 1984, pp. 205-280
- [125] DAVIS, R., Diagnostic reasoning based on structure and behaviour, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, 1984, pp. 347-410
- [126] HERBERT, M.R. e.a., An initial evaluation of the detection and diagnosis of power plant faults using a deep knowledge representation of physical behaviour, *Expert Systems*, Vol. 4, No. 2, May 1987, pp. 90-99
- [127] FORBUS, K.D., Interpreting measurements of physical systems, *Proceedings AAAI-86*, 1986
- [128] FORBUS, K.D., Qualitative process theory, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, 1984, pp. 85-168
- [129] WILLIAMS, B.C., Qualitative analyses of Mos circuits, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, 1984, pp. 281-346
- [130] RAIMAN, O., Order of magnitude reasoning, *Proceedings AAAI-86*, 1986
- [131] CALOUD, PH., Towards continuous process supervision, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 1086-1089
- [132] HIGHAM, E.H., A different approach for self tuning in process controllers. The case for introducing in expert systems, *Measurement and Control*, No. 19, November 1986
- [133] HIGHAM, E.H., A self tuning controller based on expert systems and artificial intelligence, *Proceedings IEEE International Conference Control*, 1985, pp. 110-115
- [134] CARMON, A., Intelligent knowledge-based system for adaptive PID controller timing, *Journal A*, Vol. 27, No. 3, 1986, pp. 133-138



- [135] CHOWDHURY, J., Process controllers don 'expert' guides, *Chemical Engineering*, June 24, 1985, pp. 14-17
- [136] BAARS, W. e.a., Some experiences with expert systems for in-line control, *Journal A*, Vol. 28, No. 3, 1987, pp. 119-126
- [137] TJOKRO, S. e.a., Adaptive PID control, *Proceedings American Control Conference*, 1985
- [138] PEEL, D., Adaptive control and artificial intelligence, *Journal A*, Vol. 28, No. 3, 1987
- [139] ASTROM, K.J. e.a., Expert control, *Automatica*, Vol. 3, No. 22, 1986, pp. 277-286
- [140] HASPEL, D. e.a., The application of a real-time expert rule-based controller in the cement industry, *Journal A*, Vol. 28, No. 3, 1987, pp. 126-130
- [141] NAUTA LEMKE, H.R. VAN e.a., Fuzzy PID supervisor, *Proceedings 24th Conference on Decision and Control*, 1985, pp. 602-608
- [142] AMERONGEN, J. VAN e.a., An autopilot for ships designed with fuzzy sets, *Preprints Conference Digital Computer Applications to Process Control*, 1977
- [143] ZADEH, L.A., Making computers think like people, *IEEE Spectrum*, August 1984
- [144] MAMDANI, E.H., Application of fuzzy algorithms for the control of dynamic plants, *Proceedings IEEE 121*, 1974, pp. 12.1585-12.1588
- [145] KING, P.J. e.a., The application of fuzzy control systems to industrial processes, *Automatica*, Vol. 13, 1977, pp. 235-242
- [146] HOLMBLAD, L.P. e.a., Control of a cement kiln by fuzzy logic, in: Gupta, M. e.a. (eds.), *Fuzzy information and decision processes*, 1982, pp. 389-399
- [147] LATTIMER WRIGHT, M. e.a., An expert system for real-time control, *IEEE Software*, Vol. 3, No. 2, 1986, pp. 84-90
- [148] PARK, J., Toward the development of a real-time expert system, *Proceedings of the 1986 Rochester Forth Conference, The Journal of Forth Applications and Research*, Vol. 4, No. 2, 1986, pp. 133-154
- [149] MOORE, R.L., Adding real-time expert system capabilities to large distributed control systems, *Control Engineering*, Vol. 32, No. 4, 1985
- [150] TOGAI, M. e.a., Expert system on a chip: an engine for real-time approximate reasoning, *IEEE Expert*, Fall 1986
- [151] GINI, M., The future of robot programming, *Robotica*, Vol. 5, Part 3, 1987, pp. 235-246
- [152] BINFORD, T.O., The AL language for intelligent robots, in: *Languages et methodes de programmation de robots industriels*, IRIA Press, Parijs, 1979, pp. 73-88

- [153] LATOMBE, J.C. e.a., LM: a high level programming language for controlling assembly robots, *Proceedings 11th ISIR*, 1981, pp. 683-690
- [154] BLUME, C. e.a., Design of a structural robot language (SRL), *Proceedings Advanced Software in Robotics*, Luik, 1983
- [155] POPPLESTONE, R.J. e.a., A language for specifying robot manipulations, in: Pugh, A. (ed.), *Robotic Technology*, Pergamon, London, 1983, pp. 125-141
- [156] LOZANO PEREZ, T. e.a., LAMA: a language for automated mechanical assembly, *Proceedings IJCAI 1977*, pp. 710-716
- [157] KIRSCHBAUM, R.H. e.a., KARMA - a knowledge-based robot manipulation system, *Robotics*, Vol. 1, 1985, pp. 3-12
- [158] ALBUS, J.S., *Brains, behaviour and robotics*, McGraw Hill, 1981
- [159] ALBUS, J.S., *Robotics: past, present, and future*, Agard Lecture Series No. 142, 1985
- [160] REMBOLD, U. e.a., *Intelligenter Roboter, Teil 2: Autonome Mobile Roboter*, VDI-Z Bd. 127, Nr. 20, 1985, S. 811-817
- [161] BALLARD, D.H. e.a., *Computer vision*, Prentice Hall, 1982
- [162] NAGEL, R.N., Robots: not yet smart enough, *IEEE Spectrum*, May 1983
- [163] NAZIF, A.M. e.a., Low level image segmentation: an expert system, *IEEE Pami-6*, No. 5, pp. 555-577
- [164] BACKER, E., Knowledge-based image processing, in: Expert-systemen, speciale uitgave *Systemica*, jaargang 5, no. 4-6, 1985, blz. 77-88
- [165] REMBOLD, U. e.a., *Intelligenter Roboter, Teil 4: Modell-gesteuerte Bildanalyse, Einführung und Beispiele*, VDI-Z Bd. 127, Nr. 22, 1985, S. 909-918
- [166] BINFORD, T.O., Intelligent systems for vision and sensing, *16th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Tokio, 1984
- [167] NILSSON, N.J., *Principles of artificial intelligence*, Springer, 1982
- [168] SACERDOTI, E.D., Planning in a hierarchy of abstraction spaces, *Artificial Intelligence*, No. 5, 1974
- [169] SACERDOTI, E.D., *A structure for plans and behaviour*, Elsevier, 1977
- [170] FAHLMAN, S.E., A planning system for robot construction tasks, *Artificial Intelligence*, No. 5, 1974, pp. 1-49
- [171] FIKES, R.E. e.a., Strips: a new approach to the application of theorem proving to problem solving, *Artificial Intelligence*, Vol. 2, pp. 189-208
- [172] GEORGEFF, M., A theory of action for multi agent planning, *Proceedings AAAI-84*, 1984, pp. 121-125
- [173] MORGENSTERN, L., Knowledge preconditions for actions and plans, *Proceedings IJCAI 1987*, pp. 867-873



- [174] SCHOPPERS, M.J., Universal plans for reactive robots in unpredictable environments, *Proceedings IJCAI 1987*, pp. 1039-1047
- [175] GINI, M., Recovery from failures: a new challenge to industrial robots, *26th IEEE Computer Society International Conference COMPCON 83*, 1983, pp. 220-227
- [176] LOZANO-PEREZ, T. e.a., An algorithm for planning collision free paths among polyhedral obstacles, *Communications of ACM* 22, 1981, pp. 681-698
- [177] VEN, H.H. VAN DE e.a., *Wetenschappelijk onderzoek in de meet- en besturingstechnologie in Nederland*, SMBT-Jaarboek, 1986
- [178] *Onderzoekplan Spin/Flair-2 project 'Intelligente montagecel'*, Technische Universiteit Delft, 1987
- [179] HONDERD, G. e.a., Knowledge-based mobile robots, in: Expertsystemen, speciale uitgave *Systemica*, jaargang 5, no. 4-6, december 1985, blz. 89-114
- [180] WHITNEY, D., Historical perspective and state of the art in robot force control, in: *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, Spring 1987
- [181] HEUKELUM, J., *Ontwerp en realisatie van de met sensorinformatie gestuurde robothand*, Afstudeerverslag nr. 443, 1987, Technische Universiteit Delft, publikatie in voorbereiding
- [182] RAUCH-HINDIN, W.B., *Artificial intelligence in business, science and industry, Vol. II: Applications*, Prentice Hall, 1985, pp. 180-201
- [183] ELIAS, A.L., Knowledge engineering of the aircraft design process, in: Kowalik, J.S. (ed.), *Knowledge-based problem solving*, Prentice Hall, 1986, pp. 213-256
- [184] GERO, J.S. e.a., Logic programming as a means of representing semantics in design languages, *Environment and Planning B*, 1985, pp. 351-369
- [185] ROSENMAN, M.A. e.a., Design codes as expert systems, *Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 12, 1986, pp. 399-409
- [186] SIMON, H.A., *The sciences of the artificial*, MIT Press, 1982
- [187] BIRMINGHAM, W.P. e.a., DAS/LOGIC: a rule-based design assistant, *Proceedings 2nd Conference on Artificial Intelligence Applications*, IEEE Computer Society, December 11-13, 1985, pp. 264-268
- [188] GENIN, D., *Kennisintensieve expertsystemen voor VLSI-systeemontwerp*, Studiedag 'Van artificiële intelligentie naar expertsystemen', Belgisch Instituut voor Regeltechniek en Automatisering, 1984
- [189] MAN, H. DE e.a., CATHEDRAL II: a silicon compiler for digital signal processing, *IEEE Design and Test*, 1986

- [190] BROWN, D.C. e.a., An approach to expert systems for mechanical design, *Trends and Applications Conference, NTIS Report, AFOSR.TR.83-0657*, IEEE Computer Society, 1983
- [191] SACERDOTI, E.D., *A structure for plans and behaviour*, Elsevier, 1977
- [192] KIM, J. e.a., Computer aids for IC design, *IEEE Software*, March 1986, pp. 38-47
- [193] STEFIK, M.J., Planning and meta planning, Molgen: Part 2, *Artificial Intelligence*, Vol. 16, 1981, pp. 141-169
- [194] STEFIK, M.J., Planning with constraints, Molgen: Part 1, *Artificial Intelligence*, Vol. 16, 1981, pp. 111-139
- [195] KROONENBERG, H.H. VANDEN, *Methodisch ontwerpen*, collegedictaat Faculteit der Werktuigbouwkunde, Universiteit Twente, 1983
- [196] EEKELS, J. e.a., *Ontwerpmethodologie*, collegedictaat Faculteit van het Industrieel Ontwerpen, Technische Universiteit Delft, 1983
- [197] HAMEL, R., *Twee modellen van het architectonisch ontwerpen*, voordracht Psychonomiecongres, Noordwijkerhout, 1987
- [198] HAMEL, R., *Het ontwerpproces bij architecten: model en protocol-analyse*, Vakgroep Psychonomie, Universiteit van Amsterdam, rapportnr. psy.4.11.85.80, 1985
- [199] AKIN, O., *Psychology of architectural design*, Pion, London, 1986
- [200] CORNICK, T.C. e.a., Expertsystems for detail design in building, *CAAD Futures, International Conference on Computer Aided Architectural Design*, May 1987
- [201] TZONIS, A. e.a., Faculteit der Bouwkunde, Technische Universiteit Delft, *persoonlijke communicatie*, 1987
- [202] KOUTAMANIS, A., *Development of an automated handbook of architectural plans*, onderzoeksvoorstel Faculteit der Bouwkunde, Technische Universiteit Delft, 1986
- [203] STINY, G., Introduction to shape grammars, *Environment and Planning B*, Vol. 7, 1980, pp. 343-351
- [204] GERO, J.S. e.a., Knowledge and design decision processes, in: Sriram, D. e.a. (eds.), *Applications of artificial intelligence in engineering problems, Proceedings 1st International Conference*, Springer Verlag, 1986, pp. 343-368
- [205] SCHMITT, G., Expert systems and interactive fractal generators in design and evaluation, *CAAD Futures, International Conference on Computer Aided Architectural Design*, May 1987
- [206] RADFORD, A.D. e.a., Automated architectural detailing: a knowledge-based approach, advanced building technology, *Proceedings CIB 1986*, Vol. 2, 1986, pp. 737-745



- [207] SUDARBO, H., *An expert consultant for creative engineering design*, MSc. Thesis, Department of Civil Engineering CarnegieMellon University, 1987
- [208] CARBONELL, J.G., Learning by analogy: formulating and generalizing plans from past experience, in: Michalski, R.S. e.a. (eds.), *Machine learning: an artificial intelligence approach*, Tioga Press, 1983
- [209] DORROUGH, D.C., Analogy: a priori requirements for deep expert systems applications, in: Kowalik, J.S. (ed.), *Knowledge-based problem solving*, 1986, pp. 112-165
- [210] DEYER, M.G. e.a., EDISON: an engineering design system operating naively, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 1, No. 1, 1986, pp. 36-44
- [211] SRIRAM, D. e.a., The representation and use of constraints in structural design, in: Sriram, D., e.a. (eds.), *Applications of artificial intelligence in engineering problems, Proceedings 1st International Conference*, Springer Verlag, 1986, pp. 355-368
- [212] MAHER, M.L. e.a., HIGH-RISE, an expert system for the preliminary structural design of high rise buildings, *Knowledge Engineering in Computer Aided Design, IFIP Conference 1984*, Budapest, September 1984
- [213] MAHER, M.L. e.a., Graphics based preliminary structural design, *4th Conference on Computing in Civil Engineering*, ASCE, 1986, pp. 343-350
- [214] KOSTELJIK, A.P. e.a., *VERA - knowledge-based verification of electrical circuits*, Report Philips Research Laboratories, 1987
- [215] JOSHI, S.B. e.a., CAD interface for automated process planning, computer aided process planning, *19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 1987, pp. 39-45
- [216] WOO, T.C., Computer aided recognition of volumetric designs, in: McPherson, D., *Advances in CAM*, North Holland, 1977, pp. 121-136
- [217] STALEY, S.M., Using syntactic pattern recognition to extract feature information from a solid geometric database, *Computers in Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 2, 1983, pp. 61-63
- [218] WIERDA, L., *Artificial intelligence en de toekomst van computer aided design*, Technische Universiteit Delft, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen, 1987
- [219] STEFIK, M.J. e.a., Object oriented programming: themes and variations, *AI Magazine*, 1984, pp. 40-60
- [220] DONKER, J.C. e.a., NEXT an expert system development tool to support engineering design, *Proceedings CAPE 1987*, 1987
- [221] LAAN, D.J., Integration of a knowledge-based system and a relational database in a design environment, *Proceedings DECUS Europe Symposium*, Rome, 1987, pp. 359-365

- [222] METHA, U, Knowledge-based systems for computational aerodynamics and fluid dynamics, in: Kowalik, J.S. (ed.), *Knowledge-based problem solving*, 1986, pp. 183-212
- [223] JANSSEN, G.T.M., Toepassingsgerichte CAD-systemen voor kleine en middelgrote bedrijven, *De Constructeur*, nr. 7, 1987, blz. 24-28
- [224] VREDEVELDT, A.W., Toepassing van knowledge-based systems in het ontwerpproces, gezien door een scheepsonwerper, presentatie bij intern *TNO-symposium 'Kennissystemen binnen TNO'*, 1987
- [225] GERO, J.S. e.a., A future role of knowledge-based systems in the design process, *CAAD Futures, International Conference on Computer Aided Architectural Design*, May 1987
- [226] BROTHIE, J.F. e.a., Introducing intelligence and knowledge into CAD, in: Sriram, D. e.a. (eds.), *Applications of artificial intelligence in engineering problems, Proceedings 1st International Conference*, Springer Verlag, 1986, pp. 797-811
- [227] REHAK, D.R. e.a., Architecture of an integrated knowledge-based environment for structural engineering applications, *Knowledge Engineering in Computer Aided Design, IFIP Conference*, Budapest, September 1984
- [228] LANGE, R., The use of knowledge engineering teams as a method for the development of expert systems, in: Sriram, D. e.a. (eds.), *Applications of artificial intelligence in engineering problems, Proceedings 1st International Conference*, Springer Verlag, 1986
- [229] WELBANK, M., *A review of knowledge acquisition techniques*, Freeman, 1983
- [230] Werk groep Expertsystemen, *Kennis verwerven voor expertsystemen: een overzicht van enkele methoden*, Werkgroep Expertsystemen Asi, 1987
- [231] WIELINGA, B. e.a., The KADS system: functional description, *ESPRIT Project 1098, Deliverable T1.1*, Universiteit van Amsterdam, 1986
- [232] ANJEWIERDEN, A. e.a., KADS power tools user guide, *ESPRIT Project 1098*, Universiteit van Amsterdam, 1987
- [233] BENNETT, J., ROGET: A knowledge-based system for acquiring the conceptual structure of a diagnostic expert system, *Journal of Automated Reasoning*, 1985
- [234] FREILING, M. e.a., Starting a knowledge engineering project: a step-by-step approach, *AI Magazine*, Vol. 3, 1985
- [235] MOTTA, E. e.a., *KEATS: The knowledge engineer's assistant*, Open University, 1986
- [236] ABRETT, G. e.a., The KREME knowledge editing environment, *International Journal of Man-Machine Studies*, Autumn 1987



- [237] Artikelen van Boose e.a., Diederich e.a., Eshelman e.a. en Musen, in Boose, J.H. e.a. (eds.), *Knowledge acquisition for knowledge-based systems workshop*, Academic Press, 1987
- [238] *SPIN programme Knowledge-based systems*, Stimulerings Projectteam Informatica-Onderzoek Nederland, 1988
- [239] *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 221-365
- [240] QUINLAN, J.R., Generating production rules from decision trees, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 304-307
- [241] KIDD, A.L. (ed.), *Knowledge acquisition for expert systems*, Plenum Press, 1987
- [242] HOFFMAN, R.R., The problem of extracting the knowledge of experts from the perspective of experimental psychology, *AI Magazine*, Summer 1987
- [243] BREUKER, J. e.a., Use of models in the interpretation of verbal data, in: Kidd, A.L. (ed.), *Knowledge acquisition for expert systems*, Plenum Press, 1987
- [244] HART, A., *Knowledge acquisition for expert systems*, Kogan Page, 1987
- [245] NEWELL, A., The knowledge level, *Artificial Intelligence*, 18, 1982
- [246] BOOSE, J.H. e.a. (eds.), *Knowledge acquisition for knowledge-based systems workshop*, Academic Press, 1987
- [247] GOOD, D.I., *Mechanical proofs about computer programs*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 312 (1522), 1984
- [248] YANG, T. e.a., Performance evaluation of the inference structure in expert systems, *Proceedings IJCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987
- [249] MCDERMID, *Life cycle support in the ADA environment*, Cambridge University Press, 1984
- [250] HEWETT, J. e.a., *Commercial expert systems in Europe*, Ovum, December 1986
- [251] HEER, A. DE, Evaluatie van het kwaliteitssysteem in een industriële onderneming, *Bedrijfskunde*, 3, 1985, blz. 236-243
- [252] CKS-TNO, *Kennissystemen binnen TNO*, syllabus van gelijknamig symposium, 8 oktober 1987
- [253] WEIZENBAUM, J., *Computer power and human reason*, Freeman, 1976
- [254] ROSZAK, TH., *De informatiecultus, computerfolklore en de kunst van het denken*, Meulenhoff, 1986
- [255] DREYFUS, H., *Man over machine*, Free Press, 1986
- [256] Too much, too soon: information overload, *IEEE Spectrum*, June 1987, pp. 51-56

- [257] WOODS, D.D., Cognitive technologies: the design of joint human-machine cognitive systems, *AI Magazine*, Vol. 6, 1986
- [258] TOFFLER, A., *The third wave*, William Collins Sons & Co, 1980
- [259] HUPPES, T.J., *Arbeid & management in de informatiemaatschappij*, Stenfert Kroese, 1985
- [260] Sociotechnology, verslag van een ronde tafeldiscussie over sociale gevolgen van 'next-generation computing', in: Torrero, E.A., *Next-generation computers*, IEEE Press, 1985
- [261] BODEN, M., Artificial intelligence: cannibal or missionary, *AI & Society*, Vol. 1, July 1987
- [262] BUGL, J. e.a., *Enquete-Kommission Einschätzung und Bewertung von Technikfolgen; Gestaltung von Rahmenbedingungen der technischen Entwicklung: Chancen und Risiken von Expertensystemen in Produktion, Verwaltung, Handwerk und Medizin*, Materialien zu Drucksache 10/6801, Band III, Bonn, Mrz 1987, S. 14
- [263] GUTERL, F., An unanswered question: automation's effect on society, *IEEE Spectrum*, May 1983
- [264] TURKLE, SH., *The second self*, Simon & Schuster, 1984
- [265] TRAPPL, R., *Impacts of artificial intelligence*, North-Holland, 1986
- [266] BODEN, M., *Artificial intelligence and natural man*, Harvester Press, 1977
- [267] Expertsystemen: een ethisch gezichtspunt, *Medes nieuwsbrief*, Onderzoeksgroep Medische Informatie en Besliskunde, Academisch Ziekenhuis Groningen, mei 1986
- [268] KWEE, A.Y.L. e.a., *Expertsystemen 1987*, Jaarboek van de Werkgroep Expertsystemen Asi, Stam, 1987
- [269] KWEE, A.Y.L., Kennissystemen in Nederland, *Informatie en Informatiebeleid*, vijfde jaargang, 1987, nr. 2
- [270] RAUCH-HINDIN, W., *Artificial intelligence in business, science and industry, Volume II Applications*, Prentice-Hall, 1985, pp. 236-305
- [271] *AI: Techniques, tools & applications*, IDC Report 2742, August 1985
- [272] *Kennissystemen*, tijdschrift over kennistechniek, AI en expertsystemen, Stam, Postbus 235, 2280 AE Rijswijk
- [273] *BIKIT, Evaluation workshop: PROLOG and expert system shells*, 30 september 1986
- [274] WINSTON, P. e.a., *LISP*, Addison-Wesley, 1981
- [275] KWEE, A.Y.L., Kennissystemen in Japan, *Kennissystemen*, eerste jaargang nr. 6, december 1987
- [276] FITZGERALD, K. e.a., Next-generation race bogs down, *IEEE Spectrum*, June 1987



- [277] KWEE, A.Y.L., Verslag UCAI 1987, *Kennissystemen*, eerste jaargang nr. 5, september 1987
- [278] KOWALSKI, R.A., *LOGIC for problem solving*, North-Holland, 1979
- [279] CLOCKSIN, e.a., *Programming in PROLOG*, New York Springer, 1984
- [280] GOLDBERG, A. e.a., *SMALLTALK 80: the language and its implementation*, Addison-Wesley, 1983
- [281] BROWNSTORE, L., *Programming expert systems in OPS5*, Addison-Wesley, 1985
- [282] PAS, P. VAN DE, OPS5, *Kennissystemen*, eerste jaargang, nr. 4, augustus 1987
- [283] HARDY, S. e.a., *POPLOG*, University of Sussex, 1982
- [284] KUNZ, J.C. e.a., Applications development using a hybrid AI development system, *AI magazine*, Autumn 1984
- [285] RICHTER, M.H., Evaluation of expert systems development tools, *Expert Systems*, July 1986
- [286] PEPPER, J. e.a., Repair strategies in a diagnostic expert system, *Proceedings UCAI 1987*, Morgan Kaufmann, 1987, pp. 531-534
- [287] HIRSCH, A., Tagged architecture supports symbolic processing, *Computer Design*, 1984
- [288] GREENBLATT, R., *The LISP machine*, MIT Press, 1973
- [289] Workstations: the third wave of computing technology, *The Seybold Report on Professional Computing*, Vol. 4, No. 5
- [290] TRACY, E.J., Putting artificial intelligence on a chip, *Fortune*, No. 3, February 1986
- [291] HINTON, G., *Parallel models of associative memory*, L. Erlbaum, 1981
- [292] HILLEN, D., *The connection machine*, MIT Press, 1985
- [293] WAARD, H. DE, In de kraamkamer van de parallelle computer, *Kennissystemen*, eerste jaargang nr. 6, december 1987
- [294] WILEY, P., A parallel architecture comes of age at last, *IEEE Spectrum*, June 1987
- [295] JORGENSEN, C. e.a., Catching knowledge in neural nets, *AI Expert*, December 1986
- [296] NOEST, A.J., Rekenen met neuronale netwerken, *Intermediair*, 8 mei 1987, blz. 5-9
- [297] STEITZ, C.L., The cosmic cube, *Communications of ACM*, January 1985
- [298] MCCLELLAND, J.L. e.a. (eds.), *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, MIT Press, 1986
- [299] MÄNTYLÄ, M. e.a., *A prototype system for generative process planning of prismatic parts*, Helsinki University, Laboratory of Information Processing Science

- [300] Laboratorium voor informatietheorie, Faculteit der Elektrotechniek, Technische Universiteit Delft



## STT-publikaties

1. Toekomstbeeld der Techniek;  
ir. J. Smit, 1968
2. Techniek en Toekomstbeeld, Telecommunicatie in telescopisch beeld;  
prof.dr.ir. R.M.M. Oberman, 1968
3. Verkeersmiddelen;  
prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1968
4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?;  
ir. P.H. Bosboom, 1969
5. De overgangsprocedures in het verkeer;  
prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1969
6. De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland;  
dr. P.J. van Duin, 1971
7. Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future;  
ir. J.H. Bakker e.a., 1971
8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze;  
ir. L. Schepers e.a., 1971
9. Het voeden van Nederland nu en in de toekomst;  
prof.dr.ir. M.J.L. Dols e.a., 1971
10. Barge Carriers: some technical, economic and legal aspects;  
drs. W. Cordia e.a., 1972
11. Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland;  
prof.dr. J.J. Went e.a., 1972
12. Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening: mogelijkheden en consequenties;  
dr.ir. H. Hoog e.a., 1972
13. Communicatiestad 1985: elektronische communicatie met huis en bedrijf;  
prof.dr.ir. J.L. Bordewijk e.a., 1973
14. Techniek en preventief gezondheidsonderzoek;  
dr. M.J. Hartgerink e.a., 1973
15. Technologisch verkennen: methoden en mogelijkheden;  
ir. A. van der Lee e.a., 1973
16. Mens en milieu: beheerste groei;  
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973

17. Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht;  
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
18. Mens en milieu: kringlopen van materie;  
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
19. Energy Conservation: ways and means;  
edited by J.A. Over and A.C. Sjoerdsma, 1974
20. Voedsel voor allen, plaats en rol van de EEG;  
prof.dr. J. Tinbergen e.a., 1976
21. Stedelijk verkeer en vervoer langs nieuwe banen?;  
Redactie: ir. J. Overeem, 1976
22. Materialen voor onze samenleving;  
Redactie: ir. J.A. Over, 1976
23. De industrie in Nederland: verkenning van knelpunten en mogelijkheden;  
Redactie: ir. H.K. Boswijk en ir. R.G.F. de Groot, 1978
24. Toekomstbeeld der industrie;  
prof.dr. P. de Wolff e.a., 1978
25. Arts en gegevensverwerking;  
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1979
26. Bos en hout voor onze toekomst;  
Redactie: ir. T.K. de Haas, ir. J.H.F. van Apeldoorn en ir. A.C. Sjoerdsma, 1979
27. Steenkool voor onze toekomst;  
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1980
28. Distributie van consumentengoederen; informatie en communicatie in perspectief;  
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1980 (ISBN 90 6275 052 4)
29. Wonen en techniek; ervaringen van gisteren, ideeën voor morgen;  
Redactie: ir. J. Overeem en dr. G.H. Jansen, 1981  
(ISBN 90 6275 053 2)
30. Biotechnology; a Dutch Perspective;  
edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1981 (ISBN 90 6275 051 6)
31. Micro-elektronica in beroep en bedrijf; balans en verwachting;  
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981 (ISBN 90 6275 064 8)  
Deelstudies:
  - 31.1 Micro-elektronica: de rundveehouderij  
(ISBN 90 6275 066 4)
  - 31.2 Micro-elektronica: de grafische industrie en uitgeverijen  
(ISBN 90 6275 067 2)
  - 31.3 Micro-elektronica, procesinnovatie in de sector elektrometaal (ISBN 90 6275 068 0)
  - 31.4 Micro-elektronica: productinnovatie van consumentenproducten en diensten voor gebruik in huis  
(ISBN 90 6275 069 9)



- 31.5 Micro-elektronica: het ontwerpproces (ISBN 90 6275 070 2)
- 31.6 Micro-elektronica: het bankwezen (ISBN 90 6275 071 0)
- 31.7 Micro-elektronica: het kantoor (ISBN 90 6275 072 9)
- 31.8 Micro-elektronica: het reiswezen (ISBN 90 6275 073 7)
- 31.9 Micro-elektronica: de belastingdienst (ISBN 90 6275 074 5)
32. Micro-elektronica voor onze toekomst; een kritische beschouwing;  
Samenstellers: burggraaf E. Davignon e.a., 1982  
(ISBN 90 6275 089 3)
33. Toekomstige verwarming van woningen en gebouwen;  
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1982 (ISBN 90 6275 094 X)
34. Flexibele automatisering in Nederland; ervaringen en opinies;  
Redactie: ir. G. Laurentius, ir. H. Timmerman en ir. A.A.M. Vermeulen, 1982 (ISBN 90 6275 098 2)
35. Automatisering in de fabriek; vertrekpunten voor beleid;  
Redactie: ir. H. Timmerman, 1983 (ISBN 90 6275 112 1)
36. Informatietechniek in het kantoor; ervaringen in zeven organisaties;  
Samensteller: drs. F.J.G. Fransen, 1983 (ISBN 90 6275 135 0)
37. Nederland en de rijkdommen van de zee: industrieel perspectief en het nieuwe zeerecht;  
Redactie: ir. J.F.P. Schönfeld en mr.drs. Ph.J. de Koning Gans, 1983 (ISBN 90 6275 111 3)
38. Man and Information Technology: towards friendlier systems;  
edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1983 (ISBN 90 6275 136 9)
39. De kwetsbaarheid van de stad; verstoringen in water, gas, elektriciteit en telefonie;  
Redactie: ir. G. Laurentius, 1984 (ISBN 90 6275 145 8)
40. Bedrijf, kennis en innovatie;  
Redactie: ir. H. Timmerman, 1985 (ISBN 90 10 052745)
41. De toekomst van onze voedingsmiddelenindustrie;  
Redactie: drs. J.C.M. Schogt en prof.dr.ir. W.J. Beek, 1985 (ISBN 90 10 055744)
42. Techniek voor ouderen;  
Redactie: ir. M.H. Blom-Fuhri Snethlage, 1986  
(ISBN 90 10 06033 0)
43. Nieuwe toepassingen van materialen;  
Redactie: ir. A.J. van Griethuysen, 1986 (ISBN 90 14 03738 4)
44. Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst;  
Redactie: ir. G. Laurentius, 1987 (ISBN 90 14 03716 3)
45. Kennissystemen in het onderwijs;  
Redactie: ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1987 (ISBN 90 14 03717 1)
46. Kennissystemen en medische besluitvorming;  
Redactie: ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1987 (ISBN 90 14 03718 X)

47. Kennissystemen in de dienstensector;  
Redactie: drs. A.Y.L. Kwee en ir. J.J.S.C. de Witte, 1987 (ISBN  
90 14 03719 8)

De publikaties 1 t/m 27, 31-7, 31-9 en 34 zijn te bestellen bij  
STT

Postbus 30424

2500 GK 's-GRAVENHAGE

De overige publikaties zijn verkrijgbaar via de boekhandel.



# KENNISSYSTEMEN IN DE INDUSTRIE

Jaarlijks worden in Nederland miljoenen guldens geïnvesteerd in de ontwikkeling van kennis- en expertsystemen. Dit boek behandelt de praktische toepassingen daarvan in de Nederlandse industrie. Na een overzicht van de stand van de techniek worden toepassingen behandeld bij het ontwerpen, de productiebesturing, CIM, storingsdiagnose en robotica. Aan de hand van praktijkvoorbeelden komen aspecten aan bod die van belang zijn voor ontwikkeling, invoering, gebruik en onderhoud van kennissystemen. Diverse bedrijven, waaronder Shell, Hoogovens, Akzo, Unilever, DSM, Océ-van der Grinten en TNO presenteren beleid, aanpak en ervaringen.

Deze publikatie biedt besluitvormers informatie voor een effectief beleid. Er wordt ingegaan op investeringen, terugverdientijd, het leereffect en de inbreng van adviseurs. Ook is een apart hoofdstuk gewijd aan sociaal-organisatorische aspecten van de invoering van kennissystemen. Toekomstige bouwers van kennissystemen vinden in dit boek een uiteenzetting van structuur en werking en een handleiding voor ontwikkeling en onderhoud van kennissystemen.



**stichting toekomstbeeld der techniek**

NUGI 859

ISBN 90 14 03758 9