

Haalbaarheidsstudie

Een sociaal-wetenschappelijke ontwerpmethodologie



Deelstudie 3

Ontwerpen van Ontwerpen
De Ontwikkeling en het Gebruik van Ontwerphulpmiddelen
in de Werktuigbouwkunde, Elektrotechniek en Informatica

Ibo van de Poel
m.m.v. Hessel Jan Knapen

INHOUDSOPGAVE

| | |
|---|----|
| 1 INLEIDING EN VRAAGSTELLING | 1 |
| 2 HET ONTWERPPROCES IN DE WERKTUIGBOUWKUNDE, ELEKTROTECHNIEK EN INFORMATICA | 3 |
| 3 CONVENTIONELE ONTWERPHULPMIDDELEN IN DE ONTWERPPRAKTIJK | 8 |
| 4 DE ONTWIKKELING VAN CAD-ONTWERPOMGEVINGEN..... | 15 |
| 5 ONTWERPOMGEVINGEN IN RELATIE MET ONTWERPPRAKTIJKEN EN VISIES OP ONTWERPEN | 23 |
| Literatuur | 30 |
| Bijlage: interviewvragen | 34 |
| Bijlage: geïnterviewde personen..... | 36 |

1 INLEIDING EN VRAAGSTELLING

De wereld waarin we leven is vol met door de mens ontworpen en geproduceerde produkten. Wegen, auto's, fietsen, gebouwen, wetten, instituties, onderwijsprogramma's, koelkasten en bruggen zijn slechts enkele voorbeelden. Veel van deze produkten zijn eerst uitgedacht voordat ze geproduceerd zijn. Een moderne brug wordt niet zo maar gebouwd maar wordt eerst ontworpen. Van te voren wordt uitgedacht hoe de brug eruit zou moeten zien. Daarbij wordt gebruik gemaakt van kennis van staalconstructies en mechanica, gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek en ervaring met het bouwen van bruggen. Bij het ontwerpen van een brug worden diverse hulpmiddelen gebruikt, zoals tekenmaterialen en tekenafels om het ontwerp te tekenen en rekenprogramma's om het ontwerp door te rekenen.

Niet alleen bij het ontwerpen van bruggen maar bij bijna alle vormen van ontwerpen wordt gebruik gemaakt van ontwerphulpmiddelen. In dit rapport zal ik de rol en de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen in de technische disciplines werktuigbouwkunde, elektrotechniek en informatica behandelen. In deze disciplines bestaat een verzameling aan ontwerphulpmiddelen, die door bijna alle ontwerpers in de betreffende domeinen gebruikt wordt.

Er wordt in de technische disciplines expliciet aandacht besteed aan de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen. Hierbij wordt vaak de term ontwerpomgeving gebruikt om het geheel van ontwerphulpmiddelen, dat bij ontwerpen gebruikt wordt aan te duiden. Daarbij gaat het niet alleen om de ontwerphulpmiddelen op zich, maar ook om de wijze waarop ze op elkaar afgestemd zijn en elkaar aanvullen. De term ontwerpomgeving wordt in de technische disciplines meestal gebruikt in de specifieke betekenis van een gecomputeriseerde ontwerpomgeving van zogenaamde Computer Aided Design (CAD)-hulpmiddelen. Ik zal de term echter verbreden tot alle gebruikte ontwerphulpmiddelen in een ontwerpsituatie. Hoewel het denkbaar en in bepaalde opzichten vruchtbaar is de term ontwerpomgeving ook te gebruiken voor de specifieke (bedrijfs)context of de bredere sociale, culturele, politieke of economische omgeving waarin het ontwerpproces plaats vindt, zal ik dat in dit rapport niet doen, omdat we hier vooral geïnteresseerd zijn in de rol van ontwerphulpmiddelen in het ontwerpproces. Deze rol is goeddeels te begrijpen onafhankelijk van de bedrijfscontext of de maatschappelijke context. Hoewel de term ontwerpomgeving relatief nieuw is, is de aandacht voor de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen al veel ouder. Afspraken over tekenwijzes, representatietechnieken en technische modellen bijvoorbeeld werden in een groot aantal disciplines al in de vorige eeuw ontwikkeld.¹

Dit rapport is geschreven in het kader van de haalbaarheidsstudie "Een sociaal-wetenschappelijke ontwerpmethodologie". In sociaal-wetenschappelijk ontwerpen wordt - net zoals in de techniek - gebruik gemaakt van ontwerphulpmiddelen. Deze zijn in het algemeen echter nog niet zo ver ontwikkeld als voor technisch ontwerpen. Inzicht in de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen in de techniek zou relevant kunnen zijn voor sociaal-wetenschappelijk ontwerpen. Daarbij moet natuurlijk wel rekening gehouden te worden met de verschillen tussen sociaal-wetenschappelijk en technisch ontwerpen. Nagegaan zou kunnen worden in hoeverre de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen in de techniek als inspiratie zou kunnen dienen voor ontwikkeling in de sociale wetenschappen.

Er is nog een tweede wijze waarop dit rapport inzichten zou kunnen genereren voor sociaal-wetenschappelijk ontwerpen. Aangezien de ontwikkeling van ontwerpomgevingen in een aantal disciplines tamelijk bewust gebeurt kan daar gesproken worden van het ontwerpen van ontwerpomgevingen. De omgeving waarin de ontwerper moet werken, wordt daarbij als het ware ontworpen. Deze omgeving heeft ook sociale aspecten. Een brug wordt niet door één persoon ontworpen, maar door een team van ontwerpers, dat onderling overeenstemming moet bereiken over

¹ Disco et al. (1992).

het ontwerp. Aangezien in veel gevallen ontwerpers met verschillende disciplinaire achtergronden en vaardigheden bij een ontwerp betrokken zijn, is een zekere taakverdeling en afstemming noodzakelijk. Deze sociale processen van overleg, afstemming, taakverdeling en onderhandeling worden door het gebruik van ontwerphulpmiddelen beïnvloed. In die zin zou het ontwerp van ontwerpomgevingen als een vorm van sociaal-wetenschappelijk ontwerpen opgevat kunnen worden.

De eerste vraag die in dit rapport beantwoord zal worden, is die naar de rol van diverse ontwerphulpmiddelen bij ontwerpen. Hoe ondersteunen ontwerphulpmiddelen de ontwerppraktijk? Deze vraag wordt beantwoord in hoofdstuk 2 en 3. In hoofdstuk 2 wordt een globale beschrijving gegeven van ontwerpen in de werktuigbouwkunde, de elektrotechniek, de informatica en de mechatronica, een combinatie van werktuigbouwkundig, elektrotechnisch en computationeel ontwerpen. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de rol van een aantal ontwerphulpmiddelen beschreven. Daarbij beperk ik me, in hoofdstuk 3 althans, tot de zogenaamde "conventionele" ontwerphulpmiddelen, dat wil zeggen ontwerphulpmiddelen die niet door de computer ondersteund worden.

In hoofdstuk 4 zal nader ingaan worden op de ontwikkeling van computer-hulpmiddelen, CAD, in de werktuigbouwkunde, elektrotechniek en de informatica. Daarna zal in hoofdstuk 5 aan de orde komen hoe deze ontwikkeling zich verhoudt tot ontwikkelingen in de ontwerppraktijk en visies op hoe ontwerpen zou moeten verlopen. Tenslotte zal ik kort aangeven wat de relevantie van dit alles voor ontwerpen in de sociale wetenschappen kan zijn.

De te beantwoorden vragen zijn dus:

- 1) Wat is de rol van "conventionele" ontwerphulpmiddelen in ontwerppraktijken in de werktuigbouwkunde, elektrotechniek en informatica?
- 2) In hoeverre is de ontwikkeling van CAD-ontwerphulpmiddelen gebaseerd op een bepaalde reconstructie of formalisering van de huidige technische ontwerppraktijk, c.q. bepaalde ideeën over hoe deze ontwerppraktijk eruit ziet?
- 3) In hoeverre spelen normatieve ideeën over hoe het ontwerpproces in de techniek zou moeten verlopen een rol bij de ontwikkeling van CAD-ontwerphulpmiddelen?
- 4) Wat zou de relevantie hiervan kunnen zijn voor ontwerpen in de sociale wetenschappen?

Bronnen

Voor dit rapport gebruikt gemaakt van diverse literatuur, zoals die vermeldt staat in de literatuurlijst, en van onderzoek zoals dit met name door Disco, Rip en van de Poel gedaan wordt in de vakgroep Filosofie van Wetenschap en Techniek (WMW).

Verder zijn voor dit rapport zes interviews gehouden met onderzoekers van de faculteiten Werktuigbouwkunde, Elektrotechniek en Informatica aan de UT (iedere faculteit 2 interviews) over de ontwikkeling van ontwerpomgevingen in hun vakgebied. De vragenlijst voor deze interviews is in een bijlage opgenomen. Daarnaast is gebruik gemaakt van een aantal gesprekken die door Arie Rip, Frans van Vught en mijzelf met hoogleraren uit de technische faculteiten zijn gehouden, ook in het kader van de haalbaarheidsstudie "sociaal-wetenschappelijke ontwerpmethodologie". De verwerking van deze gesprekken is te vinden in het rapport "Ontwerpen in de Technische Wetenschappen; Studies, Ervaringen, Methodologie".

Doordat niet met gebruikers van ontwerphulpmiddelen is gesproken is in de verslaglegging over de ontwikkeling en het gebruik van CAD (hoofdstuk 4) mogelijk een enigszins vertekend beeld ontstaan.

2 HET ONTWERPPROCES IN DE WERKTUIGBOUWKUNDE, ELEKTROTECHNIEK EN INFORMATICA

In dit hoofdstuk bespreek ik een aantal algemene kenmerken van het ontwerpproces in de werktuigbouwkunde, de elektrotechniek en de informatica. Ook wordt in dit hoofdstuk kort ingegaan op het zogenaamde mechatronische ontwerpen omdat daar werktuigbouwkunde, elektrotechniek en informatica samen komen. In het mechatronisch ontwerpen worden tevens een aantal interessante algemene aspecten van technisch ontwerpen extra duidelijk. Aangezien ik in mijn onderzoek geen specifieke aandacht heb besteed aan de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen in de mechatronica en er, zover ik weet, ook nauwelijks ontwerphulpmiddelen *specifiek* voor de mechatronica zijn, zal er in de volgende hoofdstukken niet meer apart aandacht besteed worden aan de mechatronica.

Ontwerpen in de werktuigbouwkunde

Werktuigbouwkunde wordt wel eens omschreven als het "ontwerpen van tuig dat werkt". Werktuigbouwkundigen ontwerpen schepen, vliegtuigen, hijskranen, bruggen, gereedschapsmachines, koelkasten en fietsen, kortom mechanische inrichtingen. Naast algemene kennis die relevant is voor het ontwerpen van mechanische inrichtingen, zoals materiaalkunde, stijfheid en sterke, dynamica, kinematica en stromingsleer, zijn in de loop der tijd, in de werktuigbouwkunde kennis en modellen voor het ontwerp van specifieke producten ontwikkeld. Er zijn dan ook een aantal subdisciplines, zoals vliegtuigbouwkunde en scheepsbouwkunde, in de werktuigbouwkunde ontstaan, die zich op specifieke producten concentreren.

In de werktuigbouwkunde bestaat een traditie van onderzoek naar ontwerpprocessen. Daarbij wordt meestal onderscheid gemaakt tussen de zogenaamde Duitse School en de Amerikaanse School. De Duitse School besteedt vooral aandacht aan de ontwikkeling van ontwerpmethodologie en systematische ontwerpaanpakken. De methode van Van den Kroonenberg, zoals ontwikkeld aan de Universiteit Twente is een voorbeeld van een systematische ontwerpaanpak. Deze methode verdeelt het ontwerpproces in drie fases. In de eerste fase, de probleemdefiniering, wordt de gewenste functie van een produkt vastgelegd. In de tweede fase, de werkwijzebepaling, wordt bij deze functie een werkwijze en structuur gezocht en in de derde fase, de vormgeving, wordt deze structuur geconcretiseerd in de uiteindelijke ontwerptekening. De methode van Van den Kroonenberg is een voorbeeld van een *prescriptieve* methode: een methode die voorschrijft hoe het ontwerpproces zou moeten verlopen. Belangrijk onderdeel van de methode is het genereren van een grote variëteit aan mogelijke ontwerpen in de werkwijzebepalende fase, waaruit vervolgens een beredeneerde keus gemaakt dient te worden.

De Amerikaanse school is meer *descriptief* geïnteresseerd. Zij is vooral geïnteresseerd in het beschrijven van het ontwerpproces in de praktijk. Dat heeft geleid tot kritiek op prescriptieve modellen.² Een eerste punt van kritiek is dat het in ontwerpen meestal gaat om her-ontwerpen. Ontwerpers gaan uit van eerdere ontwerpen of ontwerp-ideeën. Daardoor kunnen de eerdere ontwerpfases, waarop veel nadruk ligt in prescriptieve modellen, vaak overgeslagen worden. Ook het creëren van variaties blijkt in de praktijk niet veel voor te komen. Verder blijkt dat ontwerpers tijdens het ontwerpen veelvuldig wisselen van abstractieniveau. De ontwerper werkt aan verschillende delen van het ontwerp op verschillende niveaus tegelijk. Bekende dingen worden meteen op detail-niveau uitgewerkt, terwijl onbekende dingen op een hoger abstractieniveau worden bekeken.

² Voor de hier genoemde punten van kritiek, zie bijvoorbeeld Stauffer et al (1987). Soortgelijke punten van kritiek worden echter door een groot aantal auteurs genoemd. Zie bijvoorbeeld Ullman et al. (1987), Konda et al. (1992) en Finger & Dixon (1989a). Voor een nadere beschouwing zie Van de Poel, Rip en Van Vught (1993).

Prescriptieve modellen laten zulk soort abstractie-sprongen meestal niet toe.

In de praktijk is veel werktuigbouwkundig ontwerpen een vorm van her-ontwerpen, waarbij uitgegaan wordt van eerdere ontwerpen. Voor de industrie is dit over het algemeen ook aantrekkelijk omdat dan uitgegaan kan worden van bestaande productieprocessen. Origineel ontwerp is echter ook van tijd tot tijd belangrijk. Bijvoorbeeld als een bedrijf met een nieuw innovatief produkt wil komen.

Voor origineel ontwerpen is vooral het conceptueel uitdenken van een nieuw idee belangrijk. Bij het zogenaamde conceptueel ontwerpen gaat het om het "vertalen" van de functie van het beoogde ontwerp in een werkwijze of structuur. Die vertaling kan meestal niet op een éénduidige manier geschieden, zeker niet in de werktuigbouwkunde.³ In de werktuigbouwkunde is de relatie tussen de vorm en de functie van een werktuigonderdeel namelijk meestal niet éénduidig. Werktuigonderdelen vervullen verschillende functies; een fietsstuur vervult niet alleen de functie sturen, maar biedt de fietser ook houvast. Eén functie wordt door een combinatie van werktuigonderdelen - in hun onderlinge samenhang - vervuld; een bestuurbare fiets vergt niet alleen een stuur maar ook een zeker "dynamisch evenwicht".

De werktuigbouwkunde verschilt hier van de informatica en de elektrotechniek. Een module in een software-programma vervult op min of meer éénduidige wijze één bepaalde functie. Bovendien zijn de basis-elementen van een software-programma met de programmeertaal gegeven. In de elektrotechniek wordt vaak gebruik gemaakt van standaardschakelingen met één bepaalde functie. In de informatica en de elektrotechniek gaat het bij het ontwerpen zodoende vaak om het selecteren van basiselementen en het plaatsen van deze basiselementen in een configuratie, terwijl het "eigenlijke" conceptuele ontwerpen, het uitdenken van - nieuwe - concepten om bepaalde functies te vervullen, minder belangrijk is.⁴

Ontwerpen in de elektrotechniek

In de elektrotechniek worden voornamelijk elektronische schakelingen, zoals IC's (integrated circuits), ontworpen. Deze kunnen samengesteld worden tot zeer ingewikkelde systemen. Desalniettemin is de diversiteit aan ontworpen producten in de elektrotechniek kleiner dan in de werktuigbouwkunde. Bij het ontwerp van elektronische systemen wordt vaak uitgegaan van een vaste opdeling in systeemniveaus. Zo'n opdeling in systeemniveaus is voor elektronische systemen over het algemeen eenduidiger en makkelijker dan voor werktuigbouwkundige systemen.⁵ Een verschil tussen werktuigbouwkundige en elektronische producten is dat werktuigbouwkundige producten vrijwel altijd een drie-dimensionale structuur hebben, terwijl geïntegreerde schakeling bestaan uit verschillende lagen met een tweedimensionale structuur.⁶

In de elektrotechniek zijn in de loop der tijd verschillende methodes en technieken voor het ontwerp van geïntegreerde schakelingen ontwikkeld. Grofweg kunnen drie methoden onderscheiden worden:⁷

- gate-array ontwerp
- standaard cel ontwerp ("semi-custom")
- volledig klant gericht ontwerp ("full-custom")

Bij gate-array ontwerp wordt gebruik gemaakt van het feit dat een geïntegreerde schakeling in feite bestaat uit transistoren en verbindingen tussen transistoren. Er wordt uitgegaan van een vaste

³ Ullman (1992, 20).

⁴ Ullman (1992, 32-33), zie ook Vlietstra (1988).

⁵ Ullman (1992, 32-33).

⁶ Ullman (1992, 32-33).

⁷ Vlietstra (1988) en de Boer et al. (1988).

ligging en grootte van de transistoren. Alleen de verbindingen worden, afhankelijk van het gewenste ontwerp, gevarieerd. Dit bespaart ontwerptijd en betekent dat de fabricage voor 80% onafhankelijk van het ontwerp uitgevoerd kan worden.

Bij standaard-cel ontwerp wordt uitgegaan van standaardcellen, die de ontwerper kiest uit een bibliotheek met een groot aantal standaardcellen. Deze standaardcellen hebben meestal één bepaalde functie. Voor het ontwerp worden nu diverse standaardcellen geselecteerd, die op de gewenste wijze verbonden worden. Het voordeel van deze methode is dat zij tijdbesparend is en dat er gebruik gemaakt wordt van standaardcomponenten. Meer dan bij gate-array ontwerp kan er echter ook rekening worden gehouden met de specifieke eisen van de klant.

Bij volledig klant gericht ontwerp wordt niet gebruik gemaakt van standardelementen of -cellen. De ontwerpkosten zullen daardoor hoger zijn, maar er kunnen, door de betere optimalisatiemogelijkheden, ook hogere prestaties met het ontwerp gehaald worden, wat in bepaalde gevallen kan opwegen tegen de hogere ontwerpkosten.

Zoals deze methodes wel duidelijk maken, gaat het bij elektrotechnische ontwerpen in de praktijk vaak om componentselectie, het plaatsen van componenten in een configuratie en soms ook het parametrisch variëren van afmetingen van componenten. Conceptueel ontwerp in de zin van het uitdenken van *nieuwe* werkwijzen om functies te vervullen speelt in mindere mate een rol. De genoemde methodes dekken echter niet het hele terrein van het ontwerpen van elektronische systemen. Zo zijn voor het ontwerp van complexe elektronische systemen aparte methodische aanpakken ontwikkeld.⁸

Ontwerpen in de informatica

In de informatica wordt software, besturingssystemen, netwerken en dergelijke ontworpen. In het geval van software kan het daarbij gaan om zeer grote software-programma's, of combinaties daarvan zijn, tot complete informatiesystemen aan toe. In het laatste geval moet de ontwerper tijdens het ontwerpproces ook rekening houden met organisatorische aspecten, wettelijke standaarden en arbeidsvraagstukken m.b.t. het bedrijfsproces dat geautomatiseerd wordt. In tegenstelling tot de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek is het ontworpen product niet materieel van aard, maar een tekststructuur, of uiteindelijk een eindeloze reeks nullen en enen. Dat betekent dat het ontworpen artefact niet grafisch kan worden weergegeven, maar "alleen" in de vorm van een programmacode.⁹

Expliciete aandacht voor ontwerpen en ontwerpmethoden bij software-ontwikkeling is van vrij recente datum. Ontwerpen is dan ook nog een relatief weinig ontwikkeld onderzoeksgebied in de informatica.¹⁰ Software werd in het begin meestal ad hoc ontwikkeld. Niet alleen door de grootte maar vooral door de gebrekkige aanpasbaarheid en uitbreidbaarheid van programma's werd deze manier van ontwerpen van software echter steeds minder aantrekkelijk. Een groot deel van de kosten voor software-ontwikkeling wordt namelijk tegenwoordig besteed aan onderhoud en aanpassing van bestaande programma's.

Meestal begint een meer systematisch ontwerpproces voor informatiesystemen met een analyse van de huidige en de gewenste situatie van informatievoorziening in een te automatiseren bedrijfsproces. Bedrijfsprocessen, met name de informatiestromen, kunnen beschreven worden met behulp van diverse typen diagrammen. Deze diagrammen vormen een basis voor de beschrijving van

⁸ Zulk soort methoden zijn onder andere ontwikkeld door Bosman. Zie Bosman (1978 en 1992). Bosmans systematische aanpak voor het ontwerp van elektronische systemen lijkt qua opdeling in ontwerpstappen en ontwerptaken sterk op een aantal systematische methodes uit de werktuigbouwkunde.

⁹ Er worden ook wel diagramtechnieken gebruikt, maar deze zijn geen volledige representatie van het uiteindelijke programma.

¹⁰ Interviewverslag Apers.

wat het te ontwerpen programma of systeem moet doen. Zo'n beschrijving van het systeem kan formeel of informeel van aard zijn. In het eerste geval gebeurt de beschrijving in een computer-specificatietaal - of in diagrammen gekoppeld aan zo'n taal -, waardoor het mogelijk is de beschrijving te controleren op consistentie. Bovendien kan met een formele beschrijving automatisch gecontroleerd worden of het ontworpen programma voldoet aan de beschrijving. Met informele beschrijvingen kan dat niet; een informele beschrijving is een beschrijving met diagrammen, die geen "diepere" betekenis hebben. In de praktijk beperken software-ontwikkelorganisaties zich vaak tot het opstellen van een informele beschrijving en laten ze een formele beschrijving achterwege.¹¹ Op basis van zo'n formele of informele beschrijving wordt vervolgens een programma gegenereerd (al dan niet automatisch), dat getest wordt op de van te voren gestelde specificaties.

Er bestaan diverse methoden en technieken voor de ontwikkeling van software, zoals SDM (Software Development Method). Er is echter geen overeenstemming over wat de beste ontwerpmethodologie is.

Ontwerpen in de mechatronica

Veel apparatuur zoals bijvoorbeeld de CD-speler bevat zowel mechanische als elektronische onderdelen. Voor de werking van dit soort systemen is vaak speciale software ontworpen. In zulk soort gevallen spreekt men tegenwoordig vaak van mechatronica. Mechatronica wordt daarbij gedefinieerd als "de synergetische combinatie van precisiemechanica, elektronische besturings-technologie en systeemdenken bij het ontwerpen van produkten en processen".¹² Mechatronisch ontwerpen is een multidisciplinaire bezigheid. Het vergt kennis van werktuigbouwkunde, elektrotechniek, wiskunde en de informatica. Bij mechatronisch ontwerpen wordt vaak gebruik gemaakt van ontwerpteamen die verschillende onderdelen van het uiteindelijke systeem ontwerpen.

Voor mechatronica bestaan in beperkte mate speciale ontwerpaanpakken en speciale ontwerphulpmiddelen. Het terrein is interessant omdat er duidelijk wordt wat de combinatie van verschillende disciplines in ontwerpen voor problemen met zich mee brengt. Ten dele spelen deze problemen ook in de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek, maar op meer beperkte schaal. Ik zal kort een aantal punten aanstippen.

In een mechatronisch ontwerp kunnen functies in principe zowel mechanisch, elektronisch of door de software vervuld worden. In veel gevallen zie je een ontwikkeling van (fijn)mechanische vormgeving naar elektronische vormgeving. Een voorbeeld is de platenspeler.¹³ In eerste instantie werd het geluid puur mechanisch opgewekt en versterkt. In de loop van de ontwikkeling van de platenspeler werd deze wijze van versterking vervangen door een elektronische. Met de ontwikkeling van de CD-speler is een apparaat ontstaan waarin nog meer functies op elektronische wijze vervuld worden. Functies die eerst elektronisch vormgegeven werden kunnen tegenwoordig ook steeds meer met behulp van software vervuld worden. Als je een schakeling wil die 0 of 1 als uitgangssignaal geeft kun je dat makkelijker met software doen dan met een diode. De keuze tussen verschillende mechanische, elektronische en computationele wijzen van vormgeving vergt kennis van verschillende disciplines. Bovendien moet de mechanische, elektronische en programmeer-aspecten van een inrichting op elkaar afgestemd blijven. Dit vergt afstemming tussen de ontwerpers van de verschillende onderdelen.

Een tweede punt is de wijze van optimalisatie in mechatronica. Mechatronische systemen kunnen het beste geoptimaliseerd worden door het systeem in zijn geheel te optimaliseren.¹⁴ Dat betekent dat de ontwerpspecialisten voor deelsystemen niet hun deelsysteem moeten optimaliseren,

¹¹ Interviewverslag Apers.

¹² Dit is de definitie van de EG/IRDAC-werkgroep. Zie Van Amerongen (1992) en Van Brussel (1991).

¹³ Zie ook van Amerongen (1992).

¹⁴ Van Amerongen (1992).

maar het gedrag van hun systeem in een aantal parameters moeten beschrijven, waarvan de waarde vastgelegd kan worden tijdens de optimalisatie van het gehele systeem. Op deze manier kan het systeem in zijn geheel geoptimaliseerd worden. Het moge duidelijk zijn dat dit goede afspraken tussen de ontwerpers van verschillende deelsystemen vergt om een beschrijving van het totale systeem te krijgen die het mogelijk maakt het gehele systeem te optimaliseren.

3 CONVENTIONELE ONTWERPHULPMIDDELEN IN DE ONTWERPPRAKTIJK

Ontwerpers maken tijdens het ontwerpproces gebruik van een groot aantal hulpmiddelen. Tekeningen, schetsen, prototypes, technische modellen, diverse representatie-technieken en -conventies voor bijvoorbeeld functies of werktuigonderdelen, reken-, analyse-, simulatie-, test- en optimaliseringsmethoden, methodes voor het opstellen van gebruikerseisen, handboeken, en diverse vormen van disciplinaire kennis zijn enkele voorbeelden. Deze ontwerphulpmiddelen ondersteunen verschillende soorten ontwerpactiviteiten zoals het genereren en uitdenken van ideeën, het analyseren en testen van ontwerpen, het communiceren en onderhandelen over het ontwerp. In dit hoofdstuk zal ik verschillende "conventionele", dat wil zeggen niet-computer-ondersteunde ontwerphulpmiddelen nalopen en bespreken welke rol ze vervullen in de ontwerppraktijken van de werktuigbouwkunde, de elektrotechniek en de informatica.

Tekeningen, schetsen en prototypes

Ontwerpen vergt volgens een aantal auteurs¹⁵ veel stilzwijgende kennis, kennis die niet onder woorden gebracht wordt of kan worden. Met name in de werktuigbouwkunde zijn schetsen, tekeningen en prototypes vaak een belangrijke bron en materialisatie van stilzwijgende kennis. Door een schets te maken ziet een ontwerper wat de verdiensten en tekortkomingen zijn van een idee. Vervolgens kan hij of zij zijn schets aanpassen, opnieuw kijken wat de verdiensten zijn, etcetera. Een ontwerper ontwikkelt zijn of haar ideeën dus vaak in communicatie met zijn tekeningen, die dienen om eerdere ideeën op te slaan en nieuwe ideeën te genereren. Tekeningen en schetsen zijn dus een belangrijke denkhulpmiddelen voor ontwerpers. Sommige ontwerpers blijken zelfs niet na te kunnen denken zonder hun tekentafel.¹⁶

Volgens Kathryn Henderson vervullen tekeningen, schetsen en prototypes echter niet alleen een belangrijke rol als denkhulpmiddel, maar ook een tweetal andere rollen in het ontwerpproces. Zo wijst Henderson erop dat een schets niet alleen een communicatiemiddel is, dat een bepaald ontwerpidee communiceert, maar ook dient als middel om de betrokkenen in de boot te houden. Een schets is namelijk nog zo vaag en open voor interpretatie, dat verschillende groepen er hun eigen invulling aan kunnen geven. Doordat de verschillende betrokkenen de schets op hun eigen manier uitleggen, zullen ze makkelijker instemmen met de schets. Dit is weliswaar - gezien vanuit het uiteindelijke doel van het ontwerpproces - een "schijn-overeenstemming", maar ook het begin van een onderhandelingsproces dat tot verdergaande overeenstemming kan leiden. In dit onderhandelingsproces kunnen de verschillende betrokkenen invloed uitoefenen op de verdere ontwikkeling van het ontwerp. Wil het ontwerp uiteindelijk slagen dan moet dit onderhandelingsproces tot een eenduidig ontwerp leiden, al dan niet door het tot stand komen van consensus tussen de betrokkenen.¹⁷

De boven geschetste rol van schetsen, het tot stand brengen van een "schijn-overeenstemming" en het in gang zetten van onderhandelingen, duidt Henderson aan met de term "boundary object". Een "boundary object" is een object dat door verschillende groepen verschillend geïnterpreteerd kan worden, maar toch eenduidig genoeg is om een zekere gemeenschappelijke eenheid en identiteit tussen de betrokkenen te bewerkstelligen. Schetsen, tekeningen en prototypes van een ontwerp kunnen een rol als "boundary object" vervullen omdat ze niet alleen communicatiemiddelen zijn die een bepaald ontwerpidee communiceren, maar ook nog zo vaag en multi-interpretabel

¹⁵ Zie met name Henderson (1991, 1993a & b), Schön (1983, 1992) en Buciarelli (1984 en 1988).

¹⁶ Zie Henderson (1991, 459-460).

¹⁷ Het onderhandelingsproces kan ook eindigen omdat een groep zijn ideeën gezaghebbend oplegt.

kunnen zijn, dat ze door verschillende groepen anders ingevuld worden. Deze interpretatieve flexibiliteit is cruciaal voor schetsen, tekeningen en prototypes als "boundary object" omdat anders de betrokken groepen al vroeg in het ontwerpproces een eenduidige keus moeten maken voor òf tegen het ontwerp. Nu blijven ze betrokken in het ontwerpproces en verplichten zich makkelijker aan het uiteindelijke ontwerp.

Ook bepalen schetsen, tekeningen en prototypes volgens Henderson wie mogen deelnemen aan het ontwerpproces. Zonder toegang tot schetsen, tekeningen of prototypes is het immers nauwelijks mogelijk invloed uit te oefenen op de ontwikkeling van een ontwerp. Deze politieke rol van schetsen, tekeningen en prototypes duidt Henderson aan met de term "conscriptio device". Tekeningen, schetsen en prototypes vervullen echter niet alleen een buiten-sluitende politieke rol, maar ook een mobiliserende politieke rol. Ze worden gebruikt om klanten en opdrachtgevers te overtuigen van de wenselijkheid van een ontwerp, om geldschieters te werven en om producenten voor het ontwerp warm te maken.

De verschillende rollen die Henderson aangeeft voor schetsen, tekeningen en prototypes kunnen als volgt worden samengevat:

- 1) individueel denkhulpmiddel. Materialisatie én generator van (stilzwijgende) kennis en ideeën;
- 2) communicatiemiddel tussen ontwerpers. Materialisatie van gedeelde opvattingen en kennis én "boundary object";
- 3) politiek middel. Middel om bepaalde groepen in- of buiten te sluiten en te mobiliseren.

Tekenconventies

Het eindproduct van het ontwerpproces is een specificatie die gebruikt kan worden voor de productie van het betreffende ontwerp. In de werktuigbouwkunde en soms ook in de elektrotechniek gebeurt dit in de vorm van een tekening of een set tekeningen.¹⁸ Deze tekeningen moeten goed en eenduidig te lezen zijn voor de productie-afdeling. Dit vergt een aantal tekenconventies. In de betreffende disciplines bestaan dan ook bepaalde afspraken over hoe bepaalde onderdelen getekend moeten worden, welke projecties gehanteerd kunnen worden, hoe doorsneden aangegeven moeten worden, hoe bepaalde materiaaleigenschappen aangegeven moeten worden, enzovoorts.

Tekenconventies spelen vooral tegen het einde van het ontwerpproces een belangrijke rol. In het begin van het ontwerpproces vervullen tekeningen en schetsen vooral een rol als denkhulpmiddel en "boundary object". Dat betekent dat het ontwerp dan nog niet éénduidig vastligt en het ook niet wenselijk is het ontwerp te éénduidig vast te leggen. Ontwerpers zullen zich dus vaak in beginfasen van het ontwerpproces nog niet strikt aan tekenconventies houden.¹⁹

¹⁸ Tegenwoordig, zeker in de elektrotechniek, zijn deze tekeningen vaak vervangen door computerfiles.

¹⁹ Vergelijk Goel (1992) die onderscheidt maakt tussen twee soorten tekensystemen: "sketching systems" en "drafting systems". Deze tekensystemen vormen verschillende symbool-talen, met verschillende syntactische en semantische eigenschappen. In "sketching systems" kunnen in tegenstelling tot "drafting systems" symbolen overlappen en verwijzen naar verschillende klassen van externe objecten. Bovendien is de verwijzing van symbool naar een klasse van externe objecten in een "drafting system" *niet* éénduidig. "Sketching systems" maken het mogelijk ontwerpideeën te ontwikkelen die meerduidelijk en flexibel zijn.

Goel laat zien dat in de beginfase van het ontwerp van het ontwerp vooral gebruik gemaakt wordt van schets-symbolen, terwijl in later gebruik gemaakt wordt van meer rigide, éénduidige teken-symbolen.

Representatie-technieken en decompositie

Een ontwerpproces begint vaak met het opstellen van de eisen aan het ontwerp. Deze eisen vormen als het ware een eerste representatie van het te ontwerpen produkt. Ook de uiteindelijke ontwerp-tekening is een representatie van het produkt, zoals dat geproduceerd zal gaan worden. Het ontwerpproces kan nu opgevat worden als het ontwikkelen van steeds nieuwe representaties van het uiteindelijke produkt. De gebruikte representaties worden daarbij steeds concreter, detaillistischer en éénduidiger interpreteerbaar.²⁰

Ter ondersteuning van deze verschillende representaties bestaan er, meestal domein-afhankelijke representatie-technieken vaak in de vorm van teken- of diagram-conventies. Deze maken het bijvoorbeeld mogelijk een bepaalde onderdeel met een abstract symbool aan te geven. Het onderdeel, dat voorlopig als een soort "zwarte doos" wordt beschouwd, kan dan later in het ontwerpproces nader ingevuld worden. Op deze manier maken representatie-technieken het voor ontwerpers eenvoudig om op verschillende abstractieniveaus te werken en desgewenst te wisselen van abstractieniveau. Zeker hogere abstractieniveaus worden vaak gebruikt voor het genereren en variëren van ontwerp-ideeën, waarna de ontwerper als het ware afdaalt naar lagere abstractieniveaus.

Representatie-technieken kunnen ook behulpzaam bij de decompositie van ontwerpproblemen. Ontwerpers werken meestal niet aan het hele ontwerpprobleem tegelijk, maar delen het probleem op in deelproblemen. Hoewel systematische ontwerpaanpakken meestal voorstaan dat aan alle deelproblemen op hetzelfde abstractieniveau wordt gewerkt, werken ontwerpers meestal aan verschillende deelproblemen tegelijk op verschillende abstractieniveaus. Door middel van representaties kunnen ze de verhouding tussen de verschillende abstractieniveaus en de verschillende deelproblemen overzien. De decompositie van ontwerpproblemen is over het algemeen domein-afhankelijk. Ontwerpers delen problemen meestal op in deelproblemen op basis van hun ontwerpervaring en op basis van bestaande representatieconventies, zoals technische modellen²¹ voor specifieke produkten.

Representatietechnieken voor functies

Er is een vorm van abstracte representatie die in dit verband speciale aandacht verdient, namelijk het representeren van het ontwerp in termen van de te vervullen functie. Op basis van de gebruikerseisen kan meestal de functie of het doel van het te ontwerpen produkt worden vastgesteld. Als deze functie in subfuncties kan worden opgedeeld, kan het ontwerpprobleem ook opgedeeld worden in deelproblemen, waaraan afzonderlijk gewerkt kan worden. Subfuncties worden daarbij opgevat als "zwarte dozen" met bepaalde in- en uitgangskennmerken. Op deze manier wordt het ontwerpprobleem in stukken gehakt, waarbij de samenhang tussen de stukken duidelijk blijft door de samenhang tussen de subfuncties. In het ontwerpproces kunnen deze subfuncties nader ingevuld worden door er werkwijzen bij te zoeken, die verder geconcretiseerd kunnen worden in produktonderdelen, die weer later samengevoegd moeten worden.

In de werktuigbouwkunde bestaan, afgezien van een aantal specifieke domeinen, geen algemeen aanvaarde representatie-conventies voor functies. Er bestaan wel algemene methodes voor het opdelen van functies en het opstellen van functieblokschema's, maar er is geen algemeen geaccepteerde manier voor het weergeven van functies.²² In de elektrotechniek bestaan, dankzij de inspanningen van met name normaliseringscommissies²³, wel algemene gebruikte standaarden voor de representatie van functies. In de informatica gebeurt functie-representatie meestal met behulp van

²⁰ Vergelijk Goel & Pirolli (1989) en Goel (1992).

²¹ Technische modellen zullen verderop uitgebreider aan de orde komen.

²² Interviewverslag Riksen. Zie ook Riksen (1991).

²³ Zie Vlietstra (1988, 19),

diverse soorten diagrammen en/of een formele specificatietaal. Er bestaan in de informatica verschillende standaarden voor diagrammen en verschillende specificatietalen naast elkaar.

Functie-representaties hebben naast de ondersteuning van decompositie drie rollen. In de eerste plaats zijn ze een generator van ideeën. Een functie-representatie kan de ontwerper helpen bij het ontwikkelen van concepten ter vervulling van functies. Ontwerpers kunnen daarbij vaak gebruik maken van catalogi en software-bibliotheken, waarin opgezocht kan worden hoe bepaalde functies vormgegeven zouden kunnen worden.²⁴ Overigens bestaan hierbij, zoals in hoofdstuk 2 al aangeven, belangrijke verschillen tussen de verschillende technische disciplines. In de ontwerp-praktijk van de werktuigbouwkunde is de overgang van functie naar werkwijze veel minder éénduidig dan in de elektrotechniek en informatica.

Ten tweede kunnen functie-representaties gebruikt worden voor het variëren van ontwerp-ideeën. Een methode is bijvoorbeeld het opstellen van een morfologisch overzicht. In een morfologisch overzicht worden bij verschillende subfuncties verschillende werkwijzen gezocht. Er kunnen nu verschillende combinaties van werkwijzen gemaakt worden. Uit deze variëteit van ontwerp-ideeën kan vervolgens het beste ontwerp-idee gekozen worden.

Een derde rol die functierepresentaties kunnen vervullen is die van analysehulpmiddel. In de elektrotechniek en de informatica is het in bepaalde gevallen mogelijk een formele (computer)beschrijving te geven van de te vervullen functionaliteit. In dat geval kunnen met behulp van de computer ontwerp-ideeën geanalyseerd worden aan de hand van de formele specificatie. Zo kan nagegaan worden of een ontwerp de te vervullen functie ook daadwerkelijk vervult.

Test- en simulatietechnieken

Voordat ontwerpen geproduceerd worden, worden ze meestal eerst uitgetest. In praktijkomstandigheden wordt gekeken of het ontwerp doet wat het moet doen. Zo niet dan wordt het aangepast. Vanwege de hoge kosten die verbonden zijn aan het falen van een ontwerp in de praktijk, zijn testen of andere wijzen om het gedrag van ontwerpen onder praktijkomstandigheden te voorspellen, vaak onontbeerlijk. In een aantal gevallen zal testen echter onmogelijk zijn. Het zal duidelijk zijn dat het niet mogelijk was de Oosterscheldedam onder praktijkomstandigheden te testen. In zulk soort gevallen worden - zo mogelijk - plaatsvervangende tests gedaan. In het geval van de Oosterschelde gebeurde dat met behulp van schaalmodellen. Dat vergde echter wel genoeg inzicht in de relevante natuurkundige verschijnselen. Voor het schaalmodel van de Delta-werken was het bijvoorbeeld essentieel te weten hoe het model gedimensioneerd moest worden. Als je alle afstanden duizend maal zo klein maakt moet je dan ook de stroming duizend maal zo langzaam maken? In de stromingsleer zijn kengetallen ontwikkeld om zulk soort vragen te beantwoorden. In gevallen waar onvoldoende kennis is van de werking van het te ontwerpen produkt en de relevante praktijkomstandigheden, zoals vaak in de sociale wetenschappen, zijn plaatsvervangende tests niet mogelijk.

Een andere mogelijkheid is het doen van simulaties. In dat geval wordt een wiskundig model opgesteld van het gedrag van het te ontwerpen produkt en de relevant geachte omgeving, waarin het produkt moet functioneren. Dit gebeurt bij het ontwerp van chips. De werking van chips kan beschreven worden m.b.v. wiskundige algoritmen, waarbij bijvoorbeeld de temperatuur gevarieerd kan worden. Meestal worden deze algoritmen in de computer gestopt. Het gedrag van chips bij verschillende temperaturen kan nu gesimuleerd worden. Een simulatie verschilt dus van een test, in die zin dat zowel de praktijkomstandigheden als het gedrag van het ontworpen systeem nagebootst (gesimuleerd) worden.

Plaatsvervangende tests of simulaties zijn in zekere zin altijd aantrekkelijker dan echte tests omdat ze eenvoudiger en goedkoper zijn. Het testen van een schroef met een schaalmodel is

²⁴ Ook een aantal andere bronnen en hulpmiddelen kan gebruikt worden voor het ontwikkelen van nieuwe concepten zoals patenten, tijdschriften en experts. Zie Ullman (1992, 140-166).

lang niet zo omslachtig en duur als een test op ware grootte in volle vaart. Een simulatie op de computer op basis van een hydrodynamisch model is nog eenvoudiger. De zekerheid dat een schroef zich in de praktijk net zo zal gedragen als in een computersimulatie is echter nooit volledig en mede afhankelijk van de kennis van de relevante (fysische) verschijnselen. In het - hypothetische - geval dat die kennis vrijwel volledig is, zijn tests en simulaties eigenlijk overbodig geworden en kan volstaan worden met reken- en analysetechnieken (zie verderop). Meestal echter kan men niet zonder tests, al is het maar om de klanten te overtuigen dat een ontwerp echt doet wat het moet doen.

Als we naar de in dit rapport besproken disciplines kijken dan zien we dat in de werktuigbouwkunde in de meeste gevallen testen worden gedaan met prototypes of schaalmodellen.²⁵ In de elektrotechniek zijn (computer)simulaties sterk ontwikkeld en hebben in sommige gevallen echte tests geheel verdrongen. In andere gevallen vinden nog wel tests plaats, waarbij de testresultaten dan vaak direct gebruikt worden om bestaande simulaties te verbeteren.²⁶ In de informatica is er nauwelijks verschil tussen testen en simulatie. Testen van software betekent meestal dat gekeken wordt of een programma voldoet aan de opgestelde specificaties; er wordt dan eigenlijk vanuit gegaan dat de gebruiker de software op de juiste manier gebruikt. Aangezien software zijn eigen gedrag in computertaal beschrijft kan er dan geen onderscheid gemaakt worden tussen simulatie en testen. Immers zowel de praktijkomstandigheden als het gedrag van het systeem worden als bekend beschouwd. Natuurlijk is ook een vorm van testen mogelijk waarbij gekeken wordt naar hoe gebruikers daadwerkelijk omgaan met de software. Dan is er sprake van praktijkomstandigheden die niet, of in ieder geval minder éénduidig, gesimuleerd kunnen worden.

Reken- en analysetechnieken

Simulaties en zeker tests kunnen meestal pas gedaan worden als een ontwerp compleet is, waarna het aangepast kan worden. In de meeste technische ontwerpdomeinen bestaan er echter ook reken- en analysetechnieken voor onderdelen van ontwerpen. In de werktuigbouwkunde zijn dat bijvoorbeeld stijfheid- en sterkteberekeningen en berekeningen aan de dynamica van onderdelen, zodat bijvoorbeeld de afmetingen van een draagbalk berekend kunnen worden en niet door "trial and error" hoeven worden vastgesteld. Reken- en analysetechnieken maken het mogelijk al in een vroeg stadium van het ontwerpproces het gedrag van het systeem of onderdelen te voorspellen, zodat er - hopelijk - in latere stadia minder aanpassingen nodig zijn.

In het geval niet voldoende rekentechnieken aanwezig zijn of deze technieken omslachtig zijn, wordt vaak gebruik gemaakt van ervaringskennis en handboeken. Voor schroeven is bijvoorbeeld de vormgeving en de afmeting gestandaardiseerd; ontwerpers weten op grond van ervaring en opleiding in de meeste gevallen welke schroef ze moeten kiezen. Voor schroeven en propellers bestaan er handboeken met standaardvormen en testresultaten van deze standaardvormen bij verschillende afmetingen en praktijkomstandigheden.²⁷ De ontwerper kan op grond hiervan keuzes maken.²⁸

Vooraf in de werktuigbouwkunde bestaat er een breed scala aan reken- en analysetechnieken. In de elektrotechniek zijn simulatietechnieken over het algemeen belangrijker dan rekentechnieken. Tegenwoordig kunnen simulaties in de elektrotechniek echter vaak al in de eerdere fases van het ontwerpproces ingezet worden. Ook is in de elektrotechniek vaak analyse in een de

²⁵ Interviewverslag Visser.

²⁶ Interviewverslag Kerkhoff.

²⁷ zie Vincenti (1990) voor propellers en interviewverslag van Gunsteren voor schroeven.

²⁸ Tegenwoordig worden schroeven en propellers overigens meestal met computersimulaties en de eindige elementenmethode ontworpen.

vroeg stadium van het ontwerpproces mogelijk met behulp van een formele beschrijving van het te ontwerpen produkt. Het ontwikkelde ontwerp wordt dan geanalyseerd in termen van de formele beschrijving. Ook in de informatica is terugkoppeling naar de formele beschrijving van het te ontworpen programma een belangrijke wijze van analyse.

Optimaliseringstechnieken en parametrische modellen

Ontwerpen is in de praktijk meestal in de eerste plaats gericht op het tot stand brengen van een voldoende goed werkend ontwerp. Zo mogelijk zal een ontwerper echter ook streven naar een optimalisatie van dit ontwerp. Optimalisatie gebeurt vaak op grond van parametrische modellen. Parametrische modellen zijn produktmodellen, waarbij een aantal voor het ontwerp relevante variabelen gedefinieerd worden. Een voorbeeld van een ontwerp-variabele is de lengte van een hijskraan of de dikte van een balk. Deze variabelen tezamen vormen de invoer voor een parametrisch rekenmodel, dat (het gedrag van) het systeem beschrijft. Door eisen te stellen aan de bepaalde variabelen kunnen nu de optimale waarden voor de andere variabelen berekend worden. Optimalisatie is dan mogelijk als er een - kwantificeerbaar - criterium is dat uitgedrukt kan worden in termen van de gedefinieerde variabelen.²⁹

Kennis van de relevante parameters van een ontwerp is altijd zinvol, ook al is het door gebrek aan kennis van bijvoorbeeld de samenhang tussen parameters niet mogelijk een parametrisch rekenmodel op te stellen. Als een ontwerper weet welke parameters relevant zijn voor een ontwerp kan hij of zij op meer systematische wijze variaties op een eerder ontwerp generen en uitproberen.³⁰

Technische modellen

Ontwerpen is in veel gevallen een multidisciplinaire aangelegenheid waarin verschillende vormen van kennis en kunde samenkomen. Dit geldt met name voor mechatronisch ontwerpen, maar ook in mindere mate voor werktuigbouwkundig en elektronisch ontwerpen. Bij ontwerpen in de informatica speelt multi-disciplinariteit maar in beperkte mate. Naast de inbreng van vakkennis uit verschillende disciplines, moet er daarom, om tot een ontwerp te komen, gemeenschappelijke betekenissen en kennis met betrekking tot het concrete ontwerp ontwikkeld worden. Konda et al. (1992) spreken in dit verband van horizontale gedeelde kennis in tegenstelling tot verticale gedeelde kennis, die disciplinair georienteerd is. Deze horizontale gedeelde kennis is vaak gematerialiseerd in een te ontwerpen produkt, tekening, prototype of een andersoortige representatie. Deze representaties hebben als voordeel dat ze het *niet* noodzakelijk maken dat de verschillende invalshoeken van de betrokkenen, met bijbehorende kennis en kundes, inhoudelijk afgestemd worden, zolang de bijdrage van die invalshoeken maar vertaald kunnen worden naar communiceerbare representaties. Het is voldoende dat de verschillende ontwerpers de implicaties van hun redeneringen aan elkaar duidelijk kunnen maken; de redeneringen zelf hoeven niet begrepen te worden.³¹ Representaties van het te ontwerpen produkt zijn dus een belangrijk middel voor communicatie en afstemming.³²

Zoals eerder in dit hoofdstuk al duidelijk is geworden, zijn er verschillende manieren om ontwerpen te representeren. De tot nu toe behandelde manieren daarvoor waren tot op zekere hoogte produkt-onafhankelijk. In veel gevallen zijn echter ook, vooral in de werktuigbouwkunde, representaties ontstaan die zich concentreren rond bepaalde produkten. Door Disco et al. (1992) en

²⁹ Er wordt ook gewerkt aan parametermodellen die gebruik maken van kwalitatieve variabelen. Zie Finger & Dixon (1989a, 57-58).

³⁰ Voor parameter-variantie, zie ook Vincenti (1990, hfdst. 5).

³¹ Zie Konda et al. (1992, 37).

³² Zie ook Van de Poel, Rip en Van Vught (1993).

Disco (1990) wordt dit geheel van representaties, dat zich concentreert rond een bepaald produkt, aangeduid met de term technisch model. Typisch voor technische modellen is dat ze een zekere conceptuele abstractie van het betreffende produkt geven. Ze tonen de structuur en functie van het produkt en laten zien welk (fysisch) principe ten grondslag ligt aan de werking ervan.

Bij het ontwerpen van sloopschroeven bijvoorbeeld worden de volgende representaties gebruikt: het produkt zelf, schaalmodellen van het produkt, tekeningen en rekenmodellen gebaseerd op hydrodynamische theorieën. Tezamen vormen ze het technische model. Deze verschillende representaties belichten ieder in meer of mindere mate specifieke kenmerken van het produkt. Van der Meulen (1992) laat zien hoe deze verschillende representaties gebruikt worden voor communicatie over het ontwerp door verschillende bij het ontwerp betrokken groepen zoals rederijen, werven, consultants, mechanisch ontwerpers, hydrodynamische ontwerpers, proefstations en technische wetenschappers. Deze verschillende groepen leveren ieder hun eigen bijdrage aan het ontwerp. Het technisch model maakt de afstemming van verspreid plaatsvindende ontwerp-activiteiten mogelijk.

Heuristieken en ondersteuning van creativiteit

Zoals we gezien hebben vervullen tekeningen en andere representaties een belangrijk hulpmiddel bij het genereren en variëren van ontwerpideeën. Daarnaast wordt in ontwerpen gebruik gemaakt van zogenaamde heuristieken. Heuristieken zijn bepaalde zoekrichtingen die gebruikt kunnen worden bij het zoeken naar ontwerp-oplossingen, maar waarbij het vinden van een oplossing niet op voorhand gegarandeerd is. Ze zijn vaak gebaseerd op technische modellen of op prototypische ontwerp-oplossingen. Een voorbeeld van een heuristiek is parametervariatie.³³

Naast deze hulpmiddelen zijn er ook meer algemene hulpmiddelen en methoden ontwikkeld ter ondersteuning van de creativiteit in het ontwerpproces. Enkele voorbeelden zijn brainstormen, morfologische analyse en lateraal denken.³⁴

³³ Voor parametervariatie zie Vincenti (1991).

³⁴ Voor een overzicht van methoden en techniek ter bevordering van creativiteit in ontwerpen zie Rickards (1980).

4 DE ONTWIKKELING VAN CAD-ONTWERPOMGEVINGEN

In de huidige ontwerppraktijken van werktuigbouwkundigen, elektrotechnici en informatici spelen CAD-hulpmiddelen een belangrijke rol. Vanaf de jaren zestig zijn in de verschillende disciplines een groot aantal CAD-hulpmiddelen ontwikkeld, die in een aantal gevallen de bestaande ontwerppraktijken veranderd hebben. In dit hoofdstuk wordt de ontwikkeling van CAD-hulpmiddelen en hun rol in de ontwerppraktijk geschetst.

CAD in de werktuigbouwkunde

In de werktuigbouwkunde zijn de meeste CAD-hulpmiddelen gericht op het ondersteunen van tekenen en rekenen. De ontwikkeling van tekenhulpmiddelen begon begin jaren zeventig met de ontwikkeling van een lichtpen met behulp waarvan tekeningen op de computer gemaakt konden worden. Later werden programma's ontwikkeld, waarmee met behulp van een set primitieven (punten, lijnen, cirkels en bogen) tekeningen gemaakt konden worden.³⁵ Deze vormen van CAD vormden eigenlijk een automatisering van de tekentafel. Daarom sprak men wel van "Computer Aided Drafting". Vanaf midden jaren zeventig werden ook drie-dimensionale (3D) representaties op de computer mogelijk. Aanvankelijk met behulp van zogenaamde draadmodellen ("wire frames"), die opgebouwd zijn uit punten verbonden door lijnen. Vervolgens werden oppervlaktemodellen ("surface models": draadmodellen met gesloten oppervlakten) en vaste modellen ("solid models", representaties van 3D-figuren opgebouwd uit 3D-primitieven als kubussen, bollen en kegels) ontwikkeld. Deze modellen maakten het mogelijk steeds geavanceerder te tekenen met behulp van de computer. Bovendien konden deze tekenprogramma's in toenemende mate gekoppeld worden aan rekenprogramma's.

Gecomputeriseerde rekenmodellen voor bijvoorbeeld stijfheid- en sterkteberekeningen bestonden in de werktuigbouwkunde al lange tijd. De computer heeft echter geleid tot de verdere opkomst van nieuwe analyse- en rekenmethodes, zoals de eindige elementenmethode (EEM).³⁶ Hoewel koppeling van reken- en tekenprogramma's in principe mogelijk is, zijn er slechts op beperkte schaal geïntegreerde programma's ontwikkeld. Een probleem is dat de benodigde analyse- en rekenprogramma's vaak domein-afhankelijk zijn.³⁷

Analyse van een ontwerp met behulp van rekenprogramma's is meestal alleen mogelijk als alle maten gespecificeerd zijn. Dat is echter pas in de latere fase van het ontwerpproces het geval. Analyseprogramma's kunnen daardoor nauwelijks de eerdere fasen van het ontwerpproces ondersteunen.³⁸ Dat geldt tot zekere hoogte ook voor tekenprogramma's. In de eerdere fasen van het ontwerpproces kan volstaan worden met meer abstracte globale tekeningen of schetsen, die slechts in beperkte mate computer-ondersteund worden. Er wordt in dit verband tegenwoordig wel gewerkt aan het zogenaamde "feature-based" modelleren. Over de precieze definitie van het begrip "feature" bestaat onenigheid, maar het kan het beste opgevat worden als een abstractie van detail-informatie over werktuigonderdelen; het betreft dan informatie over zowel de vorm als het gedrag (de functie)

³⁵ Chern (1991).

³⁶ Bij de eindige elementen methode wordt het ontwerp opgedeeld in een eindig aantal discrete onderdelen die onderling verbonden zijn. Op de afzonderlijke elementen kunnen nu allerlei berekeningen, simulaties en analyses (stijfheid en sterke, vervorming, warmteoverdracht) losgelaten worden. De verschillende elementen zijn gekoppeld via randvoorwaarden en het gedrag van het hele systeem kan benaderd worden met numerieke methodes. Op deze manier kan, door numerieke computerondersteuning, het gedrag van complexe systemen, dat niet meer "eenvoudig" te berekenen is, toch benaderd worden.

³⁷ Zie ook Downey (1992, 159-160).

³⁸ Finger & Dixon (1989b, 127-128).

van werktuigonderdelen.³⁹ "Features" maken daardoor ontwerpen op een hoger (geometrisch) abstractieniveau mogelijk. Een andere belangrijke ontwikkeling in dit verband is het werken met zogenaamde incomplete geometrieën. Deze maken het mogelijk bepaalde keuzes in het ontwerpproces open te laten, eventueel zelfs naar de produktieafdeling toe.⁴⁰ Er wordt ook gewerkt aan analyse- en rekenprogramma's voor incomplete geometrieën.⁴¹

Een directe koppeling van rekenen en tekenen vindt plaats in zogenaamde parametrische computermodellen. De basis voor parametrische modellen wordt gevormd door bestaande produkten. Parametrische modellen bestaan uit een configuratie en de daarbij relevante parameters, die gekoppeld zijn aan een rekenmodel. Parametrische modellen her-ontwerpen dus op basis van bestaande produkten. Bij aanpassing van bepaalde randvoorwaarden op bepaalde parameters past het model de andere parameters aan. Op deze manier kunnen parametrische modellen ook voor optimalisatie van een ontwerp gebruikt worden. Parametrische modellen zijn echter produkt-gebonden en hebben nog een relatief klein toepassingsterrein.⁴²

Werktuigbouwkundigen merken vaak op dat CAD wel rekenen en tekenen ondersteund, maar nog nauwelijks het "echte" ontwerpen. Met het echte ontwerpen bedoelen ze dan meestal het conceptuele ontwerp: het conceptueel uitdenken van mogelijke werkwijzen bij een functie en de daaraan verwante activiteiten, zoals het genereren van een functionele beschrijving, het opdelen van functies, het integreren van deeloplossingen etcetera. De meeste van deze activiteiten worden nog nauwelijks computer-ondersteund.⁴³ Ontwikkelingen als feature-based modelleren en ontwerpen vormen mogelijk een eerste stap naar de computer-ondersteuning van zulk soort activiteiten. Verder wordt er gewerkt aan zogenaamde intelligente CAD-systemen.⁴⁴ In zulk soort intelligente systemen, zoals ICAD en WISDOM, wordt in een ontwerpbeschrijvingstaal beschreven hoe een bepaald ontwerpproces moet verlopen. De computer kan vervolgens het ontwerpproces zelf uitvoeren. Zo kan de computer, na het inbrengen van een flinke hoeveelheid ontwerpgegevens, zelf een ontwerp realiseren voor een zelfde soort probleem, als waarvoor de gegevens ingevoerd werden, maar waarbij andere criteria gesteld zijn. Deze systemen kunnen ook bestaande configuraties aanpassen omdat de computer voor het ontwerp specifieke kennis heeft; kennis die het systeem ten dele genereert uit de ingebrachte gegevens. Nadeel van deze systemen is dat de ontwerper in het begin zeer veel (voor hem of haar triviale) informatie in computertaal in moet voeren. Bovendien zijn deze intelligente modellen veel minder flexibel dan verwacht.

Een belangrijke belofte bij de ontwikkeling van CAD was een betere aansluiting tussen ontwerp en productie.⁴⁵ Voor de automatisering vanaf de productie zijn in de loop der tijd een aantal zogenaamde Computer Aided Manufacturing (CAM)-hulpmiddelen ontwikkeld, zoals numerieke gereedschapsmachines. Een betere aansluiting tussen CAD en CAM zou betekenen dat de eindprodukten van het ontwerpproces, bijvoorbeeld computertekeningen en -files, direct gebruikt zouden kunnen worden als invoer voor het productieproces. Bovendien zou het moeten betekenen dat in het ontwerpproces al rekening wordt gehouden met de mogelijkheden en onmogelijkheden in

³⁹ Finger & Dixon (1989b, 124).

⁴⁰ Interviewverslag van Houten. Een voordeel van incomplete geometrieën is dat de produktieafdeling weet welke keuzes wel en niet essentieel zijn voor het ontwerp. De produktieafdeling kan dan de andere keuzes zelf maken.

⁴¹ Finger & Dixon (1989a, 62).

⁴² Finger & Dixon (1989a, 57-58).

⁴³ Finger & Dixon (1989a & b). In bepaalde domeinen zijn wel al programma's beschikbaar die gewenste functionaliteiten kunnen vertalen in ontwerpen. Een voorbeeld is "mechanism design" (Finger & Dixon, 1989b, 121).

⁴⁴ Interviewverslag van Houten.

⁴⁵ Downey (1992).

het productieproces.⁴⁶ In feite is van deze belofte nauwelijks iets terecht gekomen. Ook zijn er in de werktuigbouwkunde, in tegenstelling tot de elektrotechniek nog nauwelijks hulpmiddelen ontwikkeld om rekening te houden met andere belangrijke aspecten, naast productie, van de levenscyclus van producten, zoals testbaarheid, betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid.⁴⁷

CAD in de Elektrotechniek

In de elektrotechniek is de ontwikkeling van CAD-hulpmiddelen in een snel tempo verlopen. Vrijwel alle ontwerpactiviteiten worden momenteel computerondersteund.

De eerste computerondersteunde ontwerphulpmiddelen werden ontwikkeld in de jaren zestig.⁴⁸ Voor de simulatie van analoge schakelingen werden toen zogenaamde elektronische circuit-analyse programma's ontwikkeld. Later werd ook de simulatie van digitale schakelingen mogelijk. De jaren zeventig laten vervolgens een groei van het aantal simulatieprogramma's zien. De introductie van deze programma's verliep aanvankelijk moeizaam omdat er niet zo veel vertrouwen was in de betrouwbaarheid.⁴⁹ Momenteel heeft simulatie echter het testen in laboratoriumsituaties (met "breadboards") in belangrijke mate vervangen. Toch gebeuren naast simulatie ook nog wel testen. In principe kan echter ook het testen van schakelingen volautomatisch gebeuren. In de schakeling worden dan een aantal teststructuren ingebouwd, die automatisch getest kunnen worden. De data van de tests worden teruggekoppeld naar de simulatieprogramma's zodat er een voortdurende controle is op de betrouwbaarheid van simulatieprogramma's, waardoor tevens de simulaties verbeterd kunnen worden.⁵⁰

De ontwikkeling van grafische tekenprogramma's voor elektronische schakelingen begon net als de ontwikkeling van simulatieprogramma's in de jaren zestig. Deze ontwikkeling leidde vanaf de jaren tachtig tot het op grote schaal verdwijnen van het tekenen op millimeterpapier ten faveure van tekenen met behulp van de computer.⁵¹

Hoewel aanvankelijk in de elektrotechniek de nadruk bij de ontwikkeling van CAD-hulpmiddelen op tekenen en simuleren lag, zijn in de loop der tijd ook CAD-hulpmiddelen ontwikkeld die andere ontwerpactiviteiten ondersteunen. Ik noem er enkele⁵²:

- * Produktspecificatie: formele methoden om de eisen waaraan een produkt moet voldoen op éénduidige wijze in computertaal te beschrijven;
- * Functioneel ontwerp: de overgang van de produktspecificaties naar functionele diagrammen, die als basis kunnen dienen voor het opstellen van een fysiek model, dat wil zeggen een model dat beschrijft hoe de schakeling er fysiek uitziet. Sub-activiteiten bij functioneel ontwerp zijn: analyse, opdeling in deelproblemen, simulatie en testbaarheid-controles;
- * Produktontwerp: de overgang van de functionele beschrijving naar een fysieke beschrijving van het ontwerp inclusief bijbehorende technische produktdocumentatie. Sub-activiteiten zijn: onderdelenselectie, lay-out en tekenen, en ontwerpverificatie;
- * Productiegegevens-voorbereiding: de creatie van geschikte informatie voor verschillende produktiemachines op basis van het fysieke model en de technische produktbeschrijvingen;
- * Produktdocumentatie zoals stuklijsten, tekeningen en testspecificaties;
- * Archivering en distributie van produktgegevens.

⁴⁶ Dit laatste wordt ook wel "concurrent engineering" genoemd. Zie Finger & Dixon (1989b, 128-129).

⁴⁷ Finger & Dixon (1989b, 130).

⁴⁸ Vlietstra (1989, 3).

⁴⁹ Interviewverslag Peeters.

⁵⁰ Interviewverslag Kerkhoff.

⁵¹ Interviewverslag Kerkhoff.

⁵² Onderstaande beschrijving is ontleend aan Vlietstra (1988, 8-11). Voor nadere uitleg van de verschillende activiteiten zij ook verwezen naar deze tekst.

Zoals deze opsomming duidelijk maakt is vrijwel het gehele ontwerpproces computerondersteund. In feite is in de elektronica het ontwerpen zonder computerhulpmiddelen vrijwel onmogelijk geworden. Het handmatig ontwerpen van bijvoorbeeld een micro-compressor zou vrijwel een mensenleven kosten. In de elektronica-industrie zijn door de grote concurrentie de kwaliteit van het eindproduct en de efficiëntie en het tempo van het ontwerpproces van levensbelang.⁵³ Dit betekent een belangrijke stimulans voor de ontwikkeling van ontwerpomgevingen.

De verschillende ontwerp-hulpmiddelen die het ontwerpproces ondersteunen worden ook wel geïntegreerd in zogenaamde ontwerpomgevingen. Een voorbeeld van zo'n ontwerpomgeving is het mede op de UT ontwikkelde HYCAD Design System.⁵⁴ Dit systeem bestaat uit verschillende modules die achtereenvolgens doorlopen worden bij het ontwerp van een schakeling. Al deze modules staan in verbinding met een zogenaamde Centrale Componenten Data Base (CCDB). De verschillende modules zijn in feite computerprogramma's op zich, die elk een fase van het ontwerp-proces ondersteunen:

- * het opstellen van een eerste schema van een schakeling (Schematic Entry);
- * het selecteren van de te gebruiken componenten (Component Selection);
- * het lay-out ontwerp (Hybrid Component Layout Calculation);
- * de analyse van het ontworpen circuit (PSPICE Circuit Analysis);
- * de uiteindelijke samenvoeging in een behuizing (Packaging, Component Selection, Placement);
- * de analyse voor de gevoeligheid voor temperaturen (Thermal Analysis);
- * het testen van de betrouwbaarheid (IRAS Reliability Prediction);
- * het bedraden van het ontwerp en het genereren van productie-informatie (Routing, Mask Generation).

Zoals uit deze beschrijving van het HYCAD Design System wel duidelijk wordt heeft in de elektrotechniek de introductie van CAD, in tegenstelling tot de werktuigbouwkunde, geleid tot een zekere integratie van ontwerp en productie. In veel gevallen kunnen chips volautomatisch geproduceerd worden, als een integraal onderdeel van het ontwerpproces. Ook zijn met name voor betrouwbaarheidsanalyse een aantal computerhulpmiddelen ontwikkeld en ingebouwd in ontwerpomgevingen.

Een ander verschil tussen CAD in de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek zijn de grotere mogelijkheden in de elektrotechniek om de te ontwerpen producten op verschillende manieren m.b.v. de computer te representeren. In de eerste plaats zijn er in de elektrotechniek CAD-hulpmiddelen voor de beschrijving op verschillende hiërarchische systeem-niveaus, zoals op het niveau van systemen, onderdelen en subonderdelen. Veranderingen op een niveau kunnen automatisch vertaald worden naar andere niveaus.⁵⁵

In de tweede plaats zijn er ontwerp-hulpmiddelen waarmee het te ontwerpen product beschreven kan worden onder verschillende invalshoeken. Daarbij kan gedacht worden aan beschrijvingen in termen van de functies die vervuld worden of in termen van de geometrie van de schakeling. Andere mogelijke invalshoeken zijn het gedrag van de schakeling, de structuur (logische of systeembeschrijving), het elektronisch functioneren, en de testmogelijkheden.⁵⁶ Voor deze beschrijvingen op verschillende niveaus wordt vaak gebruik gemaakt van standaard-elementen uit software-bibliotheken (databases), zoals functiesymbolen voor de functionele beschrijving of component-symbolen voor de geometrische beschrijving. Over het algemeen kunnen de beschrijvingen op verschillende niveaus automatisch in elkaar vertaald worden. Zo kan een ontwerper die een functionele beschrijving opgesteld heeft van het product dat hij wil ontwerpen met behulp van

⁵³ Zie ook Kidder (1982).

⁵⁴ Op de UT wordt hier aan gewerkt bij de vakgroep Besturingssystemen en Computertechniek (BSC) van Elektrotechniek.

⁵⁵ Interviewverslag Peeters.

⁵⁶ Dewilde (1988) en Vlietstra (1989). Zie ook interviewverslag Peeters.

computerprogramma's deze functionele beschrijving vertalen in een geometrisch model. Dit betekent dat een groot deel van het ontwerpproces geautomatiseerd kan worden.

Tot slot moet de ontwikkeling van volautomatische ontwerpsystemen genoemd worden. Volautomatische systemen ontwerpen zelf op basis van door de ontwerper ingevoerde specificaties een chip. Het enige wat de ontwerper moet doen is het vertalen van de gebruikerswensen in specificaties voor de schakeling. Zulk soort systemen worden op beperkte schaal ontwikkeld. Een voorbeeld is Piramid, dat ontwikkeld wordt door Philips en het Interuniversity Micro-electronics Center (IMEC) in Leuven.⁵⁷

CAD in de informatica

De ontwikkeling van software vond tot niet zo heel lang geleden met name ad hoc plaats. Programmeurs ontwikkelden programma's op basis van hun kennis en "trial and error". In de jaren zeventig werden de eerste ontwerphulpmiddelen ontwikkeld voor programmeren. Doordat deze hulpmiddelen, zoals editors, compilers, linkers en debuggers, vooral het programmeren zelf en niet de voorafgaande analysefase - wat moet het gewenste programma doen? - ondersteunden werden weliswaar steeds grotere en complexere programma's mogelijk, maar werd ook de opkomst van meer gestructureerde ontwerpaanpakken, gebaseerd op analyse, ondermijnd; er kon immers snel en makkelijk geprogrammeerd worden. Deze ontwikkeling leidde tot steeds complexere en onoverzichtelijke programma's, die bovendien moeilijk aanpasbaar waren aan nieuwe situaties. De kosten voor onderhoud van programma's stegen hierdoor.⁵⁸

In de jaren tachtig nam de aandacht voor de eerdere fases van het ontwerpproces toe. Daarbij ging het vooral om het ontwikkelen van technieken die gebruikt kunnen worden om de te automatiseren bedrijfsprocessen en informatiestromen te beschrijven. Voor dit doel werden checklists en diagramtechnieken en -conventies ontwikkeld. Doordat de te automatiseren bedrijfsprocessen nu overzichtelijk in kaart konden worden gebracht, was het mogelijk om zowel de programma's goed aan te laten sluiten bij het probleem-domein - ze zijn immers gebaseerd op abstracte beschrijvingen van het probleem-domein - als ook om gestructureerde programmatuur te ontwikkelen. De diagrammen zorgen namelijk voor een functionele opdeling van het probleem-domein waardoor de structuur van de programma's wordt vastgelegd. In de tweede helft van de jaren tachtig kwam hiervoor computerondersteuning beschikbaar, de zogenaamde Computer Aided Software Engineering (CASE)-hulpmiddelen.

Het ontwikkelen van een informatie-systeem kan gezien worden als het transformeren van een informele specificatie (Wat moet het systeem doen?), naar steeds formelere specificaties, resulterend in een specificatie die bestaat uit uitvoerbare programmacode.⁵⁹ CASE-hulpmiddelen ontlenu dus hun bruikbaarheid aan de mate waarin ze bewerkingen kunnen uitvoeren op specificaties. Dat kunnen elementaire bewerkingen zijn (creëren en opslaan, opvragen en afdrukken, wijzigen en verwijderen), bewerkingen gericht op de ondersteuning van samenwerking en coördinatie tussen ontwerpers (afschermen van specificaties, dupliceren en terugdraaien) of intelligente ontwerptaken (controleren van specificaties, signaleren welke taken nog uitgevoerd moeten worden, suggereren, analyseren en genereren van programmacode). CASE-hulpmiddelen kunnen doordat zij een formele beschrijving van het te ontwerpen systeem mogelijk maken bovendien het testen van het systeem vergemakkelijken.⁶⁰ Verder bieden CASE-hulpmiddelen de

⁵⁷ Zie NRC-Handelsblad 19-11-1988. Op de UT wordt ook onderzoek gedaan voor zulk soort systemen (interviewverslag Kerkhoff).

⁵⁸ Meestal wordt voor de onderhoudskosten een percentage van zo'n 70% genoemd van de totale kosten (dat betekent 30% voor nieuwbouw). Kusters en Wijers (1992, 50) komen echter op basis van hun empirische studie op een percentage van krap 50%.

⁵⁹ Kusters & Wijers (1992, 36).

⁶⁰ Zie hoofdstuk 2 en 3.

mogelijkheid gebruikers te betrekken bij de opstelling en bewerking van de specificaties.⁶¹ Om de wensen van de gebruikers duidelijk te krijgen wordt vaak gebruik gemaakt van het zogenaamde "prototyping". Klanten krijgen verschillende prototypes van een mogelijk systeem voorgeschoteld, zodat ze een keuze kunnen maken of hun wensen verder kunnen articuleren.⁶² Overigens maken software-ontwikkelingsorganisaties nog steeds gebruik van een groot aantal methoden en technieken, waarvoor ze geen computerondersteuning in huis hebben.⁶³ Verder blijkt dat CASE-hulpmiddelen over het algemeen tot een ondersteuning en niet tot een verandering, van de bestaande manier van systeemontwikkeling leiden.⁶⁴

In principe echter kunnen CASE-hulpmiddelen in veel gevallen het hele ontwerpproces ondersteunen. Een probleem daarbij is wel dat er niet algemeen inzetbare CASE-hulpmiddelen bestaan.⁶⁵ Ze zijn meestal toegesneden op specifieke omstandigheden of systemen. Bovendien woedt er een bijna religieuze strijd tussen aanhangers van verschillende methoden. Om deze problemen op te lossen worden wel meta-activiteiten ondernomen, gericht op het selecteren van de meest geschikte CASE-hulpmiddelen in een bepaalde ontwerpsituatie. Door de taakgroep Method Engineering van de International Federation for Information Processing (IFIP) wordt de ontwikkeling van meer formele methoden om CASE-hulpmiddelen te selecteren of aan te passen bevorderd. Op de Universiteit Twente wordt in dit verband gewerkt aan meta-CASE, een systeem waarmee een software-ontwikkel-organisatie zijn eigen CASE-hulpmiddelen kan samenstellen. Voor de ontwikkeling van meta-CASE worden bestaande CASE-hulpmiddelen gedemonteerd en in modules opgeslagen.⁶⁶ De bedoeling is een systeem te ontwikkelen waarbij een CASE-hulpmiddel opgebouwd kan worden uit verschillende modules. Op deze manier kunnen verschillende bestaande CASE-hulpmiddelen gecombineerd en aangepast worden. Een mogelijk probleem bij het gebruik van meta-CASE is dat de software-ontwikkel-organisatie in staat moet zijn een goed CASE-hulpmiddel samen te stellen. De grotere flexibiliteit van meta-CASE vergroot de complexiteit van deze taak en daarmee de kans op hogere kosten en falende CASE-hulpmiddelen.

Eén analyse-, ontwerp- en programmeermethode wordt met enige regelmatig genoemd als een oplossing voor de slechte aanpasbaarheid en herbruikbaarheid van programma's. Dit is de zogenaamde object-georiënteerde methode. Object-georiënteerde programmeermethoden stammen al uit de jaren zestig. De laatste 5 jaar staat het object-georiënteerd (o-o) ontwikkelen van software echter pas werkelijk in de belangstelling. Het lijkt erop dat o-o methoden goede mogelijkheden bieden om programma's eenvoudiger te coderen; ook het hergebruik van stukken code wordt erdoor vereenvoudigd. In o-o methoden worden gegevens en bewerkingen op die gegevens als één logische eenheid beschreven, het object. Het object wordt als eenheid in zichzelf beschreven, waarbij de interne structuur voor de buitenwereld verborgen is. Het voordeel hiervan is dat objecten aangepast of hergebruikt kunnen worden zonder dat de omgeving (de rest van het programma) hoeft te veranderen.

O-o analysemethodes zijn gebaseerd op objecten in het toepassingsdomein van het uiteindelijke programma. Deze objecten worden meestal zo algemeen mogelijk beschreven om een zo groot mogelijk toepassingsdomein te hebben voor het uiteindelijke programma. Een voordeel van deze analysemethode is dat de gedefinieerde objecten ook voor de opdrachtgevers (c.q. gebruikers)

⁶¹ Kusters & Wijers (1992, 57-58).

⁶² Interviewverslag Apers. De reden dat gebruik wordt gemaakt van prototypes voor de articulatie van gebruikerswensen is dat het erg moeilijk blijkt te zijn aan de hand van interviews te achterhalen wat de gebruiker wil. Overigens ligt bij "prototyping" vaak de nadruk op de vormgeving van de "user-interface".

⁶³ Uit het onderzoek van Kusters & Wijers (1992, hoofdstuk 4) blijkt dat elke respondent gemiddeld 9,4 technieken gebruikt, waarvan er 5,9 ondersteund worden door CASE-hulpmiddelen.

⁶⁴ Kusters & Wijers (1992, 125).

⁶⁵ Zaal ().

⁶⁶ Een punt hierbij is dat modules op elkaar moeten passen. Als uitgegaan wordt van bestaande CASE-hulpmiddelen is dat vaak een probleem.

herkenbaar zijn, zodat er een betere communicatie tussen opdrachtgever en ontwerper mogelijk is. Met behulp van de gedefinieerde objecten, en een aantal andere concepten, wordt vervolgens een programma ontworpen en code gegenereerd. Aangezien in alle fases van het ontwerpproces in dezelfde objecten een centrale rol vervullen vervagen de grenzen tussen analyse, ontwerp en generen van code. Dit bevordert de communicatie tussen analisten, ontwerpers en programmeurs en maakt een meer iteratief ontwerpproces mogelijk.

Een probleem van o-o methoden is de aansluiting op bestaande meer traditionele methoden. Aangezien bestaande systemen op traditionele methoden gebaseerd zijn en veel ontwerpen gericht is op aanpassing of uitbreiding van bestaande systemen, zijn o-o methoden maar beperkt bruikbaar. Ook de ontwikkeling van CASE-hulpmiddelen voor o-o methoden is nog beperkt. Op de UT wordt hier overigens aan gewerkt. Bij de vakgroep "Software Engineering en Theoretische Informatica" werkt men aan een ICASE (Integrated CASE)-omgeving voor o-o methoden. Deze omgeving moeten alle stappen in het ontwerpproces gaan ondersteunen, zonder een bepaalde stappenvolgorde af te dwingen. Doordat bovendien de verschillende CASE-hulpmiddelen rechtstreeks met elkaar kunnen communiceren heeft de ontwerper een grote mate van flexibiliteit in het gebruik van ontwerphulpmiddelen. De ICASE-omgeving moet ook "omgekeerd ontwerpen" ("reverse engineering") mogelijk maken. Omgekeerd ontwerpen betekent dat op basis van programmacode de achterliggende objecten en hiërarchieën ge(re)construeerd worden. Zo kunnen ook traditionele programma's in object-geïntegreerde vormen gegoten worden. Door het her-ontwerpen van de ge(re)construeerde objecten of hiërarchieën kunnen nieuwe programma's ontwikkeld worden op basis van bestaande programma's of bestaande programma's aangepast worden.

Computerondersteuning van verschillende ontwerpactiviteiten

Ontwerpprocessen in de werktuigbouwkunde, de elektrotechniek en de informatica verlopen niet op dezelfde manier. Ook binnen deze disciplines zijn er grote verschillen in het verloop van ontwerpprocessen. Zo zal bij het ontwerp van innovatieve producten sterker de nadruk liggen op de eerdere fases van het ontwerpproces, zoals probleemdefiniëring, het definiëren van gewenste functionaliteiten, het zoeken van concepten en het genereren van variaties. Bij her-ontwerp daarentegen worden deze eerdere fases vaak overgeslagen en wordt er uitgegaan van een bestaand ontwerp of ontwerp-idee dat aangepast, doorgerekend en getest wordt. In de praktijk is de grens tussen innovatief ontwerpen en her-ontwerpen natuurlijk vloeiend. Dit betekent dat in verschillende omstandigheden verschillende ontwerpactiviteiten in meer of mindere van belang zullen zijn.

Het is niet zo zinvol een algemeen beschrijving te geven van het ontwerpproces in termen van ontwerpstappen die altijd in een bepaalde volgorde doorlopen worden. Het is echter wel mogelijk een aantal ontwerpactiviteiten te noemen die in verschillende ontwerpprocessen in verschillende disciplines een rol kunnen spelen. Deze activiteiten zijn:

- 1) Vertalen van gebruikerseisen in specificaties;
- 2) Specificaties vertalen in functionele eisen voor het ontwerp;
- 3) Splitsen van ontwerpprobleem in deel probleem;
- 4) Functionele eisen vertalen in ontwerp-concepten (conceptueel ontwerp);
- 5) Creëren van variaties;
- 6) Synthese van deeloplossingen, configuratie-ontwerp, lay-out ontwerp;
- 7) Vormgeving van configuratie, "embodiment", detailontwerp;
- 8) Teken en schetsen; diagram- en representatie-technieken;
- 9) Berekening en analyse;
- 10) Simulatie en testen;
- 11) Parametrisch ontwerpen; optimalisatie;
- 12) Integratie met het productieproces.

Met de nummering is uitdrukkelijk **niet** een noodzakelijke stappenvolgorde gempliceerd.

Ook is niet bedoeld dat in een concrete ontwerpsituatie al deze activiteiten ook daadwerkelijk een rol spelen.

In figuur 1 is globaal aangegeven in hoeverre deze activiteiten ondersteund worden door computerhulpmiddelen.⁶⁷

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| WB | | | | | | | | | | | | |
| EL | | | | | | | | | | | | |
| INF | | | | | | | | | | | | |

Afbeelding 2: Computerondersteuning van ontwerpactiviteiten

Wat opvalt is dat de ontwerpactiviteiten die over het algemeen meer in het begin van het ontwerpproces plaats vinden het minst computer-ondersteund worden. Dit beeld is nog duidelijker als we ook de historische ontwikkeling van computerhulpmiddelen in ogenschouw nemen. In de werktuigbouwkunde begon het met een ondersteuning van tekenen en rekenen. In de elektrotechniek met een ondersteuning van tekenen en simuleren. In de informatica met een ondersteuning van het programmeren. Een verklaring zou kunnen zijn dat deze ontwerpactiviteiten minder creativiteit en conceptueel denkwerk vergen waardoor ze makkelijker te formaliseren zijn. Bovendien zijn deze activiteiten alleen in meer innovatieve ontwerpproessen belangrijk.

⁶⁷ Dit plaatje is gebaseerd op de tekst eerder in dit hoofdstuk en op Whitney (1990).

5 ONTWERPOMGEVINGEN IN RELATIE MET ONTWERPPRAKTIJKEN EN VISIES OP ONTWERPEN

De ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen is een activiteit die gedeeltelijk los staat van concrete ontwerppraktijken. Het gebeurt meestal op lokaties die gekoppeld zijn aan concrete ontwerppraktijken, maar waar ontwerpen zelf niet de hoofdactiviteit is. Een voorbeeld zijn de universiteiten en technische hogescholen die eind vorige, begin deze eeuw een belangrijke rol speelden in de ontwikkeling van technische modellen.⁶⁸ In de huidige ontwikkeling van CAD-hulpmiddelen vervullen de universiteiten wederom een belangrijke rol. Andere plaatsen, waar ontwerpomgevingen mede vorm gegeven worden zijn standaardisatie- en normalisatie-instanties, die bijvoorbeeld streven naar éénduidige teken- of representatie-conventies.⁶⁹

Het is duidelijk dat de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen om in de praktijk bruikbaar te zijn gekoppeld moet blijven aan die praktijk. Ontwikkelingen in ontwerppraktijk zijn in belangrijke mate bepalend voor het succes waarmee bepaalde ontwerphulpmiddelen in die praktijk geïmplementeerd kunnen worden. Dit wordt duidelijk als een vergelijking trekken tussen de ontwikkeling van CAD in de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek.

CAD in relatie tot de ontwerppraktijk; elektrotechniek en werktuigbouwkunde

De eerdere fases van het ontwerpproces in de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek lijken op abstract conceptueel niveau in belangrijke mate op elkaar. Bij beide gaat het om het op grond van de gebruikerseisen definieren van een functie voor het te ontwerpen produkt. Bij beide wordt meestal geprobeerd die functie op te delen in subfuncties, waarvoor werkwijzen (componenten) gezocht worden, die vervolgens geïntegreerd moeten worden. Een belangrijk verschil tussen werktuigbouwkunde en de elektrotechniek ligt in de aard van de te ontwerpen produkten. Daarmee samenhangend is de vorm/functie relatie in de werktuigbouwkunde minder éénduidig en zijn werktuigbouwkundige produkten over het algemeen minder makkelijk in verschillende hiërarchische niveaus op te delen. Deze verschillen zijn echter niet alleen uit de aard van de te ontwerpen produkten te begrijpen, maar hangen ook samen met de ontwikkelingen in de verschillende ontwerppraktijken. In de elektrotechniek waren in de conventionele ontwerppraktijk al standaarden ontwikkeld voor functie-representatie en werd er al gebruikt gemaakt van standaard-componenten waaraan tamelijk éénduidig een functie werd gekoppeld. Zoals beschreven in hoofdstuk 2 gaan een aantal ontwerpmethodes in de elektrotechniek uit van een standaard-configuratie met transistoren of bibliotheekcellen. De éénduidigheid tussen vorm en functie is in de elektrotechniek mede geconstrueerd door normalisatie-activiteiten en methodologie-ontwikkeling.

Naar de reden waarom dit in de werktuigbouwkunde minder gebeurt is, afgezien van het feit dat dit ten dele samenhangt met de aard van de te ontwerpen produkten, kan ik alleen gissen. Mogelijk is een verklaring dat in veel conventionele werktuigbouwkundige ontwerppraktijken technische modellen een belangrijke rol speelden en spelen. Het uitgangspunt voor een - nieuw - ontwerp is dan meestal niet een te vervullen functie of een functionele representaties, maar een bestaande geometrische configuratie. Met behulp van het technisch model kan de configuratie op

⁶⁸ Disco et al. (1992). Later werd deze rol overigens overgenomen door technische laboratoria en dergelijke in de industrie.

⁶⁹ Een voorbeeld op het gebied van CAD is de ontwikkeling van een internationale norm voor de uitwisseling van produktgegevens voor ontwerp en fabricage (STEP: Standard for the Exchange of Product model data) door de International Standard Organisation (ISO). De implementatie van STEP wordt in verschillende landen ondersteund door stimulatie- en onderzoekprogramma's. Zie Technews Washington, Ministerie van Economische Zaken, 1991, Jaargang 29, Nr. 2.

verschillende manieren gevarieerd worden. Zodoende lijkt het in de werktuigbouwkunde, door de ontstane ontwerppraktijk, minder noodzakelijk te zijn geweest normen voor functionele representatie en/of de éénduidige vertaling van vormen in functies te ontwikkelen.⁷⁰

Hoe het ook zij, het is duidelijk dat de conventionele ontwerppraktijken in de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek op dit vlak verschilden vóór de ontwikkeling van CAD-hulpmiddelen. Dat is mijns inziens dan ook de belangrijkste verklaring van het feit dat in de elektrotechniek de conceptuele en functionele ontwerppraktijken vrijwel geheel computer-ondersteund of zelfs volledig geautomatiseerd zijn, terwijl ze in de werktuigbouwkunde nog nauwelijks computer-ondersteund worden. Daarmee is niet gezegd dat de ontwikkeling van CAD-hulpmiddelen in de elektrotechniek slechts een ondersteuning van de bestaande praktijk was. De invoering van CAD heeft die praktijk ongetwijfeld verder geformaliseerd en de ontwikkeling van bijvoorbeeld éénduidige vertalingen van functionele representaties naar geometrische representaties is zeker niet zonder grote inspanningen verlopen.⁷¹ Het punt is echter dat deze veranderingen in zekere zin al voorbereid waren in de conventionele praktijk.

Aansluiting bij de ontwerppraktijk

Hoe kunnen ontwikkelaars van ontwerphulpmiddelen aansluiten bij de ontwerppraktijk? Een mogelijkheid is CAD-hulpmiddelen te ontwikkelen op basis van descriptieve studies van het ontwerpproces. Een voorbeeld van descriptieve studies zijn zogenaamde protocol-studies, waarin precies wordt bijgehouden wat ontwerpers doen en denken tijdens het ontwerpproces. De resultaten van enkele van zulke protocol-studies worden door Ullman et al. (1987) gegeven. Zij komen tot de volgende conclusies over het ontwerpproces:

- * ontwerpers volgen een enkel-concept strategie;
- * aantekeningen en tekeningen spelen een cruciale rol in het ontwerpproces;
- * ontwerpers gaan in de loop van het ontwerpproces over van systematische aanpakken naar meer opportunistische aanpakken;
- * ontwerpers ontwerpen op meerdere abstractieniveaus en niveaus van detaillering tegelijk;
- * ontwerpers zijn vergeetachtig. Ze vergeten vaak hun eerdere beslissingen en keuzes.

Op grond hiervan komen Ullman et al. tot de volgende aanbevelingen voor CAD-hulpmiddelen:

"[T]he ... data suggest that future AI-based CAD tools must be highly flexible, allowing the designer the freedom to depart from balanced development or to pursue opportunistic search strategies. In addition future CAD tools have an important role in helping the designer manage the complexity of the design, for example, by keeping an agenda of outstanding problems and tasks, and by providing a smooth conceptual interface that helps him or her grasp the entire state of the design and the interaction among various components" (Ullman et al., 1987, 70)

Deze aanbevelingen leiden tot CAD-hulpmiddelen, die afwijken van CAD-hulpmiddelen gebaseerd op meer prescriptieve modellen van het ontwerpproces. Prescriptieve ontwerpmodellen zijn er op gericht het ontwerpproces systematischer te doen verlopen. Ze delen het ontwerpproces op in een aantal fases die achtereenvolgens doorlopen moeten worden. Verder leggen ze sterk de nadruk op de

⁷⁰ Men zou kunnen stellen dat de complexiteit van ontwerpen in de elektrotechniek en de werktuigbouwkunde op verschillende manieren in de loop van de ontwikkeling van de ontwerppraktijk gereduceerd is. In de elektrotechniek door gebruik te maken van standaard-elementen met min of meer één bepaalde functie. Standaard-elementen die vervolgens op verschillende manieren gecombineerd kunnen worden tot een ontwerp. In de werktuigbouwkunde door de ontwikkeling van technische modellen, die een bepaalde configuratie en werkwijze vast leggen, maar door tevens diverse vormen van variatie mogelijk maken. Om deze hypothese te toetsen zou een nadere bestudering van de historische ontwikkeling van ontwerppraktijken in de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek vereist zijn.

⁷¹ Zie Vlietstra (1988).

analyse van het ontwerpprobleem en het genereren van een variëteit aan ontwerp-oplossingen.⁷² Meestal worden CAD-hulpmiddelen ontwikkeld met zowel descriptieve als prescriptieve modellen in het achterhoofd. Er valt echter wel iets te zeggen over hoe CAD-hulpmiddelen die uitgaan van strikt prescriptieve modellen eruit zouden zien. In dat geval zullen CAD-hulpmiddelen eerder gebaseerd zijn op een lineair ontwerpproces, dat van abstract naar concreet loopt. Bovendien zullen ze gericht zijn op het vergroten van de variëteit aan overwogen ontwerp-oplossingen. Ook zal meer nadruk liggen op het goed analyseren van het probleem in de eerdere fases van het ontwerpproces.

Een belangrijk punt van verschil tussen CAD-hulpmiddelen gebaseerd op descriptieve studies versus CAD op basis van prescriptieve modellen is de gewenste mate van flexibiliteit. Prescriptieve modellen gaan uit van een ideaal ontwerpproces. Als CAD-hulpmiddelen dat ondersteunen is verder flexibiliteit niet zo heel belangrijk. Uit descriptieve studies komen grote verschillen tussen ontwerpprocessen naar voren. In dat geval is het belangrijk dat CAD-hulpmiddelen flexibel inzetbaar en bruikbaar zijn, in die zin die Ullman et al. (1987) aangaven. Men zou kunnen stellen dat vanuit de descriptieve invalshoek gepleit wordt voor CAD-hulpmiddelen, die als het ware een - flexibel inzetbare - gereedschapskist vormen, terwijl vanuit de prescriptieve hoek CAD-hulpmiddelen meer gezien worden als een sturend hulpmiddel dat de ontwerper door het ontwerpproces heen leidt.

Uit de interviews kwam overigens naar voren dat men meer en meer streeft naar CAD-hulpmiddelen die flexibel inzetbaar zijn en die toegesneden kunnen worden op de concrete (bedrijfs)context. Een voorbeeld hiervan is Meta-CASE. Toespitsing op de bedrijfscontext betekent overigens niet altijd ook flexibiliteit voor ontwerpers. Het betekent vaak dat centraal in het bedrijf CAD-hulpmiddelen aangepast kunnen worden aan de bedrijfsomstandigheden en -wensen, resulterend in een bepaalde combinatie van flexibiliteit en rigiditeit voor de ontwerpers.

Flexibiliteit en tekeningen

In de ontwerppraktijk wordt meestal niet alleen flexibel omgesprongen met de volgorde waarin ontwerpactiviteiten worden uitgevoerd, maar ook met de interpretatie van tekeningen, schetsen en prototypes. Vooral in de beginfase van het ontwerpproces bleek de flexibiliteit van tekeningen en schetsen een belangrijk gegeven. Juist door die flexibiliteit waren ze geschikt als denkhulpmiddel en "boundary object". Volgens Henderson zijn met behulp van CAD gemaakte tekeningen minder flexibel te interpreteren en daarom minder geschikt voor deze rollen. In de praktijk lossen ontwerpers de tekortkomingen van CAD-hulpmiddelen volgens haar op door naast computertekeningen gewone tekeningen en schetsen te gebruiken en door verschillende computerhulpmiddelen, met hun specifieke mogelijkheden en tekortkomingen naast elkaar te gebruiken. Hendersons conclusie is dan ook dat CAD-hulpmiddelen te inflexibel zijn, maar dat ontwerpers die tekortkomingen meestal in de praktijk weten op te lossen:

"Computers cannot be brought into design work according to one best method, even within a given company or for a single application. Individuals and teams of designers make computers useful when they find ways to fill the gaping holes left when CAD systems are implemented to replace hand drafting" (Henderson, 1993a).

Henderson hamert op het belang van een beter begrip van het gebruik van tekeningen bij ontwerpen. En waarschuwt dat het verkeerd begrijpen van de rol van tekeningen grote gevolgen kan hebben:

"The destruction of such visually oriented practices may occur because of a fundamental misunderstanding of their crucial role in the social organization of distributed cognition in team design work. When such fundamental misunderstandings are built into inflexible computer graphics designed with the misleading idea of a definable linear process from concept to design to production then the social mechanisms which ordinary repair frequently occurring problems are left out of the process with potentially disastrous results".

⁷² Voor prescriptieve modellen, zie ook Van de Poel, Rip en Van Vught (1993).

(Henderson, 1993a).

De case-studies die Henderson heeft gedaan ondersteunen haar conclusies. Een andere bevestiging van deze conclusie is het feit dat in de werktuigbouwkunde nu gewerkt wordt aan CAD-hulpmiddelen voor incomplete geometrieën, die bepaalde ontwerpbeslissingen vooralsnog in het midden laten. Een van de motivaties achter de ontwikkeling van incomplete geometrieën is de tekortschietende flexibiliteit van eerdere CAD-hulpmiddelen.⁷³

Anderzijds lijken de ontwikkelingen in de elektrotechniek de conclusies van Henderson te logenstraffen. Daar wordt immers nog nauwelijks gebruik gemaakt van handgemaakte tekeningen, zonder dat dit vernietigende effecten lijkt te hebben voor de kwaliteit van de ontworpen producten. Bovendien gaan CAD-hulpmiddelen daarbij meestal uit van een lineair ontwerpproces leidend tot de "beste" oplossing.⁷⁴ Volgens Henderson bestaat zo'n proces niet. Mogelijk kan dit verklaart worden uit de ontwikkeling van de ontwerppraktijk in de elektrotechniek. Tekeningen hebben daarin nooit zo'n belangrijke rol als denkhulpmiddel en "boundary object" gespeeld als in de werktuigbouwkunde. Bovendien hebben CAD-hulpmiddelen in de elektrotechniek een ontwerppraktijk mogelijk gemaakt waarin uit bepaalde specificaties vrijwel automatisch - lineair - een ontwerp gegenereerd kan worden. Zodoende is hun mindere flexibiliteit ook niet zo dramatisch. Het opstellen van de specificaties lijkt door deze ontwikkelingen echter wel belangrijker geworden te zijn in de elektrotechniek.⁷⁵ Zoals een van de geïnterviewden opmerkte vergt dit nu meer creatieve denkkracht en - voeg ik er aan toe - waarschijnlijk ook onderhandelingen en overleg tussen verschillende ontwerpers (en gebruikers). Dat zou betekenen dat een aantal denk- en onderhandelingsactiviteiten, waarvoor de flexibiliteit van tekeningen nu juist zo belangrijk was, in de elektrotechniek verschoven zijn naar de probleemdefiniërende fase van het ontwerpproces.

In de elektrotechniek lijkt dus, mede door het gebruik van CAD, een ontwerppraktijk ontstaan te zijn waarin de flexibiliteit van tekeningen minder van belang is. De ontwikkelingen in de elektrotechniek ontkrachten Hendersons conclusie voorzover ze duidelijk maken dat de ontwerppraktijk mede door de introductie van CAD kan veranderen, zonder dat dit negatieve gevolgen heeft voor de kwaliteit van ontwerpen. Sterker nog, bepaalde elektronische systemen zouden zonder CAD-hulpmiddelen niet ontworpen kunnen worden. De huidige elektrotechnische ontwerppraktijk is daarom vrijwel ondenkbaar zonder CAD. CAD-hulpmiddelen hoeven dus niet volledig bij de bestaande praktijk aansluiten. Wil CAD echter in staat zijn een bestaande praktijk succesvol te hervormen, dan is een *zekere* aansluiting bij die ontwerppraktijk echter noodzakelijk.

Ontwerpomgevingen, ontwerppraktijken en visies op ontwerpen

Het belang van een zekere aansluiting op de ontwerppraktijk bij de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen moge duidelijk zijn, maar streven ontwikkelaars van bijvoorbeeld CAD zo'n aansluiting ook na? Uit de interviews die wij gedaan hebben kwam het beeld naar voren dat ontwikkelaars van ontwerphulpmiddelen zich met name baseren op bepaalde eigen ideeën over en ervaringen in de ontwerppraktijk. Vaak wordt men daarbij genformeerd vanuit het bedrijfsleven. Studies naar en reconstructies van ontwerppraktijken, die op beperkte schaal plaats vinden, lijken bij de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen niet direct gebruikt te worden. Ze hebben hoogstens een indirecte invloed via ideenvorming.

Ontwikkelaars van ontwerphulpmiddelen kunnen zich niet alleen op de bestaande praktijk baseren. De introductie van ontwerphulpmiddelen verandert immers, zoals we zagen, die praktijk.

⁷³ Interviewverslag van Houten.

⁷⁴ Hierbij dient de kanttkening geplaatst te worden dat er zover ik weet nauwelijks beschrijvingen zijn van elektrotechnische ontwerppraktijk. Mogelijk herstellen elektrotechnische ontwerpers de flexibiliteit van tekeningen op net zulke manieren als de ontwerpers in de case-studies van Henderson, dat doen. Mijn indruk is echter vooralsnog dat CAD in de elektrotechniek tot verdwijning van de oude praktijk heeft geleid.

⁷⁵ Vergelijk interviewverslag Kerkhoff.

Daarom is een zekere terugkoppeling vanuit de veranderende praktijk wenselijk. Uit de interviews kwam wat dat betreft naar voren dat ontwikkelaars van ontwerphulpmiddelen, althans op de Universiteit Twente, over het algemeen contacten hebben met gebruikers, die ze bewust gebruiken voor terugkoppeling. Systematisch (sociaal-wetenschappelijk) onderzoek naar het functioneren van ontwerphulpmiddelen in de praktijk vindt echter nauwelijks plaats. Voorzover dit onderzoek van de grond komt is het de vraag of het direct door de ontwikkelaars van ontwerphulpmiddelen gebruikt zal worden.

Voor de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen is niet alleen een bestudering van bestaande en veranderende praktijken van belang, maar ook een beoordeling van de kwaliteit van die praktijken. Zoals Ullman et al. (1987) terecht opmerken als ze de bevindingen van hun protocolstudie hebben opgesomd: "We do not, however, know whether they are examples of good or bad design practice" (Ullman et al., 1987, 62). Zo'n inschatting is belangrijk daar ontwerphulpmiddelen er op gericht zijn het ontwerpproces te verbeteren. De ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen impliceert dus een zekere normatieve inzet. In de interviews werd wat dat betreft in het algemeen gesteld dat je moet aansluiten bij de praktijk, maar er ook iets aan toe moet voegen. Dat iets is in ieder geval de snelheid en efficiëntie van het ontwerpproces. Maar ook andere doelen worden nagestreefd, zoals een verbetering van de kwaliteit van ontwerpen, de creatie van alternatieve oplossingen, het beter aansluiten bij bestaande standaarden. Over deze doelen bestaat niet altijd overeenstemming. Zo vinden sommigen dat ontwerpen vooral goed moeten aansluiten bij bestaande ontwerpen, standaarden en productieprocessen. Terwijl anderen juist streven naar innovatieve ontwerpen. In het eerste geval zijn CAD-hulpmiddelen wenselijk die met name her-ontwerp ondersteunen. In het tweede geval wordt juist geprobeerd de bestaande ontwerpen te doorbreken door meer nadruk te leggen op de conceptuele, creatieve ontwerpfases in het begin van het ontwerpproces. In het tweede geval is het wenselijk creativiteit met de computer te ondersteunen en te bevorderen. In het eerste geval is die ondersteuning van creativiteit niet zo belangrijk. In de praktijk zal de overgang tussen deze twee gevallen echter min of meer vloeiend zijn. De meeste ontwerpprocessen zijn noch strikt her-ontwerp, noch strikt innovatief ontwerpen, maar een combinatie van beide. Een combinatie die mede afhankelijk is van contextuele factoren. Dat pleit voor CAD-hulpmiddelen die flexibel en/of aan de specifieke context aan te passen zijn.

Andere eisen die wel aan CAD-systemen gesteld worden zijn uitbreidbaarheid en een goede communicatie tussen ontwerper en computer. Het uiteindelijke doel van CAD is daarbij eerder het vormen van een zinvolle aanvulling op de menselijke ontwerper, opdat bepaalde ontwerpactiviteiten beter uitgevoerd kunnen worden en de kwaliteit van het ontwerp beter kan worden, dan het overnemen van alle ontwerpactiviteiten.⁷⁶

In principe kan de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen ook gericht zijn op het integreren van maatschappelijke doelen in het ontwerpproces, zoals het betrekken van de gebruikers of het meer rekening houden met milieu-effecten.⁷⁷ De realisering van zulke en andere doelen kan alleen succesvol zijn als aangesloten wordt bij bestaande praktijken en gebruik wordt gemaakt van inzicht in hoe die praktijken kunnen veranderen. Wat dat betreft lijken prescriptieve studies zich vaak te veel te concentreren op hoe het ontwerpproces zou moeten verlopen terwijl descriptieve studies neigen naar het heiligen van de bestaande praktijk. Wat vrijwel lijkt te ontbreken zijn studies naar veranderingen in ontwerppraktijken⁷⁸ en studies naar de kwaliteit van verschillende ontwerppraktijken.

⁷⁶ Vergelijk de Boer (1989,54-56).

⁷⁷ Vergelijk Downey (1993).

⁷⁸ Voorzover deze studies er zijn, zijn het vaak case-studies waarin weinig aandacht is voor de (sociale) mechanismen die spelen bij de verandering van ontwerppraktijken. Zodoende is er weinig algemeen inzicht in de verandering van ontwerppraktijken.

Ontwerpen van ontwerpomgevingen en sociaal wetenschappelijk ontwerpen

Wat leveren al deze inzichten nu op voor de ontwikkeling van ontwerpmethoden en ontwerp hulpmiddelen in de sociale wetenschappen? Duidelijk is dat de ontwikkeling van methoden en hulpmiddelen aan moet sluiten bij de praktijk. De sociaal-wetenschappelijke ontwerp praktijk verschilt in een aantal opzichten wezenlijk van technische ontwerp praktijk. In de eerste plaats de aard van de ontworpen producten. Het gaat niet, zoals in de techniek om materiële producten. De sociale wereld verschilt op, in ieder geval, één heel belangrijk punt van de materiële wereld, namelijk door het feit dat mensen hun handelingen kunnen veranderen en afstemmen. De wet van Newton werkt altijd op een bepaalde manier. Mensen werken mee en tegen. De kenbaarheid en de voorspelbaarheid van de sociale werkelijkheid is daardoor kleiner en is niet los te zien van de betekenissen die mensen, als onderdeel van de sociale wereld, geven aan die wereld. Dat betekent ook dat allerlei ontwerp hulpmiddelen zoals test- en simulatietechnieken en reken- en analysemethoden wel ontwikkeld kunnen worden voor sociaal-wetenschappelijk ontwerpen, maar dat er minder garanties zijn dat ze ook goed zullen werken. Mensen kunnen immers hun gedrag veranderen, zodra ze kennis nemen van een ontwerp, of de achterliggende ideeën en bedoelingen. Moleculen daarentegen veranderen hun gedrag niet, nadat ze door een chemicus geanalyseerd zijn.

In de tweede plaats, en hier mee samenhangend, verschilt de ontwerp praktijk in de sociale wetenschappen van die van de technische wetenschappen. Hoewel er grote verschillen zijn tussen verschillende ontwerp praktijken in de sociale wetenschappen kan gesteld worden dat de in sociaal-wetenschappelijke ontwerp praktijk er minder expliciete ontwerp hulpmiddelen en ontwerpmethoden beschikbaar zijn. Problemen kunnen niet zo makkelijk in stukken opgedeeld worden. Er zijn vaak geen testmethoden voorhanden. Of testen zijn onaanvaardbaar, vanwege mogelijke maatschappelijke gevolgen. Een gevolg hiervan is dat ontwerpers in de sociale wetenschappen relatief minder gezag en onafhankelijkheid hebben ten overstaan van "buitenstaanders" (opdrachtgevers, klanten, gebruikers) dan ontwerpers in de technische wetenschappen. Hiermee is overigens niet gezegd dat er geen goede ontwerp praktijken zijn in de sociale wetenschappen of dat in bestaande ontwerp praktijken geen aanzetten tot verbetering aanwezig zijn.

De les die uit de ontwikkeling van ontwerp hulpmiddelen in de technische wetenschappen getrokken kan worden ligt niet op het niveau van voorbeelden, daarvoor verschillen de aard van de ontwerpen producten en de bestaande ontwerp praktijken te veel. Als er een les getrokken kan worden ligt die meer op het algemene vlak. Namelijk dat voor de ontwikkeling van ontwerpmethodologie en -hulpmiddelen het best uitgegaan zou kunnen worden van een beoordeling van de kwaliteit van bestaande ontwerp praktijken en een inschatting van de mogelijkheid bestaande praktijken te verbeteren. Dat kan bijvoorbeeld middels het expliciet maken van bestaande aanpakken in als kwalitatief goed beoordeelde praktijken. Of bijvoorbeeld door het opsporen van tekortkomingen en mogelijkheden in bestaande praktijken. Overigens is een nadere explicitering van het begrip kwaliteit of "goede ontwerp praktijken" daarvoor wenselijk.

In de inleiding is nog een andere route geschetst waarlangs dit rapport relevant zou kunnen zijn voor de sociale wetenschappen. Gesteld werd dat het ontwerp van ontwerp hulpmiddelen gezien kon worden als een vorm van sociaal-wetenschappelijk ontwerpen omdat er eigenlijk een ontwerp praktijk waarin ontwerpers functioneren ontworpen wordt. Ontwerpers van ontwerp hulpmiddelen lijken zich meestal niet zo bewust te zijn van de sociale dimensie van ontwerp hulpmiddelen. Ze weten wel dat ze aan moeten sluiten bij bestaande ontwerp praktijken en dat bepaalde terugkoppelingen gewenst zijn, maar verwerven geen systematisch inzicht in hoe die bestaande praktijken functioneren. Aan de praktijk van het ontwerpen van ontwerp hulpmiddelen zou daarom mijn inziens nog het een en andere verbeterd kunnen worden. Zoals betoogd is het met name wenselijk meer aandacht te besteden aan de kwaliteit en de dynamiek van veranderende ontwerp praktijken. Dit zijn ten dele sociologische en historische onderzoekthema's. Het zijn dus niet zo zeer de sociale wetenschappers die hier iets kunnen leren van de technische wetenschappers, maar veeleer omgekeerd.

LITERATUUR

- Amerongen, J. van (1992). "Wat is Mechatronica?", Symposium "Mechatronics, pioneering or self-evident?", georganiseerd door ETSV Scintilla.
- Baur, J. (1992). "Does Mechatronica need a special design attitude", Symposium "Mechatronics, pioneering or self-evident?", georganiseerd door E.T.S.V. Scintilla.
- Boer, S.J. de (1989). Decision methods and techniques in Methodical Engineering Design, Proefschrift Universiteit Twente.
- Boer, S.J. de, N.T. van Harpen, & C. Huijs (1988). "Kenmerken van de fasen in het ontwerproces". In: Kals, H.J.J. Handboek CAD/CAM, Uitgeverij Samson, Alphen aan den Rijn.
- Bosman, D. (1978). "Systematic design of instrumentation systems", J. Phys. E. Sci. Instrum., Vol. 11, 1978, 97-105.
- Bosman, D. (1992). "Design of Instrumentation for Information Systems", a special Course for CEDT, India, of the Division Control Systems and Computer Engineering, Faculty of Electrical Engineering, University of Twente, The Netherlands.
- Brussel, H van (1991). "Mechatronica: modekreet of nieuwe discipline", lezing gehouden op het UT Lustrumcongres 1991.
- Bucciarelli, L.L. (1984). "Reflective practice in engineering design", Design Studies, Vol. 5, No. 3, july 1984, 185-190.
- Bucciarelli, L.L. (1985). "Is idiot proof safe enough", The International journal of Applied Philosophy, Vol. 2, No.4, fall 1985, 49-57.
- Bucciarelli, L.L. (1988). "An ethnographic perspective on engineering design", Design Studies, Vol. 9, No. 3, July 1988, 159-168.
- Chern, J-H. (1991). "An intelligent knowledge based approach to support engineering design practice", Computers in Engineering, Proceedings of the 1991 ASME International Computers in Engineering Conference and Exposition, ASME, New York, Vol. 1, 103-110.
- Cross, N. (1989). Engineering Design Methods, Chichester etc., John Wiley & Sons.
- Cross, N. [ed.] (1984). Developments in Design Methodology, Chichester etc., John Wiley & Sons
- Dewilde, P. (1988). "Nelsis of het samen opzetten van CAD hulpmiddelen voor VLSI", Tijdschrift voor het Nederlands Electronica- en Radiogenootschap, 48, 2, 55-64.
- Disco, C. (1990). Made in Delft; professional engineering in the Netherlands, 1880-1940, Proefschrift Universiteit van Amsterdam.
- Disco, Cornelis, Arie Rip & Barend van der Meulen (1992). "Technical Innovation and the Universities: Divisions of Labor in Cosmopolitan Technical Regimes", Social Science Information, 31, 3, 465-507.

- Downey, G.L. (1992). "CAD/CAM saves the Nation? Towards an anthropology of Science and Technology", Knowledge and Society: The Anthropology of Science and Technology, Vol. 9, 1992, 143-168.
- Downey, G.L. (1993). "Steering Technology through Computer-Aided Design", te verschijnen in A. Rip, T. Misa and J. Schot [eds.], Managing Technology in Society: The approach of Constructive Technology Assessment.
- Finger, S. & J.R. Dixon (1989a). "A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part 1: Descriptive, Prescriptive, and Computer-Based Models of Design Processes", Research in Engineering Design, 1989, 1, 51-67.
- Finger, S. & J.R. Dixon (1989b). "A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part 2: Representations, Analysis, and Design for the Life Cycle", Research in Engineering Design, 1989, 1, 121-137.
- Goel, Vinod & Peter Pirolli (1989). "Motivating the Notion of Generic Design Within Information Processing Theory: The Design Problem Space", AI Magazine, 10, 19-36. Herdrukt in Peter Pirolli, "Knowledge and Processes in Design", University of California at Berkeley, DPS Final Report, september 1992.
- Goel, Vinod (1992). "The cognitive Role of Sketching in Problem Solving" in Peter Pirolli, "Knowledge and Processes in Design", University of California at Berkeley, DPS Final Report, September 1992.
- Goor, Geert van den en Sjaak Brinkkemper (1992). "O-O-Ontwikkelmethoden klaar voor praktijktest", Computable, 20 november 1992, 26-27.
- Henderson, Kathryn (1991). "Flexible Sketches and inflexible Data Bases: Visual Communication, Conscriptio Devices, and Boundary Objects in Design Engineering", Science, Technology, & Human Values, Vol. 16 No. 4, Autumn 1991, 448-473.
- Henderson, Kathryn (1993a). "On line and on paper: mixed practices in the visual culture on design engineering", paper presented at the Paris Workshop.
- Henderson, Kathryn (1993b). "The Political Career of a Prototype: How Visual Representations socially Organize Work, Workers, Their Collective Thought and Their Collective Product", paper Texas A&M University.
- Houten, F.J.A.M. (1991). Part: A Computer Aided Process Planning System, Proefschrift, Universiteit Twente.
- Kidder, Tracy (1982). De ziel van de nieuwe machine, Veen, Utrecht/Antwerpen. Vertaald uit het engels. Oorspronkelijke titel: The soul of a new machine, 1981.
- Konda, Suresh, Ira Monarch, Philip Sarchant and Eswaran (1992). "Shared Memory in Design: A Unifying Theme for Research and Practice", Research in Engineering Design, 1992, 4, 23-42.
- Kroonenberg, H.H. van den (1984). "Ontwerp en constructie leer 1; het ontwerpen van technische inrichtingen", Dictaat Werktuigbouwkunde, Universiteit Twente.

- Kusters, R.J. en G.M. Wijers (1992). Het gebruik van CASE-tools in Nederland: Resultaten van een Onderzoek, Kluwer, Deventer.
- Meulen, Barend van der (1992). Beoordelingsprocessen in Wetenschap (Evaluation processes in science). Proefschrift Universiteit Twente.
- Monarch, I.A., S.L. Konda, S.N. Levy Yoram Reich, E. (1993). "Shared Memory in Design", paper presented at the Paris Workshop.
- Poel, van de Ibo, Arie Rip en Frans van Vught (1993). "Ontwerpen in de Technische Wetenschappen; Studies, Ervaringen, Methodologie", Haalbaarheidsstudie "Een sociaal-wetenschappelijke ontwerpmethodologie, Universiteit Twente.
- Raayen, Wim (1993). "Creativiteit kun je automatiseren", Polytechnisch Weekblad, 8 januari 1993.
- Rault, A. (1992). "Mechatronics and bond graphs in the automotive industry", Symposium "Mechatronics, pioneering or self-evident", georganiseerd door E.T.S.V. Scintilla.
- Rickards, T. (1980), "Designing for creativity: a state of the art review", Design Studies, Vol. 1, No. 5, july 1980, 262-272.
- Riksen, J. (1991). "Constructie leer, syllabus technische ontwerpleer. Dictaat Faculteit der Werktuigbouwkunde", Universiteit Twente.
- Roozenburg, N. and N. Cross (1991), "Models of the Design Process, Integrating Across the Disciplines", International Conference on Engineering Design (ICED-91), Zurich, 186-193.
- Schön, Donald A. (1983). The Reflective Practitioner; How Professionals Think in Action, New York, Basic Books.
- Schön, Donald A. (1992). "Designing as Reflective Conversation with the Materials of a Design Situation", Research in Engineering Design, 1992, 3, 131-147.
- Shah, J. J. (1990). "The design of design environments", Computers in Engineering, ASME, New York, Vol 1., 281-288.
- Simon, Herbert A. (1973). "The Structure of ill-structured problems", Artificial Intelligence, 1973, 4, 181-201.
- Stauffer, L.A., D.G. Ullman and T.G. Dietterich (1987). "Protocol analysis of mechanical engineering design", in: Eder, W.E. [ed.], Proceedings of the 1987 International Conference on engineering design, ICED 87, Boston, Vol. 1, 74-85.
- Ullman, David G., Larry A. Stauffer and Thomas G. Dietterich (1987). "Toward Expert CAD". Computers in Mechanical Engineering, november/december 1987, 56-70.
- Ullman, David G. (1992). The mechanical design process, McGraww-Hill, Inc., New York etc.
- Vincenti, Walter G. (1990). What Engineers Know and How They Know It; Analytical Studies from Aeronautical History, Baltimore and London, The John Hopkins University Press.

Vincenti, Walter G. (1991). "The scope for social impact in engineering outcomes: a diagrammatic aid to analysis", Social Studies of Science, Vol. 21 (1991), 761-767.

Vlietstra, J. (1988). "CAD/CAM in een elektronische industrie", in: Kals, H.J.J. Handboek CAD/CAM, Samson Uitgeverij, Alphen aan den Rijn.

Whitney, Daniel E. (1990). "Designing the Design Process", Research in Engineering Design, 1990, 2, 3-13.

Zaal, Rolf (19??). "Elk project z'n eigen ontwikkelmethodiek", Informatiemanagement, nr. ?, 19??, 26-29.

Interviewverslagen en diverse (reclame)folders over vakgroepactiviteiten en ontwerphulpmiddelen.

BIJLAGE: INTERVIEWVRAGEN

A) *Opkomst van (het ontwerpen van) ontwerpomgevingen in het vakgebied*

1. Wat zijn de belangrijkste ontwerphulpmiddelen op uw vakgebied?
2. Wanneer zijn deze ontwerphulpmiddelen ontwikkeld?
 - Door wie zijn ze ontwikkeld?
 - Waar werden ze voor het eerst toegepast en voor wat voor toepassingen?
 - Wat was de motivatie/reden om deze ontwerphulpmiddelen toe te gaan passen?
 - In welke beroepspraktijken worden deze ontwerphulpmiddelen nu toegepast?
 - Hoe wijd verbreid zijn deze ontwerphulpmiddelen momenteel?
3. Is het nu zo dat U zelf ook werkt aan de ontwikkeling van ontwerphulpmiddelen of past U meer toe wat anderen ontwikkelen?
4. Speelt het ontwerpen van ontwerpomgevingen ook een rol in het onderwijs?

B) *Aard van de ontwerpomgeving*

5. Is het ontwerpen van ontwerpomgevingen gebaseerd op een formalisering van bestaande ontwerppraktijken of wordt er meer uitgegaan van een gewenste volgorde van ontwerpstappen?
6. Wordt er bij het ontwerpen van ontwerpomgevingen rekening gehouden met het heterogene karakter van ontwerpen? Zo ja hoe?
7. Wat zijn de huidige problemen en uitdagingen in het ontwikkelen van ontwerphulpmiddelen? Wat voor ontwikkelingen voorziet u voor de toekomst?

C) *Functioneren van de ontwerpomgeving*

8. Op welke manier hebben ontwerphulpmiddelen invloed op de ontwerppraktijk?
 - invloed van ontwerpomgevingen op het ontwerpproces zelf (veranderende ontwerpstappen etc.)
 - invloed op de (informele) communicatie en afstemming tussen verschillende ontwerpgroepen in het ontwerpproces
 - invloed op de formele organisatie van het ontwerpen
 - invloed op vereiste kwalificaties van ontwerpers (moeten ze bepaalde trainingen volgen etc.)
9. Doet U vakgroep ook zelf onderzoek aan het functioneren van ontwerpomgevingen in de praktijk? en/of verzamelt U informatie van anderen?
10. Is het functioneren van ontwerpomgevingen in de praktijk voor uw vakgroep een input voor het bijstellen van ontwerpen van ontwerpomgevingen of het ontwikkelen van nieuwe ontwerpen van ontwerpomgevingen?
11. Doet u verder nog iets in diverse ontwerppraktijken, bijvoorbeeld bij een software bedrijf, geven

van advies etc.

D) Verdere literatuur/personen

12. Heeft U verder nog suggesties voor interessante literatuur en personen die wij zouden kunnen interviewen?
13. Heeft U verdere op- of aanmerkingen?

BIJLAGE: GEÏNTERVIEWDE PERSONEN

A Over ontwerphulpmiddelen

dr. ir. M. Aksit, faculteit Informatica, vakgroep Software Engineering & Theoretische Informatica (SETI)

dr. J.N. Brinkkemper, faculteit Informatica, vakgroep Informatiesystemen, groep Ontwerpmethodologie.

dr. ir. F.J.A.M. van Houten, faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep Productie en Ontwerptechniek.

dr. ir. H.G. Kerkhoff, faculteit Electrotechniek, vakgroep I.C. technologie en elektronica

ir. W.F.J. Peeters, faculteit Electrotechniek, vakgroep Besturingssystemen en computertechniek, laboratorium voor regeltechniek

ir. S.H. Visser, faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering

B Over ontwerpen in de technische wetenschappen

prof. dr. P.M.G. Apers, faculteit Informatica, vakgroep Informatiesystemen

prof. dr. ir. J. van Amerongen, faculteit Electrotechniek, vakgroep Besturingssystemen en Computertechniek.

prof. dr. D. Bosman, faculteit Electrotechniek, vakgroep Besturingssystemen en Computertechniek.

prof. dr. ir. H.H. van den Kroonenberg, faculteit Technische Bedrijfskunde, vakgroep Technologie en Organisatie.

ing. J.P.H. Rixen, faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering