

## Konstrueren, een kwestie van kiezen

**Citation for published version (APA):**

Koster, M. P. (1986). Konstrueren, een kwestie van kiezen. *De constructeur*, 25(7), 24-28.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1986

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Konstrueren, een kwestie van kiezen\*)

De omschrijving van de taak die ik aan deze Technische Hogeschool op mij heb genomen luidt: het werkzaam zijn in het vakgebied van het werktuigkundig ontwerpen, daarbij gelet op het dynamisch gedrag en de positioneringsnauwkeurigheid. Deze omschrijving vraagt wel om enige nadere precisering die ik hierna wil geven. Daartoe wil ik u meenemen naar het konstruktiebureau van een industriële onderneming en u iets laten zien van het werk dat daar wordt verricht. Vooral wil ik laten zien, dat construeren in hoge mate een keuzeproces is. Zo u mocht denken dat het ontwerpen van machines of apparaten bestaat uit een aaneenschakeling van louter streng wetenschappelijke redeneringen, resulterend in werktuigen die volstrekt beantwoorden aan de doelstellingen die de technici bij de aanvang voor ogen stonden, dan moet ik u teleurstellen. Konstrueren immers, is geen analyse; het is synthese; het moeizaam bijeenrapen van mogelijkheden, die tot de oplossing van het gestelde probleem zouden kunnen leiden, gevolgd door een keuze daaruit, zodat het doel zo dicht mogelijk wordt benaderd. Hulpmiddelen bij deze keuze zullen ongetwijfeld zijn ontleend aan de strenge analyse; de wiskunde, de mechanica, de dynamica, de regeltechniek.

Bij onze gang door het konstruktiebureau zullen wij op diverse plaatsen stilstaan en ons verdiepen in de verschillende werkzaamheden. In de momentopnamen die wij maken, zien wij de medewerkers bezig in verschillende fasen van het ontwerpproces: het maken van een ontwerp, het uitvoeren van berekeningen, al dan niet met een computer, het klaarmaken van de werktekeningen, het voeren van besprekingen met de opdrachtgever, enzovoort. Willen wij deze werkzaamheden nader beschouwen, dan is het nodig de verschillende fasen van het ontwerpproces wat nader aan te duiden [1].

Achtereenvolgens zijn dat:

1. De project-definiërende fase; het uiteenrafelen van de totale functie in deelfuncties
2. de keuze van de fysische effecten die de verlangde deelfuncties zullen vervullen
3. de keuze van de uitvoeringsvorm
4. de evaluatie
5. het uitwerken van de tekeningen en de bijbehorende documentatie.

Wij zullen de verschillende fasen iets nauwkeuriger bekijken, wetend dat konstrueren in sterke mate een iteratief proces is, met andere woorden, dat elk van de fasen meer keren wordt doorlopen en dat uit elk der fasen wordt teruggesprongen naar één der eerdere fasen.

Niettemin kan de zojuist voorgestelde indeling een middel zijn om de verschillende werkzaamheden te typeren, het ontwerpproces te beschrijven en wellicht enige mogelijkheden te ontdekken om dit keuzeproces te voorzien van de nodige ondersteuning.

\*) Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van buitengewoon hoogleraar in het werktuigkundig konstrueren aan de afdeling der Werktuigbouwkunde van de Technische Hogeschool Eindhoven op 23 mei 1986.

De vraag, op welke wijze het konstrueren kan worden ondersteund door toelevering van hulpmiddelen, in elk der fasen van het ontwerpproces, wil ik beschouwen als mijn primaire verantwoordelijkheid aan deze TH en tevens als de kernvraag voor hedenmiddag.

Een belangrijk aspect daarvan is het onderzoek naar het dynamisch gedrag van de ontworpen machine. Immers, het resultaat van zo'n onderzoek is het inzicht in de mate waarin het gedrag van de machine bij zijn bedrijfssnelheid afwijkt van het quasi-statische gedrag dat men bij zeer lage snelheid ziet. Een ander aspect is, op welke wijze en in welke mate computers ons bij het konstrueren van dienst kunnen zijn. Tenslotte wil ik enige conclusies trekken betreffende het technische onderwijs in het algemeen en in het bijzonder betreffende de taakhoud van ons allen in de groep Konstrukties en Mechanismen.

## De project-definiërende fase

Het eerste stadium in een ontwikkelproject is de project-definiërende fase. Er dient zich een opdrachtgever aan: een fabrikant, als het gaat om een produktiemiddel; een commerciële afdeling, indien het gaat om een produkt. Hij verstrekt de budgettaire middelen en hij zal duidelijk moeten maken wat hij daarvoor terugverlangt. De omschrijving daarvan heet de uitgangsspecificatie. Deze uitgangsspecificatie zal vaak uitdagend, doch eveneens tamelijk globaal van karakter zijn zoals: de prestaties moeten die van de vorige generatie machines of die van de concurrent met een factor  $x$  overtreffen; de kostprijs moet lager zijn of het prototype moet klaar zijn in een tijd, korter dan tot nu toe voor een project van deze omvang werd gepresteerd. Echter, een omschrijving van dit soort is niet voldoende om aan het project te beginnen. Het rammelen met de geldbuidel geeft de opdrachtgever niet het recht vaag te blijven over de doelstelling. Er is daarom intensief overleg nodig tussen de opdrachtgever en de konstrakteur om een nader uitgewerkte specificatie op tafel te krijgen. De uitgangsspecificatie zal tenslotte tal van aspecten van technische aard bevatten, zoals de te realiseren functies, de daarbij benodigde plaatsnauwkeurigheid en het machine-tempo, alsmede punten van niet strikt technische aard zoals ergonomie, veiligheid, vormgeving, kostprijs en leveringstijd.

In dit stadium is het zeer nuttig om de moeilijkheidsgraad van een project in te schatten. Kan het worden gerealiseerd binnen de gestelde tijd, tegen de beschikbare budgettaire middelen? Het zou buitengewoon waardevol zijn als de konstrakteur in staat zou zijn, al was het maar met behulp van een aantal summere regels, inzicht te krijgen in de haalbaarheid van het project, om op deze wijze zichzelf te beschermen tegen overschatting. Zo'n regel kan bij voorbeeld de benodigde stijfheid van een mechanisme aangeven als de slag en de nauwkeurigheid waarmee de beweging moet verlopen, gegeven is, alsmede de te verplaatsen massa en de beschikbare tijd. Het is dan inderdaad mogelijk, reeds in dit stadium ten aanzien van een zeer belangrijk aspect, namelijk het dynamisch gedrag, inzicht te verkrijgen in de haalbaarheid van de vraagstelling.

Voor dit soort voorspelling voldoet een zeer beknopt soort modelvorming, een onderwerp waarop ik nog terugkom. Berekeningen hebben het karakter van schattingen; niettemin ontstaat er inzicht in de verlangde orde van grootte.

Komt deze neer op een stijfheid van  $10^8$  N/m, dat is 100 N per micrometer, dan gaat het dus over een constructie die door flink duwen met de duim wordt verplaatst over een afstand van 1 micrometer. De constructeur weet dan dat hij te maken heeft met het probleem, een stijfheid te moeten realiseren die hij slechts met veel moeite zal kunnen bereiken.

Zo kan in samenspraak met de opdrachtgever een evenwichtige specificatie tot stand komen. Er kan worden voorkomen dat een ontwerp overwegend bepaald wordt door één punt uit de specificatie. Een meer uitgebalanceerde specificatie kan een positief effect hebben op de algemene prestatie en de kostprijs. Het overeenkomen van een dergelijke uitgangsspecificatie, gevolgd door het realiseren van hetgeen is afgesproken tussen de opdrachtgever en de constructeur, wordt ervaren als vakmanschap. Het overvragen door de opdrachtgever, in de hoop daardoor ongeveer op de bedoelde prestaties uit te komen, wordt hiermee overbodig. Heeft men zich eenmaal een dergelijke werkwijze eigengemaakt of, anders gezegd, heeft men de moed opgebouwd om een constructieve opgave in een vroeg stadium te analyseren op zijn haalbaarheid, dan zal men veel nuttige bijdragen aan de discussie kunnen leveren, tot in de directiekamer toe.

### De keuze van het fysische effect

Nu kom ik toe aan de tweede fase van het ontwerpproces waarin het gaat om de keuze van de fysische effecten, die de verlangde (deel)-functies zullen vervullen. Men kan een hydraulische dan wel een mechanische aandrijving toepassen bij een pers; men kan hydraulische dan wel elektromechanische actuatoren toepassen in een programmeerbare manipulator; men wil langs een bepaald punt getransporteerde voorwerpen tellen en dat doen langs mechanische, pneumatische, optische, capacatieve of inductieve weg. De constructeur zal moeten kiezen! Die keuze zal in de eerste plaats afhangen van wat men aan keuzemogelijkheden heeft, dus van de kennis en de ervaring, die de onderneming in huis heeft. Het opbouwen en onderhouden van kennis kost geld, vaak zelfs veel geld. Daarom is de keus altijd enigszins beperkt. Het is echter wel noodzakelijk de beschikbare kennis van mogelijke alternatieven bij de overwegingen te betrekken, ook al ligt die kennis buiten het vakgebied van de constructeur. Hij dient dan specialisten te raadplegen op de gebieden waar hij mogelijkheden vermoedt. Hier doet zich echter een fundamentele moeilijkheid voor, namelijk hoe zal de constructeur er toe komen een expert te raadplegen in een gebied waar hij geen alternatieven verwacht, of wat hem volslagen onbekend is. Onvermoede mogelijkheden blijven dan liggen! Altijd had het anders gekund! Een breed contactenpatroon is hier bijzonder waardevol; het enige dat daarvan kan worden gezegd is: dat groeit met de jaren en bij de één sneller dan bij de ander! Overigens zal het duidelijk zijn dat een brede algemene technische ontwikkeling van de ontwerper van groot belang is. In de basisopleiding van de werktuigbouwer dient dan ook de nodige praktische kennis van vakken als natuurkunde, elektronica en informatica te zijn verworven om te kunnen blijven volgen hetgeen er op de raakvlakken met het eigen vak gebeurt en zo met beoefenaren van andere disciplines te kunnen blijven communiceren. Deze vorming, tezamen met die in het eigen vak, moet plaatsvinden in een studieprogramma van vier jaar, in mijn ogen een voor studenten en docenten niet te realiseren opgave, zonder de kwaliteit aan te tasten.

### De keuze van de uitvoeringsvorm

Nu we de definitiefase en de fase van de keuze van de fysische

effecten hebben doorlopen, komen wij toe aan het kiezen van de uitvoeringsvorm. In deze fase gaat het erom constructieve oplossingen te vinden waarbinnen de fysische effecten tot hun recht komen. Veelal zijn de te realiseren functies plaatsgebonden, zoals het bewerken van warm glas of het vormen van metalen onderdelen. Hoge positioneringsnauwkeurigheid is vaak nodig. Denk bij voorbeeld aan lithografische apparatuur voor het produceren van geïntegreerde schakelingen of aan de opto-elektronica waar plaatsfouten kleiner zijn dan 1 micrometer en hoekfouten kleiner dan 10 tot de macht  $-5$  radialen een rol spelen. In mechanismen concentreert het constructievraagstuk zich op de eigenschappen: licht, stijf en spelingsvrij, in precisie-constructies gaat het om een eenduidige plaatsbepaling: statisch bepaald, wrijvingsarm, stijf en spelingsvrij. Eén van de grootste moeilijkheden bij het zoeken naar constructieve oplossingen is het zich losmaken van geijkte denkpatronen. Wil men tot constructies komen die voldoen aan hoge eisen betreffende hun dynamisch gedrag of hun positioneringsnauwkeurigheid, zonder daarbij te vervallen in exotische bewerkingstechnieken of gecompliceerde afstelprocedures, dan is dit beslist noodzakelijk. Ik wil dit met een voorbeeld illustreren.

Rechtlijnige bewegingen kunnen vaak vervangen worden door bijna rechtlijnige bewegingen; een relatief ver weg gelegen draaipunt of een uit de kinematica bekend quasi-rechtgeleidingsmechanisme. Zijn de doorlopen hoeken klein, dan kunnen draaipunten als elastische scharnieren worden uitgevoerd. Van een oorspronkelijk ontwerp voor een hydrostatisch gelagerde rechtgeleiding, een voor de hand liggende oplossing, zagen wij de kostprijs met een factor 10 dalen toen wij overgingen op zo'n quasi-rechtgeleiding, gecombineerd met elastische scharnieren als draaipunten. Deze oplossing voldoet op voortreffelijke wijze aan de eis van de rechtheid van de baan, binnen het verlangde traject en aan de stijfheidseis tegen verkanting.

Zoals ik reeds zei, het gaat erom zich los te maken uit de geijkte denkpatronen, het doorbreken van blokkades in het denken. Een eerste vereiste hierbij is om de specificatie scherp te analyseren. Welke coördinaten van een te positioneren voorwerp dienen nauwkeurig te worden vastgelegd, welke doen er weinig toe. Vervolgens moet worden gezocht naar de middelen om dat constructief te verwezenlijken. Vele pogingen zijn gedaan om tot het verzamelen van goede constructieve oplossingen te komen. In menig constructiebureau circuleren de aldaar 'verzamelde werken'. Velen van u zullen in dit verband ook denken aan het befaamde werk 'Ingenious Mechanisms' [2].

Om het kiezen van goede constructies te bevorderen en vooral om een algemeen bruikbare denkstijl aan te kweken bij het zoeken naar constructieve oplossingen, is aan de THE door Van der Hoek een verzameling van constructieprincipes aangelegd. In meer dan 150 voorbeelden wordt in 'Des Duivels Prentenboek' [3] aangegeven hoe men licht, stijf, spelingsvrij en hysteresis-arm kan construeren. De toepassingen zijn velerlei: van constructies in de offshore tot micro-manipulators. De denkstijl is algemeen, zoals het gebruik van elastische elementen, stijve of juist slappe constructiedelen in dunne plaat. Een verzameling constructieprincipes, met als doel deze als naslagwerk te hanteren, heeft in het algemeen het probleem van de toegankelijkheid. Wil men namelijk de specifieke eigenschappen van een voorbeeldconstructie tot zijn recht laten komen, dan is dat vaak slechts mogelijk in combinatie met één of meer andere voorbeeldconstructies, hetgeen leidt tot een gigantisch rubriceringsprobleem voor de samensteller.

Voor deze fase van het ontwerpproces wil ik het hierbij laten en nu overgaan naar de vierde fase.

### De evaluatie

Inmiddels begint het ontwerp gestalte te krijgen. Het gekozen

## Konstrueren, een kwestie van kiezen\*)

fysische principe en enkele kansrijke konstruktieve oplossingen zijn overgebleven. De ruimtelijke ordening wordt zichtbaar, hoofdmaten zijn aangegeven. Het keuzeproces concentreert zich nu vooral op de onderdelen; de dimensionering. Stelden we in de vorige fase nog voor, licht en stijf te konstrueren, nu is de vraag: hoe licht en hoe stijf, om aan de uitgangsspecificatie te voldoen? We moeten nu numeriek bezig zijn. De analytische aanpak zal de hoofdrol spelen. Dan blijkt onder andere hoezeer velen van ons méér opgevoed zijn met de vraag: 'Is mijn constructie wel sterk genoeg?', dan met de vraag: 'Is hij wel stijf genoeg?'

Willen we met de ons ten dienste staande hulpvakken (mechanica, dynamica, regeltechniek, tribotechniek) de constructie in statu nascendi zo dimensioneren, dat deze aan de gestelde eisen zal voldoen, dan moet er een verband worden gelegd tussen die constructie en de theorie. Het leggen van dit verband heet modelvorming. Het model is een mathematische beschrijving van de fysische werkelijkheid, op basis waarvan door hantering van de theorie voorspellende berekeningen kunnen worden uitgevoerd. Hoe nauwkeuriger het model de toekomstige werkelijkheid beschrijft, hoe groter de voorspellende waarde is, mits de wiskundige gereedschappen de berekeningen aan het model toelaten.

Een bekend modelvormingsgereedschap is de eindige-elementen-methode. Een zeer fijnzinnige modellering van de constructie is hiermee mogelijk. Echter, het invoeren van alle details en het omgaan met de computerprogramma's is nog steeds specialistenwerk. Met dergelijke modellen kan zeer nauwkeurig worden gerekend, doch het resultaat kan niet nauwkeuriger zijn dan de numerieke waarden van de ingangsgrootheden, waarvan er helaas in vele gevallen – de machine moet immers nog worden gebouwd – een aantal moeten worden geschat, zoals speling of wrijving.

Voor een snelle evaluatie van constructies en mechanismen, liefst uit te voeren door een niet-specialist, is deze methode vooralsnog niet zo geschikt. Wil men een modelvormingsmethode aanbieden, dan dient men terdege te beseffen dat voor de praktische bruikbaarheid op een constructiebureau aan de hanteerbaarheid hoge eisen worden gesteld. Een methode heeft meer kans van slagen, naarmate hij eenvoudiger is en toch voldoende voorspellende kracht heeft. Ik zou de eisen van een modelvormingsmethode voor dit doel dan ook willen kwalificeren als: zo eenvoudig mogelijk en nog juist goed genoeg.

Uitgaande van energiebeschouwingen, zoals die aan de eindige-elementen-methode ten grondslag liggen, maar met zorgvuldig ingevoerde vereenvoudigingen en met duidelijk aangegeven de daardoor ontstane beperkingen in het toepassingsgebied, blijkt het mogelijk methoden op te bouwen welke inderdaad ingang vinden in het constructiebureau. Met relatief weinig inspanning en betrekkelijk geringe specialistische kennis kan men het dynamisch gedrag en de positioneringsnauwkeurigheid van een mechanisme of een constructie in wording voorspellen. Dit geldt zeker als de computer, ook al is het slechts een bescheiden personal computer, de gebruiker begeleidt. Als blijkt dat de constructie niet voldoet,

kan de constructeur in één oogopslag zien welk onderdeel de hoofdschuldige is en kan hij onmiddellijk een wijziging in het ontwerp doorvoeren, gevolgd door een nieuwe berekening. Mij dunkt, een fraai voorbeeld van computer aided design.

Door bovendien het gedrag te karakteriseren in een paar belangrijke criteria en die weer te geven als functies van de eigenschappen van het mechanisme, uitgedrukt in de vorm van dimensieloze karakteristieken, kan de constructeur snel nagaan welke de numerieke grootte is van de wijziging die hij moet doorvoeren. Als bij voorbeeld een buigende- of torderende as onvoldoende stijfheid vertoont, kan hij direct vaststellen dat hij de plaatsnauwkeurigheid een factor 10 kan verbeteren door de as 40% dikker te kiezen!

Het is gebleken, dat het gebruik van deze dimensieloze karakteristieken, gecombineerd met de constructieprincipes die ik in de vorige fase noemde, leidt tot het doen van keuzes die in de evaluatiefase nog nauwelijks behoeven te worden bijgesteld. Er is inzicht ontstaan in orden van grootte van in constructies haalbare waarden. Zelfs in de eerste fase, die van de probleemdefinitie, kan men op basis van een zeer beknopte modellering en gewapend met de dimensieloze karakteristieken reeds inzicht krijgen in de moeilijkheidsgraad van een project.

Ik meen dat het hanteren van modellen met een graad van complexiteit, aangepast aan de respectievelijke fasen van het ontwerpproces en uiteraard met de daaraan gekoppelde beperkingen in de voorspellende waarde een wezenlijke ondersteuning betekent bij het maken van de keuzes.

### Het uitwerken van de tekeningen

Nu alle keuzes definitief zijn en het ontwerp compleet is, rest nog de fase van het detailleren. Dit is het maken van de tekeningen met daarop alle informatie nodig voor de werkplaats of de fabriek om het verlangde werk te kunnen maken. Een zorgvuldig en nauwkeurig werk, dat in nauw overleg met de toekomstige maker moet geschieden.

Het is vooral in deze fase van het konstrueren dat zich momenteel grote veranderingen voltrekken, die het beeld van het constructiebureau binnen een aantal jaren totaal zullen hebben veranderd. Tekenborden, potlood en inkt zullen dan hebben plaatsgemaakt voor beeldschermen, gekoppeld aan een computer; CAD, ofwel computer aided design, in het nederlands: door de computer ondersteund ontwerpen, zal dan zijn ingevoerd.

### CAD

Daarom wil ik op de ontwikkelingen van CAD verder ingaan en in het bijzonder nagaan welke invloed de computer kan hebben in elk van de fasen van het ontwerpproces.

Grote vorderingen zijn er gemaakt met het grafisch gebruik van het beeldscherm. De mogelijkheden zijn werkelijk indrukwekkend. Zo kan men complete, zo men wil 3-dimensionele tekeningen maken, de voorwerpen van verschillende kanten bekijken, veranderingen aanbrengen, gebruikmaken van in databases opgeslagen tekeningen van norm-artikelen en standaard-onderdelen, archiveren en niet te vergeten, het toevoegen van reeds eerder opgeslagen fabricage-gegevens. Verwacht mag worden dat CAD een grote efficiency-verbetering zal brengen in de fase van het detailleren en in de aansluiting op het daarna volgende maaktraject.

Maar, hoe is dat met de hieraan voorafgaande fasen? Laten wij eens kijken naar de fase van de evaluatie, daar waar het gaat om het maken van berekeningen. Brochures van programmatuur-leveranciers doen ons geloven dat programmatuur, gebaseerd op de eindige-elementen-methode het modelvormingsgereedschap van de toekomst is. Begrijpelijk; het is hun belang te

ontwikkelen voor een zo breed mogelijke markt. Na mijn uiteenzetting over modelvorming zal het u duidelijk zijn, dat we met de eindige-elementen-methode er naar mijn mening nog niet zijn. Het zal daarom nuttig zijn, probleem-georiënteerde programmatuur te ontwikkelen, gericht op bepaalde toepassingsgebieden, waarbij die programmatuur de taal van de constructeur spreekt. Zulke programmatuur zal in het algemeen niet te koop zijn. Grote bedrijven zullen in vele gevallen dit type programmatuur voor eigen gebruik ontwikkelen en deze bovendien enten op de technologische faciliteiten die zij in huis hebben. Een voorbeeld hiervan is het digitaal simuleren van het dynamisch gedrag van een machine, met als vervolg daarop het numeriek bestuurd frezen van de nokken, die deze machine zullen gaan aandrijven.

Het lijkt mij, dat voor de probleemgerichte programmatuur voor een instituut als de TH een interessante markt open ligt, vooral gericht op de wat kleinere bedrijven. Op deze manier kan men belangrijke kennisgebieden operationeel maken, mits men erin slaagt de taal van de gebruiker te spreken. Dit laatste aspect weegt zo zwaar, dat het ontwikkelen van dit soort programmatuur alleen goed mogelijk is, als daar specialisten bij betrokken zijn die ruime ervaring hebben in het vakgebied dat men op het oog heeft.

Vervolgens doen wij nog een stap terug in het ontwerpproces en kijken nog eens naar de fase van het kiezen van de uitvoeringsvorm. We hebben daar reeds de behoefte aan constructieprincipes gezien, die meer tot doel hebben een zekere denktrant te ontwikkelen, dan om letterlijk te worden overgenomen. Onderzocht zal moeten worden of deze voorbeelden kunnen worden opgenomen in een zogenaamd 'expert system', een systeem waarin een database zich door middel van een zoekstrategie laat raadplegen.

Als we nog een stap terug doen in het ontwerpproces, komen we weer in de fase van de keuze van het fysische effect. In deze fase is het probleem nog zo weinig gestructureerd, dat computerhulp het keuzeproces nauwelijks kan beïnvloeden. In nog sterkere mate geldt dit voor de project-definiërende fase.

De vraag naar de toepassing van CAD leidt dan ook tot de volgende conclusies. Het grafische beeldscherm kan vooral hulp bieden bij het concipiëren van installaties en machines uit reeds bestaande componenten, modules of functie-elementen. Deze eenheden werden reeds eerder ontworpen, gebouwd en getest. Zij zijn gedocumenteerd en in de database opgeborgen.

Het componeren van een machine-systeem uit deze modules betekent nu het oproepen en op het scherm plaatsen daarvan in hoofdafmetingen. Zeer snel na elkaar kan men verschillende concepten bestuderen en vergelijken. Wordt tot een bepaald concept besloten, dan kunnen ook onmiddellijk stuklijsten en andere documenten uit de database worden geproduceerd, tot het prijskaartje toe.

Zodra wij echter spreken over nieuwe ontwerpen, dan heeft CAD vooral iets te betekenen in de fase van het maken van de werktekeningen. Er valt zeker efficiency-verbetering te bereiken, als de stappen daarna: de werkvoorbereiding en het numeriek bestuurd fabriceren van ingewikkelde onderdelen, aan het tekenen zijn gekoppeld. Zolang ten behoeve van de evaluatiefase er nog maar in bescheiden mate probleem-georiënteerde programmatuur beschikbaar is, zal het gebruik van het grafische scherm bij het tekenen de voornaamste bijdrage van de computer aan het ontwerpproces zijn. Vooralsnog is het dan ook verantwoord de laatste letter van CAD op te vatten als de D van Drafting (het Engelse woord voor tekenen), in plaats van Design (het Engelse woord voor ontwerp).

## Onderwijs en onderzoek

Aan de hand van de gegeven beschrijving van het ontwerpproces en de belichting van de rol van de computer hierin, wil ik nu

trachten na te gaan hoe wij konstruerende werktuigkundige ingenieurs kunnen opleiden.

Allereerst moeten wij, denk ik, afzien van het idee dat wij volleerde ingenieurs-constructeurs zouden kunnen afleveren. Het zou al fraai zijn, als in de jonge ingenieur het inzicht wakker is gemaakt: konstrueren is een leuk vak, ik zou het best kunnen en een aantal vakken die ik op de TH heb moeten bestuderen, kan ik er nog bij gebruiken ook.

Laten wij nog eens kijken naar de laatste fase van het ontwerpproces, het maken van de werktekeningen. De tekening is het communicatiemiddel van de werktuigbouwer. Daar moet hij al in het begin van zijn opleiding mee te maken krijgen. Ook de schijnbaar nietige details, maatvoering, toleranties en ruwheidstekens dwingen hem zich rekenschap te geven van de wijze waarop zijn werkstukken kunnen worden vervaardigd en wat daarvan de kostprijs zal zijn. Het werken met het grafische beeldscherm in de opleiding heeft, denk ik, niet de eerste prioriteit. Immers, afgezien van het 3-dimensionaal tekenen, liggen de voordelen vooralsnog in de routinesfeer van het maken van de werktekeningen. Het lijkt mij dan ook educatief beter verantwoord de schaarse financiële middelen in de eerste plaats te gebruiken voor computertoepassingen in de daarvoor liggende evaluatiefase.

In deze fase met zijn modelvorming en de daaraan gekoppelde berekeningen is, zoals wij reeds zagen, een grote behoefte aan probleem-georiënteerde programmatuur. Ik denk daarbij aan het dimensioneren van mechanismen en servo-systemen met het oog op een goed dynamisch gedrag, het simuleren daarvan, het kiezen van de juiste servo-motor en onderwerpen zoals het dimensioneren van rollende contacten. Het lijkt mij zeer nuttig de studenten te laten ervaren hoezeer in deze fase de computer kan helpen de juiste keuze te maken. Immers, met een geschikt programma kan men een berekening zondig vele malen herhalen om zo tot een optimale keuze te komen. Bovendien is het maken van dergelijke programmatuur ingenieurswerk bij uitstek. Vooral dienen wij onze studenten te leren de complexiteit van de modellering bij een analyse juist te kiezen. Gecontroleerd met een zojuist afgemonteerde machine waarin zich problemen voordoen, kan bij voorbeeld tijdens een discussie met de beproevingstechnici, op basis van een eenvoudig model en een simpele berekening, op de achterkant van een toevallig binnen handbereik liggend A4-tje, de vinger op de zere plek worden gelegd. Het zal u duidelijk zijn, dat het opzetten van modellen met een complexiteit die aangepast is aan de probleemstelling en de toepassing op de analyse van konstrukties, mechanismen en servosystemen, de nodige aandacht zal krijgen.

Heeft men zich eenmaal aangewend zijn analyse waar mogelijk numeriek te maken, dan groeit de behoefte aan getallen van componenten, die men van derden betreft. Ik denk hier met name aan aandrijfcomponenten en servo-motoren. In de meeste catalogi ontbreken kwantitatieve gegevens betreffende stijfheid, speling en hysteresis. In contacten met fabrikanten is ons gebleken dat men veelal met deze begrippen niet vertrouwd is. Dat heeft er bij voorbeeld in mijn industriële functie toe geleid om ten behoeve van het bepalen van deze numerieke gegevens en een verantwoord inkoopbeleid een eigen onderzoekfaciliteit erop na te houden. Een absurde toestand uiteraard; fabrikanten en toeleveranciers van machine-onderdelen dienen zelf de karakteristieken van hun producten te leveren. Het lijkt mij dat hier voor het onderwijs in de aandrijftechniek een belangrijke taak is weggelegd.

Ten behoeve van de vormgevende fase verwachten wij met onze groep vooral actief te zullen zijn in de sfeer van de hoge precisie, daarbij gebruikmakend van elastisch vervormende elementen en van mechanismen, berustend op afrolling. Een belangrijk werkgebied ligt bij de snel en nauwkeurig bewegende mechanismen, waarbij vooral de programmeerbare machines, robots in de volks-

## Konstrueren, een kwestie van kiezen\*)

mond, actueel zijn. In dit veld gaat het om licht, stijf en spelingsvrij konstrueren, of zo u wilt, om een grote bandbreedte. Ondersteund door de genoemde analysemethoden verwachten wij interessante, algemeen bruikbare konstruktieprincipes te kunnen toevoegen aan de verzameling in 'Des Duivels Prentenboek'.

Tenslotte zullen wij aandacht besteden aan de project-definiërende fase, waarbij het erom gaat, de vraag van de opdrachtgever te analyseren en waar nodig, te herdefiniëren om samen met hem te komen tot een zinvolle start-specificatie.

Aan het einde van mijn opmerkingen over onderwijs en onderzoek wil ik nog een opmerking maken over een voor de constructeur onontbeerlijke eigenschap, een eigenschap die helaas in het algemeen op een school nauwelijks wordt aangeleerd, namelijk samenwerken! Het ontwikkelen van een machine of een produkt is het werk van technici uit verschillende disciplines. Het is ondenkbaar bij voorbeeld een programmeerbare manipulator te ontwikkelen, als werktuigbouwers, elektrotechnici, regeltechnici, informatici niet intensief samenwerken. Algemene technische kennis is voor de noodzakelijke communicatie onontbeerlijk. Ik stel dan ook voor het studieprogramma van de afdeling Werktuigbouwkunde in dit opzicht nog eens kritisch te beoordelen.

In onze vroege schooljaren werd ons reeds ingeprent, dat afkijken niet mocht. Technici echter dienen deze doe-het-zelf-mentaliteit te onderdrukken tot de vrije zaterdag. Multi-disciplinair samenwerken is een vaardigheid die evengoed moet worden aangeleerd als vakkennis. College in dit onderwerp is niet nodig; geld en tijd kost het dus niet! Het is namelijk geen vak, het is een gewoonte. Een gewoonte die je snel overneemt in een omgeving waar die gewoonte heerst.

Met hetgeen ik hiervoor heb belicht, hoop ik u te hebben duidelijk gemaakt dat konstrueren in elk van zijn fasen een kwestie van kiezen is. Het vakmanschap hangt af van de mate waarin men in staat is alternatieven te genereren en de juistheid waarmee men hieruit een keuze weet te maken. Zo werd 'Konstrueren, een kwestie van kiezen', het thema van deze middag.

Dit thema wil ik nu in een wat wijder perspectief plaatsen. We kunnen stellen dat de culturen van het noordelijk halfrond worden beheerst door de technologie. De toegepaste wetenschap bepaalt hier de maatschappij in hoge mate. Geïntensiveerde agrarische voortbrengingsprocessen, hygiëne en medische technieken hebben de primaire levensomstandigheden op een hoog niveau gebracht. De industriële produkten hebben het leven in ruime mate comfortabeler gemaakt. Al tobt men nog steeds met verdelingsproblemen, diepe materiële armoede bestaat niet meer. Maar tevens dreigt de technologie ons dermate boven het hoofd te groeien, dat de nadelen ervan de voordelen gaan overschaduwden, zozeer dat het leven direct in zijn voortbestaan wordt bedreigd. Een opiniepeiling onder studenten in Engeland omtrent hun verwachting over de uitkomst van de bewapeningswedloop, had als resultaat dat 70% verwachtte dat hun leven door een kernoorlog zou eindigen.

Slechts 4% geloofde dat ze de afschaffing van kernwapens zouden meemaken. Dan hoef ik nog slechts te refereren aan de onverantwoorde aanslag die gepleegd wordt op de natuurlijke hulpbronnen en te wijzen op het mondiale verdelingsprobleem (van ecocide en genocide wordt in dit verband gesproken) om aan te tonen dat de geest uit de fles is.

Een vraag is dan: wat hebben wij, technici, ingenieurs, constructeurs, daarmee te maken? Velen stellen: werken aan en met techniek is een waardenvrije, neutrale bezigheid! Een wat nauwkeuriger analyse zal snel leiden tot andere conclusies. De technologie is een machtsfactor in ons type maatschappij. De beschikbaarheid van technologische mogelijkheden en de daarmee gepaard gaande belangen vormen een druk op de besluitvorming in een bepaalde richting. We kunnen derhalve spreken van technology-push [4]. Zo is de toepassing van de techniek in de produktieprocessen van beslissende betekenis voor de arbeidsinhoud van vele werkers in de industrie. Voor een ander voorbeeld van technology-push behoeven wij slechts te kijken naar het besluitvormingsproces inzake kernenergie in Nederland of naar de Star Wars programma in de Verenigde Staten [5]. Technologie is zo verweven met de samenleving dat geen technicus zich kan wanen neutraal, waardenvrij, bezig te zijn.

Het is verantwoord aan te nemen en ook wenselijk, dat enigen van de hier opgeleiden in hoge bestuurlijke functies terecht komen. Wij mogen toch de volgende generatie toewensen met andere bestuurders te worden opgepadeld, dan het soort juristen dat te melden heeft, niet bang te zijn voor de duivel of dat kernenergiecentrales nog veiliger zijn dan griesmeelfabrieken.

Ik ben ervan overtuigd dat het tot een onlosmakelijk deel van de ingenieursopleiding behoort om de studenten het besef bij te brengen dat ook in het maatschappelijke aspect van hun vak zich een keuzeprocess afspelt. Zij ontlopen de keuze niet; wie niet kiest, voor haar of hem wordt gekozen! Hun leermeesters dienen daarin een rol te spelen, willen zij voorkomen dat zij zich gaan voelen als Max Born, de Nobelprijswinnaar, die zei: „Het is natuurlijk heel aardig, zulke knappe leerlingen als Oppenheimer en Fermi te hebben gehad. Toch zou ik wensen dat zij over wat meer wijsheid dan intelligentie hadden beschikt. Het is ook mijn fout geweest dat zij van mij niets meer geleerd hebben dan de methode van onderzoek. Nu is door hun intelligentie de wereld in een wanhopige toestand terecht gekomen”.

Voor degenen onder de TH-bevolking die vrezen nu hier het paard van Troje voor zich te zien, dit: het wakker roepen van het besef dat keuzes moeten worden gemaakt, impliceert niet dat de keuzes van de leerling noodzakelijkerwijs congruent uitvallen met die van de leraar.

Elke generatie dient zijn eigen keuze te maken, maar ik spreek de wens uit dat de ingenieurs, die aan deze TH afstuderen, zich bij het maken van hun keuzes laten leiden door een leuze die ik overnam van de Vereniging tot Behoud van Natuurmonumenten: „De toekomst mag geen verliezer zijn”.

### Literatuur

- [1] Rodenacker, W.G., U Claussen: *Regeln des Methodischen Konstruierens*, Krauskopf Verlag, Mainz 1973.
- [2] Horton, H.L., J.A. Newell: *Ingenious Mechanisms for designers and inventors*, The Industrial Press, New York 1967.
- [3] Hoek, W. van der: *Het voorspellen van dynamisch gedrag en positioneringsnauwkeurigheid van constructies en mechanismen*, dictaatnr. 4.007.1, THE 1984.
- [4] Lintsen, H.: *Ingenieur van beroep*, Ingenieurspers, Den Haag 1985.
- [5] de Ruiter, W., B. v.d. Sijde: *De nucleaire erfenis*, Boom, Meppel 1985.