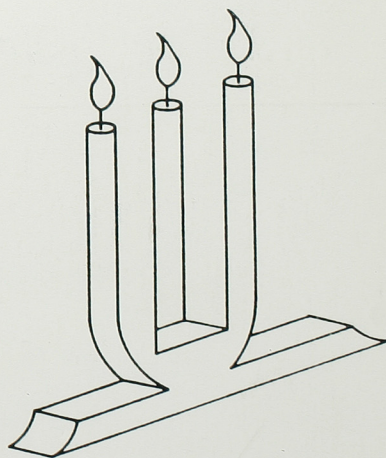


Over ontwerpen gesproken.....

Afscheidscollege

Prof.ir. A.G. Montfoort

Maart 1992



— **TU**Delft

Technische Universiteit Delft

**Faculteit der Scheikundige Technologie en der
Materiaalkunde**
Vakgroep Chemische Procestechnologie

1990704

Tres Red. 1992

OVER ONTWERPEN GESPROKEN

Afscheidscollege gehouden op
vrijdag 27 maart 1992
door
Prof.ir.A.G.Montfoort

Geachte toehoorders,

Graag zou ik dit laatste college gegeven hebben op de plaats waar ik het vanaf het begin, nu 20 jaar geleden, heb gedaan: het gele gebouw voor scheikunde, maar om logistieke redenen hebben we een andere plaats gekozen en zit U daardoor bovendien - bij wijze van spreken - op fluweel. En niet alleen de plaats is anders, ook het gehoor en de kleding zijn anders dan anders, zodat we ook het college maar wat hebben aangepast.

Maar deze plaats - de Aula - waar U nu bent, heeft nog een ander voordeel, omdat het een fraai voorbeeld is van een technisch ontwerp: functioneel, betrouwbaar en toch heel origineel: een prachtig stuk ingenieurswerk dat het zelfs tot een postzegel bracht. En ik wilde het vandaag met U hebben over ontwerpen. Niet alleen omdat het m'n vak is en m'n kinderen en vrienden nu eindelijk wel eens zouden willen weten waar ik me al die jaren mee heb beziggehouden, maar vooral ook omdat het in het beroepsleven van ingenieurs zo'n belangrijke rol speelt.

Om U duidelijk te maken dat dit niet alleen een persoonlijke opvatting is, twee citaten: het eerste van Asimov in zijn beroemde boek over design: "Design is the essential purpose of engineering" en het tweede uit de "Directions of engineering education" van de befaamde technologische universiteit MIT in de Verenigde Staten: "The design function is central in defining of engineering itself." M.a.w.: engineering - dus de ingenieurskunde - zonder ontwerp bestaat niet. Nóg anders gezegd: iedere ingenieur - en nu spreek ik over het vak, niet de titel - is ontwerper.

Het omgekeerde - ontwerp zonder ingenieurskunde - bestaat natuurlijk wél en dat is dan kunst en als U de Aula bekijkt ziet U dat het ene het andere niet uitsluit en kunde ook kunst kan zijn. Sterker nog: er is doorgaans een kunstzinnig element aanwezig, alhoewel ik niet zo ver zou willen gaan als de Rector van de TU-Eindhoven enige jaren geleden met de uitspraak: "Ingenieurschap is geen wetenschap of kunde maar een kunst die veel meesterschap en kunde vooronderstelt".

De relatie tussen de kunde en de kunst in engineering is vooral de laatste jaren weer onderwerp van vele beschouwingen geweest. Ik noem hier de intreerede (1) van collega Van den Bleek en de afscheidsrede van Schierbeek bij Industriële Ontwerpen (2) vorig jaar, als ook de titel van het enige tijd geleden verschenen boek: "The art of process engineering".

Maar gaat het in de kunst om het vorm geven (de compositie of vorm zijn primair), bij het ontwerp in engineering gaat het om het vervullen van een functie, het gestelde doel waar alles om draait.

Nu hebt U bij een brug of een vliegtuig intuïtief al een idee van wat onder een ontwerp verstaan wordt, juist omdat de functie uit de vorm naar voren komt. Het is

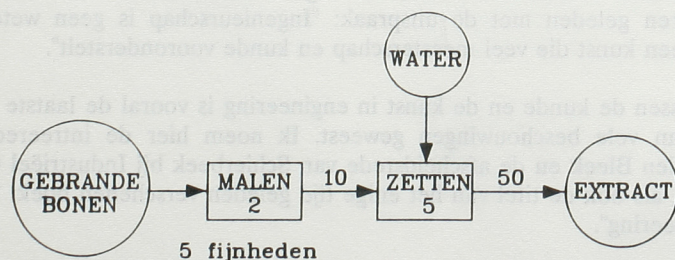
het klassieke ontwerp waarbij de functie gereduceerd is tot vorm of geometrie. Het wordt al minder duidelijk als we het over het ontwerp van een chemisch produkt hebben, zoals kunstmest of vlekkenwater. Daar is de functie gereduceerd tot samenstelling en die zie je niet meer. Vaak wordt bij dit soort produkten gesproken over het produkt formuleren en hierin zien we het begrip vorm toch weer naar voren komen.

Maar bij het ontwerpen van fabrieken voor chemische processen - het procesontwerpen - gaat het om het proces; de functie is het veranderen van stoffen, het uit elkaar halen van stoffen of het maken van energie. Ook een dergelijk ontwerp krijgt bij realisatie een vorm maar de functie is niet meer uit de vorm af te leiden; dezelfde vorm kan verschillende functies hebben en evenzeer kan dezelfde functie verschillende vormen hebben.

Op kleine schaal hebt U thuis allemaal één of meer apparaten staan, waarin zich processen afspelen en waaraan dus een procesontwerp ten grondslag ligt, zij het vaak (schijnbaar) eenvoudig. Denkt U b.v. aan Uw koffiezetapparaat of Uw koelkast. Het uiterlijk van deze apparaten - de vorm - kan bij de burens heel goed verschillend zijn, maar de functies: koffie zetten of koelen, zijn gelijk en dát zijn de processen.

Maar zelfs aan deze eenvoudige processen kan een verschillend procesontwerp ten grondslag liggen: de koelkast thuis werkt doorgaans op elektriciteit en heeft een motor en de koelkast aan boord van caravan of boot werkt op butagas en heeft een brander.

Opvallend is het feit dat een proces zoals het koffie zetten in feite uit meerdere elkaar opvolgende activiteiten of stappen bestaat die leiden tot het uiteindelijke doel: de functie. We moeten de koffiebonen n.l. eerst nog malen, vervolgens een extractie uitvoeren waarbij we water en koffie met elkaar in aanraking brengen. We kunnen dit in het onderstaande schema weergeven:



Figuur 1.

We hebben een 2-stappen proces met een vaste volgorde en iedere stap kan op meerdere manieren worden uitgevoerd, b.v. malen op 2 manieren:

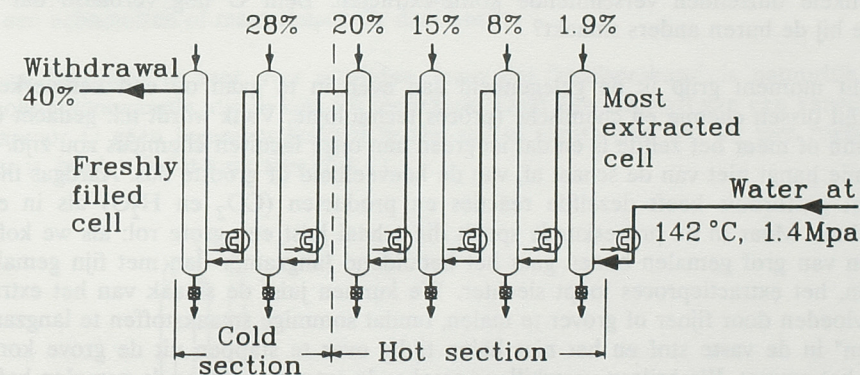
kraken (ouderwetse koffiemolen)
impact (snel ronddraaiend staafje)
ieder met 5 fijnheden de korrelgroottes 1,5; 0,9; 0,5; 0,3 en <0,1 mm,

zodat we 10 combinaties kunnen krijgen.

We kunnen b.v. op 5 manieren zetten:

- Amerikaans (percoleren, kokend water circuleren),
- filter (heet water doordruppelen),
- espresso (kokend water doorpersen),
- Turks (mengen met heet water).
- industrieel (b.v. voor oploskoffie), (fig. 2, continu proces).

Percent of solids extracted from each column

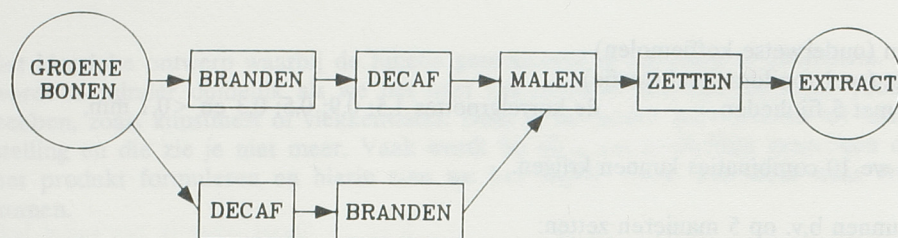


Figuur 2.

In totaal kunnen we ons dus $10 \times 5 = 50$ "procesontwerpen" voorstellen. We worden dus geconfronteerd met een keuzeprobleem: welke manier kiezen we voor een bepaalde stap en welke fijnheid kiezen we, d.w.z. we moeten een specificatie vastleggen. Sommige ontwerpcombinaties zijn gelukkig bij voorbaat uit te sluiten, b.v. fijne koffie verstopt een filter of geeft een slecht rendement, dus weinig extract. Er blijven echter genoeg min of meer gelijkwaardige oplossingen over.

Maar het probleem is nog complexer. De volgorde van de stappen ligt in dit geval vast; het is overbodig de bonen nog te malen als we al koffie hebben gezet van de hele boon.

Maar die volgorde ligt vaak niet vast. Neem een proces dat we ons vóór het malen kunnen voorstellen: het verwijderen van de cafeïne en het branden, zoals in fig. 3 is weergegeven.



Figuur 3.

We kunnen b.v. 2 minuten op 300 °C branden of 12 minuten op 240 °C; de cafeïne kunnen we extraheren met b.v. ethylacetaat, superkritisch CO₂ of "verzadigd" koffie-extract, die recirculeren waarbij de cafeïne uit dat extract in een tweede stap verwijderd wordt. In totaal dus 6 ontwerpen. Maar we kunnen ook eerst de cafeïne verwijderen en dan pas branden en dit deel komt daarmee op 12 ontwerpcombinaties en voor het totaal dus op 600 (12 x 50) "ontwerpen". Ook de grondstof kan nog verschillend zijn en met de vier koffieboonsoorten die gebruikt worden, zitten we dan al op enkele duizenden verschillende koffie-extracten. Bent U nog verbaasd dat de koffie bij de burens anders smaakt?

Op dit moment grijp ik de gelegenheid aan even in te gaan op een kenmerkend verschil tussen chemie en chemische (proces)technologie. Vaak wordt n.l. gedacht dat dat min of meer het zelfde is en dat iedereen aan onze faculteit chemicus zou zijn. Chemie hangt niet van de schaal af, van de hoeveelheid of grootte dus. Aardgas thuis in het gasfornuis heeft dezelfde reacties en producten (CO₂ en H₂O) als in een ketelhuis. Maar in de proceskunde speelt die schaal juist een grote rol: als we koffie zetten van grof gemalen bonen gaat het beduidend langzamer dan met fijn gemalen bonen, het extractieproces loopt slechter. We kunnen juist de smaak van het extract beïnvloeden door fijner of grover te malen, omdat sommige smaakstoffen te langzaam "lopen" in de vaste stof en het niet halen tijdig over te stappen uit de grove korrel naar het extract. We krijgen verschillend smakende extracten. Maar de gemalen koffie is chemisch gezien hetzelfde in beide gevallen.

Je kunt dus proceskunde bedrijven zonder een echte chemicus te zijn; gelukkig zou ik willen zeggen, want een hoogleraar nam destijds na het tentamen afscheid van me met de woorden: "Dat U een goed ingenieur wordt wil ik niet uitsluiten, maar een goed chemicus wordt U nooit!" In deze uitspraak valt overigens de, nog vaak in universitaire kringen (en niet alleen in Nederland) geuite visie te beluisteren, dat chemisch ingenieurs mislukte chemici zouden zijn.

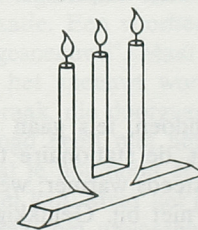
Nu weer terug naar processen.

Het koffiezetproces speelt zich thuis af, maar als we koffiebonen vervangen door aardolie en koffie-extract door smeerolie dan zitten we midden in een industrieel proces, waarin op analoge wijze een keuze moet worden gemaakt over processtappen en de volgorde daarvan; dit laatste kan aanleiding zijn tot een bijna niet te overzien aantal mogelijkheden; (net als bij letters: uit 2 letters kunt U 2 woorden maken, maar met 3 al 6 woorden). In chemische fabrieken wordt nu een hele reeks van dergelijke

processtappen na of naast elkaar uitgevoerd. De opgave bij het ontwerpen van zo'n fabriek is het bedenken van een geïntegreerd, dus logisch samenhangend stelsel van handelingen of processtappen, die tot het gewenste doel leiden, waarbij in principe alleen het beginpunt, b.v. de grondstof (b.v. aardolie) en het doel, een bepaald product (b.v. smeerolie) gegeven zijn.

De processtappen, waar we hier op doelen, zijn processtappen op macroniveau zoals koelen, extraheren, kristalliseren of malen, en vergelijkbaar met keukenhandelingen als braden, smoren, afgieten en zeven. Het gaat dus steeds om mogelijkheden bedenken, om rangschikken en om kiezen; hierbij moet tevens voldaan worden aan gestelde eisen, zoals veiligheid, onderhoudbaarheid en kosten, die het aantal oplossingen beperken. Maar desondanks blijken er vele wegen naar Rome te leiden. Ontwerpen met hetzelfde begin en hetzelfde doel zullen dus vaak verschillen, niet alleen omdat de beperkingen verschillen maar ook omdat de ontwerpers verschillen, precies als bij het ontwerp van bruggen. Wat gemeenschappelijk is is het gegeven dat ze gebaseerd zijn op bekende zaken en we zouden een technisch ontwerp dan ook kunnen omschrijven als een nieuwe combinatie van bestaande kennis, die realiseerbaar is en een economisch of maatschappelijk doel heeft.

Ik zal hier niet te zeer over uitwijden, maar dat "realiseerbaar" is natuurlijk een absolute voorwaarde, die ik kort wil toelichten. Eerst een ontwerp van een kandelaar, waarvoor U geen ingenieur hoeft te zijn om te constateren dat dit niet realiseerbaar is, omdat U dat kunt zien (fig. 4).

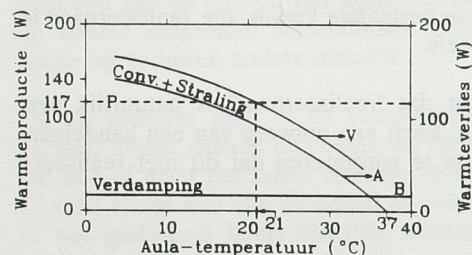


Figuur 4.

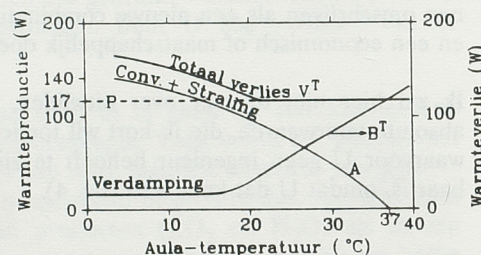
Bij het procesontwerp moeten we nu opereren binnen natuurwetten, die we wel slim kunnen toepassen, maar niet kunnen veranderen. We zien ook niet meer, dat het niet realiseerbaar is doch we kunnen het ons wel voorstellen. Als we ontwerpen maken die strijdig zijn met natuurwetten, kunnen we de installatie wel bouwen, maar werkt hij niet en is dus technologisch niet realiseerbaar. De natuurwetenschappen leren ons wat wel en wat niet kan, (de grenzen) maar niet wat we moeten doen als ontwerper (de keus).

We gebruiken nauwelijks schaalmodellen, die over de vorm gaan, maar denkmodellen, die beschrijven wat er gebeurt. Maar denkmodellen kunnen vaak wel weergegeven worden in een tekening; het wordt dan ook een grafisch model. We werken bij het procesontwerpen daar veelvuldig mee en het koffieschema is er al een voorbeeld van.

Als tweede voorbeeld gaan we een ander probleem oplossen. De vraag is, hoe warm het hier in de Aula moet zijn opdat we ons behagelijk voelen. Met dat laatste bedoelen we dat we niet meer warmte afstaan dan we zelf - uit ons voedsel - produceren, want dan krijgen we het steeds kouder. Behagelijk wil dus zeggen: warmteproductie = warmteafvoer; we noemen dat bij processen een stationaire toestand. De warmteproductie van stilzittende mensen is gemiddeld 117 watt, net zoveel als een flinke gloeilamp. En als we wat gaan doen of flink bewegen, wordt dat 140 watt. Dit is niet afhankelijk van de Aula-temperatuur en we kunnen de productie dus weergeven door de horizontale lijn P in het grafisch model van warmte tegen temperatuur. De warmte-afvoer - o.a. bepaald door de dikte van de trui die we dragen - wordt weergegeven door lijn A. Daarnaast verliezen we warmte door verdamping bij het ademen (lijn B), en het totale verlies wordt weergegeven door lijn V (fig. 5). We zien dat beneden 21 °C we meer verliezen dan produceren en het



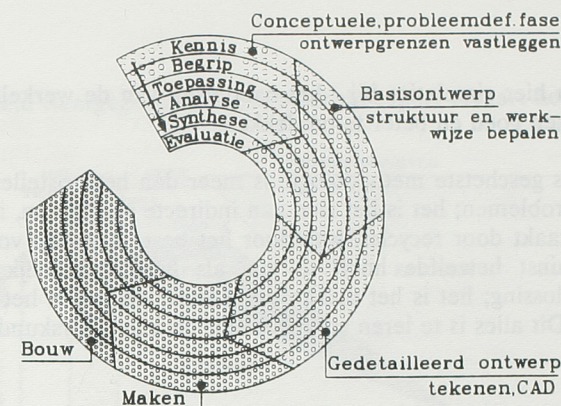
Figuur 5.



Figuur 6.

dus steeds kouder krijgen, tenzij we een extra jas aandoen, iets gaan doen of de thermostaat op 21 °C zetten. Bij 21 °C is er evenwicht, de stationaire toestand: de oplossing van het probleem. Daarboven krijgen we het steeds warmer; we kunnen nu de toga uittrekken, maar nóg minder gaan doen is er niet bij. Gelukkig zit er een regelsysteem in het lichaam ingebouwd; we gaan transpireren, d.w.z. meer water verdampen, weergegeven door de getrokken lijn B^T in fig. 6, waarmee we proberen de stationaire toestand te handhaven bij iedere temperatuur boven de 21 °C. En als we wat gaan doen, dus de warmteproductie toeneemt, moeten we nog meer verdampen. Als we het lichaam nu even als reactor zien - een vergaande, maar voor het doel gepaste vereenvoudiging - dan hebben we zojuist een stukje procesontwerp gezien. We kunnen de reactor stationair houden door de verdamping te regelen en we kunnen aflezen - en dat is het belang van zo'n grafiek - hoeveel warmte we moeten afvoeren, afhankelijk van de omgeving.

Een ontwerp ontstaat niet in één keer. Ontwerpen is voortdurend een verder gaan en weer terugkeren naar het begin, het zij omdat het niet realiseerbaar blijkt te zijn, hetzij om verder te detailleren. We kunnen dit schematisch op de volgende wijze weergeven:



Figuur 7.

Aan de buitenrand zijn de verschillende ontwerpfases weergegeven van concept tot bouw van het ontwerp. De concentrische cirkels geven de ontwerpmethodologie weer, die in iedere fase van buiten naar binnen doorlopen wordt. Een korte toelichting:

- Kennis betekent het zich herinneren, herkennen en reproduceren van feiten, regels, formules en definities; de onmisbare basis voor de overige cirkels die beschouwd kunnen worden als de kunde kennis te hanteren.
- Begrip is het verstandelijk bevatten van informatie; deze kunnen gebruiken en het voorzien van implicaties zoals: problemen van het type: "als dan". Tevens worden bestaande modellen vergeleken met andere bestaande modellen of met nieuw bedachte denkmodellen (formules).
- Bij de analyse wordt informatie gesplitst in onderdelen; het gaat er niet alleen om wat er gebeurt, maar vooral waarom het gebeurt. Er worden gevolgtrekkingen gemaakt om bepaalde opvattingen te ondersteunen en te komen tot realisatie. Een voorbeeld ter verduidelijking: "Als de wereld wit is, dan heeft het gesneeuwd". Maar nu wordt vaak zo'n generalisatie omgekeerd gebruikt: "Als het sneeuwt wordt de wereld wit". Dit is een heuristische, inductieve uitspraak, die doorgaans wel het geval zal zijn, maar - zoals Popper in 1934 al betoogd heeft met het aanvechten van de conclusie dat alle raven zwart zijn omdat je nog nooit een witte raaf hebt gezien - wetenschappelijk niet door de beugel kan. Maar het gaat een ontwerper niet om wetenschappelijke strakheid; het gaat om uitvoerbaarheid en betrouwbaarheid. Er moet wel met zorg met inductieve redeneringen worden omgesprongen, want "als het sneeuwt zijn er wolken" mag niet leiden tot: "als er wolken zijn sneeuwt het". Toch wordt heuristiek veelvuldig toegepast in de volgende ring in de figuur:
- De synthese, waarbij elementen samengevoegd worden tot een nieuwe zinvolle structuur, die er niet was van tevoren. Juist omdat het aantal mogelijkheden van combinaties van enkele elementen vaak zeer groot is, is het onmogelijk deze alle uit te werken en moeten er keuzes gemaakt worden om de ontwerptijd te beperken. Als we 5 stoffen willen scheiden door destillatie of extractie als mogelijke methoden, zijn er al 40 verschillende configuraties mogelijk. Heuristiek toepassen is noodzakelijk om ontwerpproblemen hanteerbaar te houden en de beslissing die bij iedere keus hoort te vergemakkelijken.
- We zijn dan eigenlijk al in de evaluatiestap terechtgekomen, waarbij het om beoordelen gaat. Beoordelen van de waarde van publicaties van anderen, van methoden en nauwkeurigheid, met toepassing van eigen normen, en beslissen.

Vaak horen hier simulaties bij - het nabootsen van de werkelijkheid - om het verschil tussen goed en beter te ontdekken.

Ontwerpen volgens geschetste methodologie is meer dan het opstellen van analysere-sultaten van deelproblemen; het is het zien van indirecte verbanden, in het procesont-werp vaak veroorzaakt door recycles, waardoor het beste ontwerp voor een deel van het proces allerm minst hetzelfde hoeft te zijn als het uiteindelijk ontwerp in de optimale totaal-oplossing; het is het maken van keuzen en het is het voorspellen van het eindresultaat. Dit alles is te leren en valt onder de ingenieurskunde.

Maar een goed ontwerp gaat hier vaak bovendien omdat intuïtie en creativiteit een grote rol kunnen spelen om tot de betere keus te komen; niet voortdurend, maar zo nu en dan. Een soort mentale kortsluiting, een gedachtenflits; achteraf zelfs vaak logisch verklaarbaar en van grote betekenis bij het probleemoplossen, waarbij probleem- of doelstelling, transformatie - het uitdrukken in beïnvloedbare variabe-len - en evaluatie schijnbaar simultaan verlopen.

Is de uitspraak: "In deze zin zitten drie fouten" juist? Een aantal Uwer zal zeggen dat er "twee" moet staan om waar te zijn. Dan is het ook waar, maar er staan dus inder-daad drie fouten in en de uitspraak is dus toch juist. Maar de fouten zijn van een verschillend soort, waarvoor je even zo'n flits nodig hebt. We kunnen, en proberen ook, bij het ontwerp-onderwijs creativiteit te ontwikkelen door het stimuleren van onbevangen perceptie en van zelfvertrouwen; geen angst te hebben anders te zijn of van normen af te wijken; het vermijden van vakblindheid. Opvoeding, onderwijs en omgeving lijken er echter vaak meer op gericht jonge mensen creativiteit en intuïtie te leren onderdrukken en intuïtie te wantrouwen.

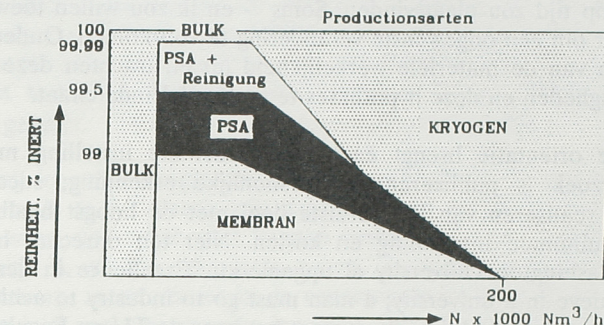
Als U in het onderstaande plaatje (fig. 8) alleen een telefoon ziet, hebt U een technische perceptie; als U eerst of ook nog een paar honden ziet, bent U wat onbevangener en is er nog hoop.



Figuur 8.

Dit subjectieve, intuïtieve element, dat ik de ingenieurskunst zou willen noemen, is nauwelijks overdraagbaar, maar belangrijk voor ontwerpers, omdat het juist wel helpt bij de vraag wát we moeten doen of kiezen. Gelukkig hebben sommige studenten het in zich. Naast intuïtie (kunst) speelt bij kiezen expertise (kunde) een rol en het is vaak moeilijk te achterhalen waar de kunst kunde wordt, maar beide helpen bij de keuze. De keuze van de beste manier om stikstof te verkrijgen op grond van expertise

wordt als voorbeeld weergegeven in fig.9, maar de expert ervaart het als intuïtie. (12).

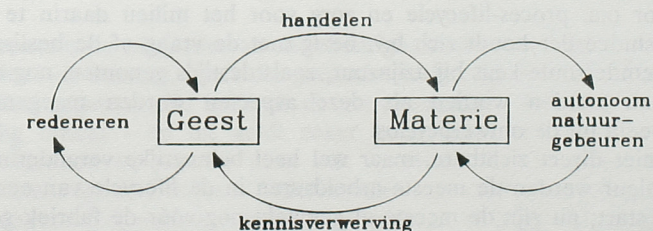


Figuur 9. Mogelijke manieren om stikstof te verkrijgen

Als er meer variabelen in het geding zijn, is het niet goed meer mogelijk het in een figuur weer te geven. We kunnen dan expert programma's gebruiken die op dezelfde basis berusten en die hulp bij beslissingen bieden, al moeten ze wel eerst gemaakt zijn!

De kracht van het methodologisch ontwerpen, dus de werkwijze van fig. 7, is dat het niet alleen bruikbaar is voor proces-ontwerpen, maar evenzeer voor het ontwerpen van vliegtuigen of telefoontoestellen, als ook voor proces-ontwikkeling, het experi-mentele werk dat het ontwerp zowel stuurt als er door gestuurd wordt. Discussies over product- versus procesontwerpen, zoals in de Faculteit met regelmaat gevoerd, gaan te veel uit van het object en te weinig van het ontwerpen als methode.

Wellicht hebt U nu de indruk gekregen dat de Faculteit zich alleen met ontwerpen bezig houdt, omdat ik nog niet veel over onderzoek gezegd heb. Ik zal daar ook niet op ingaan maar alleen even stilstaan bij het verschil tussen ontwerp en onderzoek. Obert (4) heeft het in zijn inaugurele rede compact samengevat: "Onderzoek is analyse; ontwerp is synthese". Wellicht wat te zwart-wit, want Eekels (5) heeft er al op gewezen, dat we beide activiteiten wel mogen onderscheiden maar nimmer mogen scheiden, omdat ze elkaar wederzijds doordringen: ze zijn tot elkaar veroordeeld. Graag laat ik de door hem gebruikte figuur 10 nog eens zien, waar dit ook uit blijkt, maar waarbij tevens duidelijk wordt dat ze een tegengestelde oriëntatie hebben.



Vier processen in de domeinen van de geest en de materiële werkelijkheid

Figuur 10.

Bij ontwerpers - ik citeer - "is het handelen gericht op bewerkstelligen van een gewenste verandering van de ons omringende werkelijkheid, die zonder deze handeling niet of niet op tijd zou plaatsvinden. Soms - en ik zou willen toevoegen: steeds meer - gaat het er om een ongewenste verandering te voorkomen. Onderzoekers daarentegen gaan van de materiële werkelijkheid uit en trachten deze te vangen in abstracte wetmatigheden en deze hypothesen te toetsen." Einde citaat.

De tegengestelde oriëntatie brengt een andere mentale instelling met zich mee. Succes in onderzoek is publiceren en persoonlijke erkenning; succes voor een ontwerper is het realiseren van het vereiste doel met de hoogst haalbare betrouwbaarheid tegen minimale inspanning en kosten. Niet ten onrechte heeft Budford Smith (6) van Washington University al opgemerkt: "Excellence in design is almost impossible to achieve in a university; a man must go to industry to achieve eminence in that field". Dit maakt ook duidelijk waarom het voor de TU en Faculteit moeilijk is om ontwerpers als docent aan te trekken c.q. het ontwerpen - ik bedoel het in bredere zin dan alleen procesontwerp - in het curriculum meer gewicht te geven. En zo komen we dan vanzelf bij het onderwijs terecht en de veranderingen daarin door een veranderende omgeving.

Intermezzo.

Laat ons eerst eens enkele veranderingen wat nader bezien, zoals bij onze grootste klant, de industrie. De chemische industrie is een zich snel vernieuwende bedrijfstak. Het beste kan ik dit illustreren met een eigen ervaring. Van de 40 jaar die ik nu als ingenieur achter me heb liggen, bracht ik krap de eerste helft door in de industrie en was daar direct betrokken bij de bouw van 18 verschillende proces-eenheden of fabrieken. Op dit moment loopt er nog één unit en zijn er 17 gestopt omdat er hetzij betere processen zijn gekomen (azijnzuur, vinylacetaat, butanol), hetzij omdat de capaciteit zozeer uitgebreid moest worden dat er een nieuwe fabriek kwam (methanol, formaldehyde). Ook heb ik in deze 40 jaar 5 verschillende azijnzuur-routes industriëel zien toepassen, ieder de beste op een bepaald moment en plaats: de alcoholoxydatie, de acetyleen-hydratie met oxydatie van het gevormde aldehyde, de ethyleen-oxydatie met eveneens aldehyde-oxydatie, de butaan-oxydatie en de carbonylering van methanol met CO, die nu allerwege wordt toegepast. En in de toekomst zal het niet anders gaan. Zo zullen secundaire grondstoffen - dus stoffen die al eens gebruikt zijn en hergebruikt worden, zoals papier of kunststoffen, een veel grotere rol gaan spelen en raffinaderijen en elektrische centrales zullen steeds meer gaan lijken op de huidige petrochemische complexen. Ook de beslissingscriteria bij keuze zullen veranderen door o.a. proces-lifecycle en zorg voor het milieu daarin te betrekken. Mijn laatste afstudeerder houdt zich b.v. bezig met de vraag of de beslissingen over de zojuist genoemde route-keus bij azijnzuur, zoals destijds genomen, nog op dezelfde manier genomen zouden worden als deze aspecten worden meegenomen, een evaluatie voorbeeld uit de ontwerpcyclus.

Tenslotte een niet direct zichtbare, maar wel heel belangrijke verandering. Toen ik begon als ingenieur werden de meeste arbeidsuren in de lifecycle van een installatie gemaakt ná de start; nu zijn de meeste al gemaakt nog vóór de fabriek gestart is, in de ontwerpfase. Soms krijg ik de indruk dat de balans tussen beide wel eens uit het oog wordt verloren, maar het duidt wél op het toenemend belang van het ontwerp.

Niet alleen de chemische industrie is veranderd; ook de ontwerp-hulpmiddelen zijn veranderd en daarbij moet natuurlijk in de eerste plaats de computer worden genoemd. Toen ik hier begon had de TU één grote computer, gevoed uit kaartenbakken. Nu heeft iedere medewerker en driekwart van alle afstudeerders een PC, die voor onze ontwerp-toepassing voldoende zijn. Opvallend is dat de meest gebruikte toepassingen niet technologisch zijn, zoals: tekstverwerking, tekenen en electronic mail, maar gericht zijn op communicatieverbetering.

Ook de toepassing in project engineering, b.v. voor planning en beheersing, stuklijsten, isometrics en 2- of 3-dimensionale weergave van schema's, die een duidelijk technische toepassing zijn en het werk kunnen verbeteren omdat eerdere ontdekking van fouten mogelijk is, wil ik verder laten rusten. Ze spelen vooral een rol in latere fasen van het ontwerp, maar minder in de conceptuele en structuur bepalende fase, waar technologen juist een sleutelpositie innemen. Daar liggen ook de technologische toepassingen, zoals het opzetten en doorrekenen van de balansen van stroomschema's, het simuleren van de werking van procesapparaten met modellen, het optimaliseren en in de toekomst ook expertsystemen. Het gebruik van flowsheet programma's door studenten is nu standaard. Wél zien we de tendens dat modulaire programma's, zoals ChemCad of Aspen, in de toekomst door concepten van kennisgebaseerde systemen met ingebouwde expert technology, zoals Ascend en Design Kit, worden vervangen, waarbij evenwel per saldo de technologische expert vervangen is door een informatica-expert die voor het gebruik nodig blijkt te zijn.

Maar daar liggen juist ook de bedreigingen, die ik 20 jaar geleden bij mijn start aan de TU al noemde en die nog onverminderd waar zijn. Als objectieve ondersteuning daarvan nu een citaat uit 1990, uit de intreerede van d'Angremond (7), een weg- en waterbouwer, waar ik het van harte mee eens ben: "Hoezeer ik het belang onderschrijf van computergebruik bij het ontwerpen, hoezeer ik het belang onderschrijf van meten en registreren, ik zie in deze ontwikkeling ook een gevaar. Door steeds meer te vertrouwen op deze hulpmiddelen dreigt een stuk vakkennis en gevoel verloren te gaan dat ondanks alles niet kan worden gemist". Einde citaat.

Als voorbeeld een discussie tussen afstudeerders, waar ik onlangs toevallig bijstond. De vraag was of een boordevol glas whiskey met water, waar ijsblokjes in drijven en dus boven de rand uitsteken, bij het smelten overloopt. Na luttele seconden stonden er twee studenten op met de woorden: "We zullen even een programma opzoeken of -schrijven, dan weten we het". Maar goed dat Archimedes dit niet heeft hoeven meemaken.

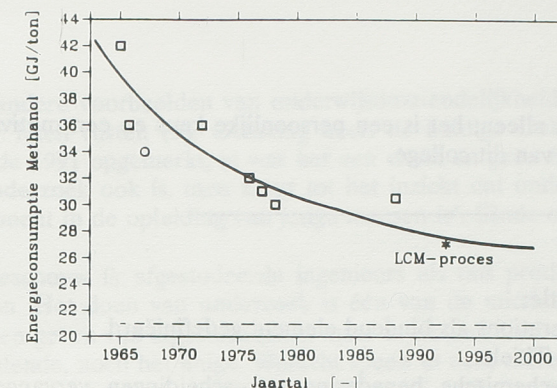
Een tweede aspect is de suggestie van nauwkeurigheid, die veroorzaakt wordt door de vele cijfers achter de komma, maar die geenszins in lijn ligt met de betrouwbaarheid van de gebruikte gegevens. En zelfs als de nauwkeurigheid wel reëel is dan is deze vaak overbodig omdat - en dit geldt zeker voor keuzeproblemen - een globale benadering voldoende is, waarbij alles wat hetzelfde is bovendien nog voor de vergelijking achterwege kan blijven. Vele iteraties zijn vaak overbodig werk, wat op zich voor studenten niet verkeerd hoeft te zijn, als ze zich dat op enig moment maar bewust worden.

Een derde aspect is dat de resultaten van de berekeningen anderen moeten overtuigen en dat lukt aanzienlijk beter als het bos duidelijk naar voren komt, hoe fraai overigens alle bomen ook mogen zijn. En juist studenten storten zich bij voorkeur op de bomen en verontachtzamen het bos en vergeten daarbij dat de "human ware" bij het toepassen van computers veel belangrijker is dan de hard- en software. En dat geldt ook voor henzelf: input maken en output krijgen is snel te leren, maar het begrijpen van de relaties, die de uitkomst van het model - het ontwerp - sturen en bepalen, vraagt meer tijd en inzicht.

Maar de grote voordelen van het gebruik van computers blijken natuurlijk overduidelijk. Als we eenmaal een goed model van een proces(eenheid) hebben, kunnen we in korte tijd effecten simuleren - nadoen dus - die in een echte fabriek te lang duren en vaak veel te gevaarlijk zijn om ze echt uit te voeren, zodat we veel beter weten waar de zwakke punten zitten en maatregelen kunnen nemen om deze te verhelpen tijdens het ontwerpen. Op dezelfde wijze kan later in de operationele fase de sturing en regeling verbeterd worden, omdat we de gevolgen van verandering al kennen vóór ze zich hebben voorgedaan.

Nog een ander aspect wil ik noemen: de kostenbesparing bij engineering. Dit voordeel, dat altijd erg de nadruk heeft gekregen, blijkt niet in overeenstemming met de feiten: het aantal engineering-uren per apparaat blijkt niet significant gedaald te zijn. Ook de kosten voor wat in de wandeling heet "home office services" lagen traditioneel ergens tussen 8 en 12 %, (afhankelijk van de complexiteit etc.) en ondanks het feit dat nu minstens een kwart van deze kosten computerkosten zijn, is het percentage even hoog gebleven. Een mogelijke verklaring is, dat de kwaliteit van het ontwerp is toegenomen - en de voordelen dus in een latere fase behaald worden - of dat de hele fabriek door het computergebruik scherper is ontworpen en daardoor een lagere investering vraagt.

Zo'n vergelijking is moeilijk. Het is als bij auto's: een auto van 1992 lijkt op 't eerste gezicht erg op één uit 1970, maar als je de motorkap optilt, dan vind je de motor nauwelijks terug tussen de vele verfijningen en verbeteringen die gezorgd hebben voor een lager benzineverbruik, een schoner uitlaatgas, beter remsysteem en het gebruik van een minder klopvaste benzine. En bij een chemische fabriek is het al net zo. Betere opbrengst, minder afvalstromen, betere en gelijkmatigere productiekwaliteit, minder materiaalkosten bij de bouw door betere specificatie en kwantificering en lager energieverbruik, om enkele gevolgen te noemen die ten dele te danken zijn aan computertoepassingen. Als voorbeeld methanol, een belangrijk chemisch bulkproduct, sinds 25 jaar in Nederland geproduceerd. De grondstof is aardgas en de energie, die bij het proces gebruikt wordt voor verwarming en compressie, wordt ook uit aardgas verkregen, zodat het totale aardgasverbruik per ton product een goede basis voor vergelijking is. In figuur 11 is dit verbruik, op basis van literatuurgegevens (■), tegen het jaartal uitgezet. o geeft de waarde van de Nederlandse fabriek, die uit eigen waarneming stamt; * is de stand van de techniek. En voor de hele chemische industrie geldt het analoog: dalend specifiek energiegebruik, mede dankzij de computer.



Figuur 11. Energieconsumptie Methanolfabrieken in de loop van de tijd

Onderwijs.

We willen, na dit intermezzo, de draad weer opnemen van het onderwijs in relatie tot veranderingen.

Het eerste ontwerp werd in 1923 gemaakt bij Waterman (gas uit kolen!) en het eerste college over ontwerpen in de Faculteit werd in 1948/ 1949 als b.o.-college gegeven door Heertjes. Ik wil een stukje uit de inleiding van dat college aanhalen; ik kan dat omdat Heertjes al zijn colleges opschreef voor zichzelf. Op zich is dat ook al een verandering: de generatie vóór Heertjes - zoals Waterman - had niets op papier staan en de generatie erna - de mijne dus - schreef het niet alleen op maar werd ook geacht het op schrift te distribueren. De volgende generatie zal wel videotapes beschikbaar stellen.

Heertjes begint zelf met een citaat: "In 1931 schreef Kerkpatrick: "Design comes first in the family of functions that define chemical engineering, It is the creative function of chemical engineers This grounding in the fundamental sciences of chemistry, physics and mathematics is after all the chemical engineer's greatest specific asset. It provides a logical approach to the problems of any business and a working procedure for applying new knowledge and principles to industrial practice"". Sinds 1931 is veel veranderd, maar deze uitspraak kon in 1948 aangehaald worden, zo goed als vandaag. Heertjes gaat dan verder met: "overziet men wat hier in Delft in dezen alzo gedoceerd wordt, dan kan de conclusie niet anders luiden dan dat aan het ontwerp - waarbij het creatieve inderdaad vastligt in de schets, de uitgewerkte tekening - niet veel gedaan wordt. Het fabrieksschema voldoet maar ten dele en ik wil enige punten nader belichten in het college, genoemd "het ontwerpen van chemische fabrieken". Een enkel woord moge nog gezegd worden over de tekening: wat muzieknoden zijn voor de componist, de taal voor de redenaar, is de tekening voor de scheikundig ingenieur, n.l. het middel om een gedachte over te brengen." Einde citaat.

De naam van het college werd in de loop der jaren verkort tot "Chemische fabriek" en de inhoud werd totaal gewijzigd, niet alleen omdat de chemische industrie en de hulpmiddelen, die een ontwerper ten dienste staan, veranderd zijn, zoals we zagen, maar ook omdat de methodologie zijn intree deed. Dit laatste is één van de doorbraken bij het ontwerpen, die koersverleggend zijn gebleken en iedere decade lijken op

te treden. Ik noem ze alleen; het is een persoonlijke keus en een motivering hiervan valt buiten het bestek van dit college.

-
- 1915 A.D. Little:
Unit operations als bindend element gedefiniëerd.
- 1925 McCabe-Thiele:
Fysisch-chemische benadering van scheidingen vervangen door een technologische.
- 1935 Damköhler:
Chemische reactiesnelheid gecombineerd met stroming en diffusie.
- 1945 Fysische transportverschijnselen als fundament voor het ontwerp.
(Chemical Engineering Science verschijnt: Kramers, Van Krevelen, Zuiderweg, auteurs eerste nr. 1950).
- 1955 Reactorkunde.
- 1965 Methodologie van het ontwerpen.
- 1975 Linhoff:
Pinch-technologie om energienetwerken te ontwerpen.
-

Figuur 12.

Maar niet alleen vakinhoudelijke veranderingen hebben hun invloed op het onderwijs; ook subjectieve opvattingen van de docent spelen - gelukkig - een rol. En bij een afscheidscollege mag met één van de kenmerken van wetenschap: objectiviteit, wel wat de hand gelicht worden en kan ik dus spreken over mijn visie op opleidingsaspecten van een technoloog (het oude woord voor scheikundig ingenieurs). Ik heb het al eerder gehad over de verschillen tussen ontwerpers en onderzoekers en ik heb mij dan ook nooit erg ingelaten met geformaliseerd onderzoek, tot verbazing van velen, die het primaat van het onderzoek aanhangen en dat ook als maatstaf bij hun oordeel hanteren. Maar een ingenieur is "niet iemand die wetenschap doet, noch iemand die wetenschappelijke bevindingen toepast, maar iemand die op behoeft Patronen inhaakt en problemen oplost met behulp van een technische aanpak of constructie, die bij voorkeur op een wetenschappelijke ontwikkeling berust". Voor alle duidelijkheid: dit is een citaat, dat ik overigens onderschrijf. Niet dat ik onderzoek niet belangrijk zou vinden - verre van dat, veel vernieuwingen en verbeteringen vinden hun grondslag in nieuwe kennis - maar omdat in een organisatie niet iedereen hetzelfde moet doen. Juist door taakverdeling, waarbij ieder zijn eigen sterke kanten uitbuit, ontstaat er een synergie, die de output groter maakt dan de som, zoals destijds Taylor al bewezen heeft en nog dagelijks valt waar te nemen. In deze opvatting vond ik onlangs ook ondersteuning in de afscheidsrede van Dr.Ir. B. Okkerse als Directeur-Generaal Wetenschapsbeleid (8), maar in de TU is men doorgaans een andere mening toegedaan, waardoor b.v. uitstekende, maar onderwijsgeoriënteerde medewerkers geen universitair hoofddocent - let U vooral op dat woord "docent" - kunnen worden omdat ze te weinig onderzoek doen.

Er zijn nog andere voorbeelden van onderwijsvriendelijkheid te noemen, doch die zal ik verder laten rusten (9). Gelukkig heeft de huidige Dekaan van STM in zijn nieuwjaarsrede 1991 opgemerkt, al was het een citaat en geen faculteitsstrategie: "hoe belangrijk onderzoek ook is, men komt tot het inzicht dat onderwijs toch de belangrijkste component in de opleiding van jonge mensen is". Einde citaat.

Bovendien beschouw ik afgestudeerde ingenieurs als ons product en niet de onderzoekresultaten. Het doen van onderzoek is één van de middelen om een kwaliteitsborg te kunnen geven van afgestudeerden maar in de technische wetenschappen zeker niet het bepalende, noch het enige. Wellicht speelt in deze zienswijze een rol dat voor mij een goede ingenieur zich steeds afvraagt wat hij nodig heeft aan kennis en kunde om zijn doel te bereiken en dat dan ook beheerst tot in de toppen van zijn vingers; niet wat uit wetenschappelijk oogpunt interessant is. Bovendien is hij niet puur technisch omdat hij in de beroepsuitoefening met andere disciplines of aspecten te maken heeft, die bepalend voor succes zijn.

Ik wil er een drietal noemen en ik kies deze omdat drie chefs, die ik in mijn industrietijd heb gehad, ieder de nadruk op een ander aspect legden en alle drie waren ingenieur.

Het eerste is het leren samen te werken met anderen, zodat van samenwerking kan worden gesproken: de synergie. Dit was de les van Ir. Bosma, mijn eerste directeur, de latere voorzitter van het VNO, naar velen van U zich nog zullen herinneren.

De tweede les kwam van Ir. Douwes, later directeur van de NVCP. Hij maakte duidelijk dat de techniek de meeste zaken wel kan realiseren, maar dat alleen marketing kan vertellen wanneer en waar aan wat behoefte is of zal ontstaan en wat dus gemaakt moet worden.

En ten slotte bracht Rip Smalley, een Amerikaan, me bij dat bij iedere technologische mogelijkheid of voorstel tot technische realisatie onverbrekkelijk een "justification" hoorde, anders gezegd: is het-al dan niet financieel-gerechtvaardigd.

Ik heb steeds getracht naast de technologie deze elementen in het onderwijs te integreren en heb onderzoek als onderwijsmiddel aan collega's gelaten. De afgelopen jaren zijn er een kleine duizend ontwerpen gemaakt, gemiddeld één per week, op zeer uiteenlopende gebieden: van aspartaam tot zwavelzuur, van asverwerking tot het Zoselproces.

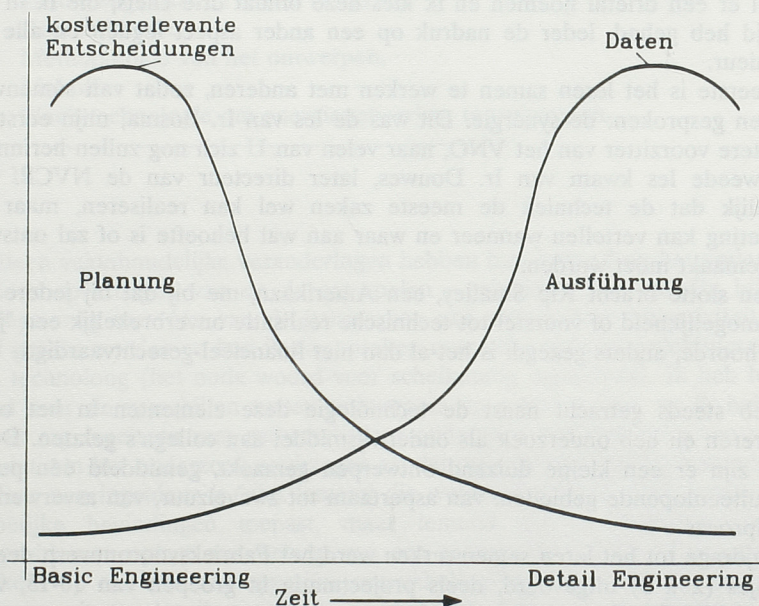
Als bijdrage tot het leren samenwerken werd het Fabrieksvoorontwerp deels in kleine groepjes (2 á 3) uitgevoerd, deels projectmatig in groepen van 10-15, waarbij ook werktuigbouwkunde-studenten meededen.

Het samenwerken van studenten uit verschillende faculteiten blijkt stimulerend en blikverruimend te werken. Het lijkt wenselijk ook de ertstechnologen uit de Faculteit der Mijnbouwkunde en Petroleumwinning hierin te betrekken.

Het marktaspect was in het college opgenomen en kreeg de laatste jaren extra nadruk in het werkcollege Procesmanagement, dat in belangrijke mate aan industriële marketing gewijd was en dat niet van de grond was gekomen zonder medewerking van de EUR en de industrie. Overigens werd dat college opgezet omdat er van studentenzijde vraag naar was, een directe illustratie van het onderwerp. En niet

alleen studenten hebben hiervoor belangstelling, ook de industrie is geïnteresseerd in het slaan van een brug tussen techniek en research enerzijds en marketing anderzijds. Ik noem slechts de namen van Hanson (10) en Van der Grinten (11), die hierover onlangs gepubliceerd hebben.

En ten slotte het bijbrengen van kostenbesef, destijds hier gestart bij Werktuigbouwkunde door de apparatenbouwcollega Ir. E. Boon. De duurste installatie door studenten als fabrieksvoorontwerp ontworpen moest 250 Gfl. gaan kosten; op dat moment even veel als het totale B.N.P., en dit maakt duidelijk dat gevoel voor kosten en baten geen overbodige luxe is. Fig. 13 maakt duidelijk dat beslissingen, die met kosten te maken hebben, juist in de basic engineering worden genomen, waar technologen de grootste rol spelen. 75-80 % van de kosten van de fabrieksinstallatie worden in deze fase - zij het voor een deel indirect - vastgelegd; kostenbesef is dus inderdaad geen luxe maar noodzaak (14).



Figuur 13. Häufigkeit von Planungsentscheidungen und Menge der zu verarbeitenden Daten in Abhängigkeit von der Planungszeit

Aan de hier genoemde aspecten werd slechts een deel van de collegestof besteed - neerkomend op minder dan 1 % van de totale studiebelasting - en in totaal 5 % aan procesontwerpen, in mijn ogen het minimum in de 4-jarige opleiding. Voor meer is echter geen plaats en zo komen we in de 2de fase-opleiding terecht: de TWAIO-opleiding, de tweejarige postdoctorale vervolgoopleiding.

De TWAIO-opleiding.

Enkele opmerkingen in dit verband kunnen niet achterwege blijven, gezien mijn bemoeienis van de afgelopen jaren. Ik ben nog steeds van mening dat de overgang van de nominaal 5-jarige opleiding naar de 4-jarige, nu 10 jaar geleden, niet alleen onvermijdelijk was (politiek door geldgebrek en door groeiende studentenaantallen), maar ook gewenst was door het verlangen van het bedrijfsleven naar een jeugdiger intree van de afgestudeerden, mits de mogelijkheid voor een verdergaande vorming gecreëerd zou worden voor een gedeelte van de studenten. Er wordt de laatste tijd van verschillende kanten, o.a. het KIVI, bezwaar gemaakt tegen de 4 jaar; het zou eigenlijk 5 jaar moeten zijn. Maar in 4 jaar is het mogelijk om zeer bruikbare ingenieurs af te leveren voor functies, waarvoor deze opleiding adequaat is; en dat kan gesteld worden op ten minste de helft van alle functies waar onze afgestudeerden emplooi vinden. Trouwens, de ETH in Zürich, toch niet de minste technische opleiding, heeft sinds jaar en dag een 4-jarige cursusduur. Dat studenten er nu 5,6 jaar over doen zegt meer over het optimaliseringsvermogen van studenten dan over de effectieve studieduur.

En het is toch dwaasheid, gezien de middelen, alle studenten tot een hoger niveau op te leiden als het maar voor ongeveer de helft nodig is! We ontwerpen toch ook geen installatie voor uitsluitend polymer grade (99 %) propyleen als we weten dat in de helft van de gevallen 93 % voldoende is?

Maar duidelijk is ook dat er na de 4-jarige opleiding voor een groep studenten een vervolg noodzakelijk is en alhoewel dat vanaf het begin ook de bedoeling is geweest, heeft het toch 10 jaar trekken gekost voor de structuur en financiering enigszins op poten kwamen te staan.

Vooruitlopend op deze structuur en financiering is de Faculteit in 1986 - zonder financiering door het Departement - begonnen met een eenjarige vervolgoopleiding Proces- en Apparaatontwerpen. Dat dit gebeurd is in samenwerking met de Faculteiten der Mijnbouwkunde en Petroleumwinning en die der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, stemt tot voldoening, omdat hiermee ook naar buiten toe duidelijk wordt gemaakt dat alle technologen uit hetzelfde hout gesneden zijn en hiermee tevens de, historisch verklaarbare maar inhoudelijk onlogische, opdeling van het vakgebied over meerdere faculteiten doorbroken wordt.

Omdat landelijk verder voor een tweejarige opleiding werd gekozen en de certificeringsprocedure geen ruimte laat voor een eenjarige opleiding, is de cursus in 1990 ook verlengd tot 2 jaar. Ik beschouw dat nog steeds als een niet-effectieve verandering, een voorbeeld van de verminderende meeropbrengst. Ik zal dat zo nog wat nader toelichten. De indeling op het hoogste niveau van deze groep afgestudeerden in Europees verband zou wrijvingsloos verlopen zijn en de industrie zou een jaar langer, maar vooral een jaar eerder, de beschikking hebben gehad over de denkkracht van deze 5-jarige ingenieurs. Maar het heeft geen zin te treuren over gemorste melk en de 2-jarige opleiding biedt natuurlijk meer ruimte voor niets specifiek technische aspecten.

Het zal U tenslotte niet verbazen dat ik de visie van de positie van de TWAIO-opleidingen van de TU-Eindhoven ten volle onderschrijf. Ik citeer (13): "Het is duidelijk dat goede ontwerpersopleidingen zoals het Nederlandse bedrijfsleven die wenst, breed van opzet en oriëntatie moeten zijn en multidisciplinair van karakter. Dergelijke kenmerken zijn voor een onderzoekschool waar het accent juist op een gespecialiseerde, subdisciplinaire benadering ligt, in het algemeen eerder bedreigend dan kwaliteitsverhogend. Ontwerpersopleidingen kunnen daarom niet in een onderzoekschool worden ondergebracht".

Toch moet de meerwaarde van de tweede fase niet worden overschat, net zo min als de aantrekkelijkheid er van voor studenten.

Laat ons met de aantrekkelijkheid voor de student beginnen. De TWAIO investeert 2 jaar in die opleiding en hij wil toch financieel ten minste quitte spelen met een eerste fase-ingenieur. Hij heeft mijn college over cost engineering gevolgd en zal dus zijn investering - het salarisverschil gedurende deze 2 jaar - kapitaliseren en vervolgens als annuïteit over zijn toekomstige 38-jarige loopbaan berekenen; het is alsof hij het verschil in salaris nu bij de bank leent en de bank in 38 jaar terugbetaalt. De uitkomst is dat hij gedurende zijn hele carrière ca. 9 % van het startsalaris per maand meer moet verdienen dan zijn eerste fase-collega en dat terwijl hij ook nog 2 jaar later in dienst is gekomen. Zijn meerwaarde moet hier nog bovenop komen en hij plaatst een vraagteken bij de investering.

Voor de werkgever zijn dit meerkosten en de vraag is wat de meerwaarde is. Om dat te schatten stellen we een model op en we beperken ons tot de vakkennis-aspecten, een vereenvoudiging om het niet té ingewikkeld te maken. We doen ook enkele aannames: een eerste fase-student werkt 80 % van de norm-studietijd van ongeveer 1700 uur/jaar en doet dus 5 jaar over de studie. We nemen verder aan dat een student per jaar een bepaalde hoeveelheid kennis kan opnemen, voor alle studie jaren gelijk, en noemen dit het bevattingsvermogen B en dat zijn vakkennisniveau als hij aankomt gelijk nul is. Verder vergeten studenten zaken, net als ieder ander (laat de gymnasiasten onder U maar eens nagaan wat ze nog van Grieks weten) en wordt sommige kennis achterhaald. We stellen dit op 10 %/jaar voor technologen, en dat is laag want in de literatuur wordt gesproken over halfwaarde tijden van 5 jaar, overeenkomend met 15 %/jaar.

Als we de totale kennis nu K noemen, dan is de kennistoename per tijd dK/dt gelijk aan het saldo toe- en afname en ziet het model er zo uit:

$$dK/dt = 0,8B - 0,1K$$

en dit levert na 5 jaar een ingenieurskennis $K_1 = 3,2 B$.

Hij wil die kennis op peil houden, d.w.z. $dK/dt = 0$ vanaf zijn afstuderen, en vraagt zich af hoeveel tijd hij daarvoor nodig heeft (wetende dat het minder zal zijn dan de 80 % tijdens zijn studie) stel x %:

$$0 = xB - 0,1K_1 = xB - 0,32 B \quad x = 0,32 \text{ of } 32 \%$$

Het aardige, en voor sommigen wellicht onverwachte, van deze uitkomst is, dat iedere ingenieur - van bolleboos tot zwakke broeder - meer dan 30 % van zijn tijd, dus zo'n 500-600 uur per jaar, moet besteden om bij te blijven, de "éducation permanente". Ieder die dit niet doet, ligt vaktechnisch achter op de nieuw binnenkomende net afgestudeerden!

Op dezelfde wijze kan berekend worden dat de TWAIO, die start met K_1 , na 2 jaar $K_2 = 1,31 K_1$ zal bereiken (als hij, zoals voorgeschreven, 75 % van zijn tijd heeft besteed aan vakkennisverrijking) dus 31 % en niet 50 % meerwaarde, zoals de 50 % langere studieduur doet vermoeden: de verminderde meeropbrengst. Hij heeft dus een duidelijke meerwaarde, maar als hij de resterende 38 jaar, net als zijn collega 1ste fase, ook 32 % van zijn tijd aan bijblijven besteedt, dan is zijn gemiddelde meerwaarde maar 8 % en dus vergelijkbaar met de meerkosten van 9 %, zoals we al zagen. De TWAIO moet immers om zijn grotere kennis op peil te houden, meer tijd daaraan besteden; zo'n 4 uur per week extra en pas dan houdt hij ook zijn aanzienlijke meerwaarde. Ik wil geen conclusies trekken; dat laat ik aan U over en het blijft een model, een abstractie van de werkelijkheid.

Tenslotte nog een laatste opmerking in dit raamwerk. Ik heb eerder aangegeven dat er veel is veranderd. Maar de nu 120 jaar oude 27ste stelling uit het proefschrift van Van 't Hoff geldt nog onverminderd voor TWAIO's:

XXVII.

Het studeren aan verschillende Universiteiten is zeer nuttig, en wordt in Nederland veel te weinig gedaan.

Ik ben nu aan het einde gekomen van het college dat alle sporen van een ontwerp draagt: het is een nieuwe combinatie van bestaande kennis, vandaar de vele citaten van collegae uit andere faculteiten, het had een doel en het is gerealiseerd.

Rest nog een woord van dank aan allen, die plezierig werken hebben mogelijk gemaakt. Dat geldt allereerst studenten, het product waar het om draait - alhoewel sommigen wellicht met minder plezier denken aan hun ontwerp - die je dwingen mee te denken en alert te blijven. Daarnaast medewerkers van de TU. Met de namen: Meijer, van den Ham en Verheijen wil ik alle anderen tevens danken voor alles wat ik van ze heb geleerd.

Ook het bedrijfsleven mag in dit verband niet onvermeld blijven. In nagenoeg alle afstudeer-, TWAIO- en G-opdrachten was er een hechte en in mijn ogen onmisbare samenwerking, waaraan ik met dankbaarheid terugdenk.

En, lest best, het thuisfront dat het fundament vormt; zonder dat wordt een ontwerp op zijn best een toren van Pisa; maar als U denkt dat ik thuis de koffie zet, moet ik U teleurstellen, want zei Shaw ("Men and supermen") al niet: "He, who can, does, he who cannot, teaches"?

Ik dank U voor Uw aandacht.

Wassenaar, november 1991.

1. Ir. C.M. van den Bleek, Inaugurele rede TUD 1991.
2. Ir. B.B. Schierbeek, Inaugurele rede TUD 1991.
3. C.H. Vervalin, Hydrocd.Proc., augustus 1990, blz. 87.
4. Ir. E. Obert, Inaugurele rede 1990.
5. Dr. J. Eekels, Inaugurele rede 1980.
6. Budford D. Smith, Chem.Eng., 6 mei 1968, blz. 177.
7. Ir. K. d'Angremond, Inaugurele rede 1990.
8. N.R.C., 31 oktober 1990, blz. 7.
9. Strategieplan 1993, Faculteit STM.
10. Economist, 15 juni 1990, blz. 74.
11. Dr.Ir. P. van der Grinten, Ned.Chem.Ind., 3 juni 1991.
12. H. Schmidt-Traub, Chem.Eng.Techn. 62 (1990), blz. 375.
13. IVO Magazine TUE, november 1991, blz. 8.
14. M. Streich, Chem.Eng.Techn. 63 (1991), blz. 335.

