

DE WEG REIKT VERDER DAN DE HORIZON

DR. G. FRENS

782718/21.02.02

Rede
DE WEG REIKT VERDER
DAN DE HORIZON

Rede, uitgesproken bij zijn emeritaat als gewoon
hoogleraar in de fysische scheikunde aan de
Technische Universiteit Delft, op 1 november 2002 door

DR. G. FRENS



De Weg reikt verder dan de Horizon

"De weg reikt verder dan de horizon". Zo heb ik met de titel van deze afscheidsrede een idee verwoord, dat is verbeeld in het schilderij "*The road to enigma*" ("De weg naar het onbekende"). Het is gemaakt door Salvator Dali in 1984 en hier geprojecteerd als een virtueel verlengstuk van de Aula.

Op dat schilderij strekt zich een pad uit dat naar verre verten voert. Het pad zelf is on-perspectivisch ingetekend: het wil niet in de horizon verdwijnen. Het loopt daar voorbij, naar een onbekend terrein dat niet in ons perspectief past. Maar gelukkig ziet het er naar uit dat ook daarginds de zon zal schijnen.

Bij de universiteit zitten we ook op zo'n pad. Op het eerste gezicht lijkt het hier een overzichtelijke baan, gemarkeerd, met kennispakketjes als mijlpalen. Met tentamens, examens, tijdschriftartikelen en proefschriften. We rapen daarvan op wat van onze gading is en dragen dat mee op onze weg. Als we eenmaal de horizon van de universiteit overschreden hebben – bijvoorbeeld na het ingenieursexamen - zal wel blijken wat we hebben aan onze bagage uit Delft

Kortzichtig is het om naar een universiteit te kijken als een productiebedrijf dat "Masters" aflevert en publicaties afscheidt. Dat is een waan van de dag, die de voorstellingen over universiteiten bepaalt bij politici en bij "beroeps" bestuurders. Zij proberen onze universiteit in hun greep te krijgen door de prestaties van de organisatie te volgen. Ze te laten turven, van dag tot dag. Die "managementinformatie", wordt, puntje voor puntje, in geldbedragjes vertaald en ons toegeworpen. Zo wordt gestuurd vanuit een vernauwd perspectief. Alle lijnen eindigen precies bij de horizon van het universiteitsbedrijf. Zonder aandacht voor de gevolgen van die kortzichtigheid nu in de samenleving later. Want die samenleving is in een dergelijk perspectief volledig achter de horizon gezakt en uit zicht geraakt.

Maar de maatschappelijke ontwikkelingen staan niet stil daarginds. Er komen nieuwe uitdagingen en problemen op ons af, die om nieuwe, technische oplossingen vragen. Ingenieurs zijn er om zulke oplossingen te ontwerpen. Daar zijn ze voor opgeleid, dat is hun vak. Als zij zoeken gaan naar nog onbekende antwoorden, dan zal aan het licht komen wat hun opleiding ze heeft meegegeven. Of ze uit Delft de juiste houding en de goede kennis hebben meegebracht.

Een wissel op de toekomst

Door haar geld te steken in een universiteit, in de opleiding van steeds nieuwe generaties ingenieurs, trekt de maatschappij een wissel op de toekomst. Op haar eigen toekomst en op de onze. Als de talenten aan ons worden toevertrouwd, dan moeten we daar mee woekeren. Want die weg naar de toekomst reikt echt verder dan onze dagelijkse horizon.

Stel we willen Nederland droog houden, ook als de zeespiegel blijft stijgen. Wat zou dan de beste aanpak zijn? De dijken verhogen, het broeikas-effect onderdrukken, of misschien toch maar God's water over Hollands onrendabele polderhart laten lopen. De Moerdijkbrug ophalen en ons aansluiten bij het Koninkrijk der Belgen.

Vandaag zijn dit nog "academische" kwesties met een hoog stamtafelgehalte. Je kunt er over praten, maar kiezen uit de alternatieven hoeft je niet. Toch ben ik er bijna zeker van dat de volgende generatie ingenieurs, die nu aan onze T.U. worden opgeleid, te maken krijgt met Holland's problemen rond de stijgende zeespiegel en het dalende maaiveld. Maar dan als ontwerpkeuzes tussen concrete alternatieven. En zij zullen het probleem moeten oplossen ook. Anders gebeuren er ongelukken.

Uit Delft komt een historische spreuk, die geschikt zou zijn als motto voor onze Technische Universiteit. Ze staat niet op ons briefpapier gedrukt, maar in steen gebeiteld op de Afsluitdijk: "*Een volk dat leeft bouwt aan zijn toekomst*". Met dit pathos zouden we dat vandaag de dag misschien niet meer zeggen.

Maar het is wel de opdracht die dat volk ooit aan onze universiteit heeft meegegeven. Te bouwen aan zijn toekomst. Er wordt op ons gerekend, daar voorbij de horizon.

Chemische Technologie

Chemische technologie is voor ons een middel om aan die opdracht te werken. Chemische technologie is een kunst die door ingenieurs bedreven wordt. De kunst om de stoffen en materialen te maken waar de maatschappij op draait. U mag van mij dat woord "draaien" letterlijk nemen: motoren en de turbines in elektriciteitscentrales draaien alleen als daar brandstof voor is. Maar ook figuurlijk. Zonder plastics en de pil, zonder kunstvezels, aluminium, beton en aspirine, en zonder wasmiddelen om alles weer schoon te krijgen zou de wereld rondom ons er heel anders, maar beslist minder vrolijk uitzien. En toch verder moeten draaien.

De kunst van de chemisch technologen is om zonder al te veel verspilling van grondstoffen en energie een onvoorstelbaar grote stroom producten te fabriceren. Om zo onze samenleving draaiend te houden met zo min mogelijk verkwisting van arbeid en geld. Maar denkt U ook niet dat dat beter zou moeten kunnen? De tweede hoofdwet van de thermodynamica zegt dat er onvermijdelijk verliezen zullen zijn als we iets willen maken. Maar in het vak dat daar op volgt – ons keuzevak over verloop en stabiliteit van (irreversibele) processen – leren we dat de grootte van die verliezen afhangt van de gekozen manier van werken. Door onze eigen manier van werken wordt het milieu bedreigd, de bodem uitgeput en de prijs van energie en grondstoffen steeds hoger. Als we op dezelfde manier doorgaan en de tegenwoordige stand van de techniek meenemen over de horizon heen, dan staat ons nog een barre toekomst te wachten.

Dat zei de "Club van Rome" indertijd. En dat was fout. In hun "World Dynamics" simulatiemodel werd er geen rekening mee gehouden dat de stand van de techniek berust op technologische en economische keuzes. Oude keuzes die toen

door ingenieurs gemaakt werden bij het ontwerpen van de productieprocessen. En dat de ontwikkeling van de techniek ons in staat stelt om in andere omstandigheden andere, meer passende en elegantere alternatieven te kiezen.

Een autonome drijvende kracht voor technische vernieuwing is wetenschappelijk onderzoek. Onderzoek aan de fundamenteën waar de chemische technologie op gebaseerd is. In onze groep, het Delftse Laboratorium voor Fysische Chemie, wordt zulk onderzoek gedaan. Het heeft zich nu al meer dan een decennium gericht op grensvlakverschijnselen.

Dat was voor een belangrijk deel mijn schuld. Dus vandaag, bij mijn afscheid, mag mij gevraagd worden of we daar wat mee opgeschoten zijn. Hebben we vanuit dat onderzoek iets te melden dat bijdraagt tot toekomstige ontwikkelingen in de chemische technologie? Ik denk van wel.

Grensvlakverschijnselen staan al centraal in de heterogene katalyse, bij meerfasenprocessen en in scheidingsmethoden. Ze worden ook steeds belangrijker voor het ontwerpen van kwaliteitsproducten. Want deeltjes en dispersies zijn in praktische situaties veel hanteerbaarder dan vaste materialen, vloeistoffen en gassen.

Grensvlakscheikunde

Ook wetenschappelijk is de fysische chemie van grensvlakken iets speciaals. Scheikunde gaat over de opbouw van de materie uit atomen en moleculen. Maar chemie omvat meer. Eigenlijk is voor chemisch technologen de interactie van moleculen met elkaar en met hun omgeving het interessantste. En in een grensvlak zijn moleculen die tot verschillende stoffen behoren tot elkaar veroordeeld als naaste buren. Die interactie vinden ze nergens behalve aan het grensvlak. En ze worden daardoor heel actief. Een grensvlak betekent een extra dosis energie in het systeem. Thermodynamisch eigenlijk extra vrije energie, maar sorry, dat maakt in ons betoog geen verschil.

In een dispersie, kleine deeltjes ingebed in een andere stof, hebben we veel grensvlak. En waar veel grensvlak is zal ook

veel extra grensvlakenergie beschikbaar zijn. De grensvlakenergie in allerlei disperse systemen zorgt voor herkenbare, eigen-aardige verschijnselen en eigenschappen. Over dat onderwerp, en speciaal over de industriële toepassingen daarvan, geven wij al sinds jaar en dag colleges aan studenten en postacademische cursussen voor de industrie. Boter is een dispersie. En margarine is ook een dispersie, waarbij met industriële processen geprobeerd wordt om de eigenschappen van het andere, oorspronkelijke product zo goed mogelijk te evenaren – zo niet te overtreffen. Uitgaande van volslagen andere grondstoffen: met palmolie in plaats van melk. Dat lukt ook. Smeerbaarheid bij lage temperaturen en het “smelten op de tong” om de smaak te ontsluiten hangen niet van de verschillende samenstelling af. Dat soort eigenschappen dankt het product, net als de meeste voedingsmiddelen, aan de grensvlakenergie die in een dispersie voorhanden is.

In ons Laboratorium werd vanmorgen, niet geheel toevallig, een internationaal minisymposium over dat onderwerp gehouden. Drie hooggeleerde sprekers gaven hun visie op “Industrial Dispersions”. Ik heb er van genoten. Vandaag hebben velen van ons weer inspiratie en ideeën opgedaan voor nieuwe mogelijkheden van grensvlaktechnologie.

Het principe van de kleinste dwang

De “wetten” van Kelvin, Laplace, Hamaker, Young en Gibbs beschrijven vijf verschillende manieren waarop een grensvlak in evenwicht kan zijn met zijn omgeving. Je zou ook kunnen beweren dat de natuur vijf verschillende mechanismen, vijf “trucs” aanbiedt om die respectievelijke evenwichtstoestanden te bereiken. Altijd volgt het systeem daarbij de snelste weg naar energieverlaging, en komt dan niet noodzakelijk uit in het diepste, thermodynamisch voordeligste energiminimum.

Een van die trucs is adsorptie, waarbij de vrije energie geminimaliseerd wordt via het herverdelen van de verschillende molecuulsoorten tussen het grensvlak en

aangrenzende stoffen. Wordt het evenwicht in het grensvlak verstoord, omdat links of rechts iets veranderd wordt, dan neemt de vrije energie toe. Het systeem verzet zich daar tegen uit al zijn macht, en probeert met inzet van de extra grensvlakenergie de verstoring te repareren. Als fysisch-chemische nazaten van Nederland's eerste Nobelprijswinnaar, J.H. van 't Hoff, Delfts alumnus, herkennen wij meteen het "principe van de kleinste dwang".

De grootte van de verstoring wordt beperkt door de reactie die ze in het grensvlak oproept. En diezelfde truc - hadden wij bedacht - zou ook technologisch bruikbaar zijn. Om het verloop en de stabiliteit te beïnvloeden van processen die het evenwicht aan een grensvlak proberen te verstoren. Zo'n proces zou een chemische reactie kunnen zijn die aan het oppervlak van de katalysator verloopt. De reactiesnelheid wordt bepaald door de temperatuur en de druk, en verder door de mate waarin voldoende reagerende moleculen beschikbaar zijn. Die moeten, stuk voor stuk, uit de voorraad in de omgeving aangevoerd worden door diffusie. Daardoor verschilt hun beschikbaarheid van plaats tot plaats in het grensvlak. De weg via de poriën van de katalysatordrager is lang. En op verschillende plekken zijn dode hoeken in de geroerde reactor. De schaarste bepaalt de reactiesnelheid. Van plaats tot plaats.

In evenwicht zou de beschikbaarheid van de reactant-moleculen een gegeven zijn dat volgt uit de adsorptie volgens de Gibbs-vergelijking. Maar dat gaat niet op wanneer die moleculen door de chemische reactiesnelheid omgezet worden en aan het evenwicht onttrokken. Het hangt er maar van af of het evenwicht zich dan herstellen kan. Dat ligt aan de snelheid van het herstel. Heel het systeem zou in actie willen komen om de verstoring te repareren. Maar het is onzeker of dat snel genoeg gebeurt.

We kunnen echter een adsorptiemechanisme kiezen zodat de aanvoer van grondstoffen sneller is dan de reactie kan lopen die het evenwicht aan het grensvlak verstoort. Dan loopt die

reactie overal in het grensvlak op haar maximale snelheid door en wordt nergens meer geremd door beschikbaarheid van reactanten. Door koppeling met het adsorptieevenwicht is een stabiliserende conditie in het mechanisme ingebouwd. De reactiesnelheid van alle hoofd- en nevenreacties is met een extra randvoorwaarde vastgelegd en constant.

Extreme Control

Toepassing van dit door fysisch chemici bedachte concept heet in de procesregeling "extreme control". Het komt er op neer dat de tijdconstante van de processen ingesteld wordt door koppeling van het proces aan evenwichten die zich krachtig weren tegen verstoring.

Door ons Laboratorium is deze strategie toegepast op ingewikkelde grootschalige processen. En met succes. Bij het smeren van de walsoppervlakken in de staalfabriek en bij het terugwinnen van warmte en surfactants uit een vervuilde procesvloeistof. We zijn trots op deze stappen, gezet vanuit een nieuw perspectief voor technologische ontwikkeling.

Chemisch technologen hebben natuurlijk altijd gestreefd naar hoge opbrengsten en efficiënte productieprocessen. Dat streven is zo oud als de procesindustrie zelf. Het wordt meestal niet gedreven door wetenschappelijke argumenten maar door de motor van de rentabiliteit. Een grote chemische fabriek in de Botlek, aan de Moerdijk, in Gelsenkirchen of Terneuzen levert heel veel afvalwarmte op en grote afvalstromen. Maar vooral ook heel veel product, laten we dat niet vergeten. Het product dat we niet terugzien omdat het met tankwagens of door pijpleidingen aan de afnemer of verwerker afgeleverd wordt. Afvalstromen, afvalwarmte zijn in wezen ook producten, bij-producten van de technologie. Alleen niet de gewenste. Je blijft daar mee zitten in de fabriek en moet geld uitgeven om ze kwijt te worden. Dat is jammer en dat is kostbaar.

Als ingenieurs er in zouden slagen om uit dezelfde grondstoffen en met evenveel arbeid ("exergie") meer van een beoogd product te maken, dan is dat dubbele winst:

economisch en ecologisch. Die strijdkreet heeft collega van den Akker aangeheven. Hij is voorzitter van de OSPT, de landelijke onderzoeksschool voor de procestechnologie. Bij goede technologie, zegt hij, moet je om winstgevend te werken zo zuinig mogelijk omgaan met grondstoffen en energie. Goede technologie is dus van nature "groene" technologie. En betere technologie zal winstgevender zijn naarmate ze groener is. We krijgen meer waar voor ons geld. En per eenheid product wordt minder energie verstoekt en blijft minder afval over.

Zijn "Groene Manifest" is als uitgangspunt aanvaard voor het wetenschappelijk programma in OSPT-verband waar ons Laboratorium in deelneemt. Hier zijn echt nieuwe ontwikkelingen aan de orde, en nieuwe strategie om, voorbij de horizon, een duurzamer samenleving te realiseren. In die strategie past het concept van "extreme control". De opbrengsten van chemische procestechnologie worden kwalitatief en kwantitatief verbeterd door ze met grotere precisie in de richting van het theoretisch haalbare te sturen.

Verblijftijd en verblijftijdsspreiding

Om een chemisch productieproces te volgen moeten we denken vanuit de proces-stroom. Dat is de materiaalstroom door de procesinstallatie. Op die processtroom worden een voor een verschillende processtappen losgelaten, die de grondstoffen stap voor stap transformeren in het eindproduct. Voor elk soort stap zijn speciale apparaten ontworpen. We beschikken over batch- en buisreactoren, over statische mixers en geroerde tanks, over extractietorens en destillatiekolommen. Die worden op maat gemaakt, zodat de processtroom iedere behandeling voor een vaste, optimale tijd zal ondergaan. Die optimale tijd voor iedere processtap of "unit operation" heet de "verblijftijd".

De processtromen in een chemische fabriek zijn zeer groot. Dat bepaalt, samen met de verblijftijd, hoe groot de installaties moeten zijn. Heel groot, dat weet U waarschijnlijk allemaal

wel. Het is een hele kunst om apparaten van die schaal te ontwerpen en te bouwen. We zien chemische fabrieken al van verre opdoemen aan de horizon. Met reactievaten van tientallen m³ inhoud en scheidingskolommen hoger dan kerktorens. Bijgelicht door fakkels van brandend afvalgas.

Bij zulke afmetingen kan het haast niet anders of de processtroom gaat door iedere unit operation met een soort gemiddelde verblijftijd. Soms is de verblijftijdsspreiding groot en in andere unit operations juist relatief klein. En onder andere die spreiding bepaalt de uiteindelijke mix van hoofd- en nevenproducten, van opbrengst en afval na het proces.

Zouden we verblijftijd en verblijftijdsspreiding beter in de hand hebben, dan was een grotere precisie in de procesvoering mogelijk. Collega Coppens ontvouwde in zijn intreerede, nu drie weken geleden, plannen in die richting. Grotere precisie in dienst van optimalisering van de zuivere opbrengst, ondanks de gegeven grootte van de apparaten. Ook hier loopt een weg die moet voeren naar een groter economisch rendement door geringere verliezen. Want in de procesindustrie heerst de tucht van de markt. Het is zinloos met grotere precisie te werken als het product daar duurer door wordt.

Het lied van Deborah

Misschien past, juist in een afscheidsrede, wel een profetisch woord. Hoewel, men zegt dat daar in eigen land toch slecht naar wordt geluisterd. Betere technologie, zou ik willen verkondigen, wordt bereikt door kwaliteitsverbetering van het Deborahgetal in de processen. De afleiding van dat dimensieloze kengetal vindt U in het bijbelboek Richteren (5 : 5). De technologisch bruikbare definitie van het Deborah number staat in Physics Today (17 : 62). Het Deborah number is gedefinieerd als de verhouding van twee karakteristieke tijdschalen: die van het experiment en die van het optredende verschijnsel. In de chemische technologie zijn dat de verblijftijd in een unit operation en de snelheid van de omzetting. Je kunt door een juiste keuze van die verhouding de

uitkomst van een proces beïnvloeden. Is de verblijftijd te kort dan gebeurt er niets, maar is de verblijftijd te lang dan krijgen allerlei tragere nevenverschijnselen een kans.

Verblijftijdsspreiding – die zoals we zagen karakteristiek is voor de uitvoering en de schaal van de installatie – moet daarom veel preciezer in de hand gehouden worden dan nu mogelijk is. En de snelheid van de moleculaire omzetting kan door extreme control op een vaste waarde worden gefixeerd. Precisietechnologie wil ik definiëren als de chemische techniek met een scherp beheerst en geoptimaliseerd Deborah number.

Langs die weg kunnen we afvalstromen, milieuvervuiling en energieverbruik gaan terugdringen tot de marginale proporties van het theoretische minimum $\sum_i (J_i X_i)$ betrokken op de gewenste productiestroom J_i . Zulke resultaten van de technologische aanpak zullen niet worden afgedwongen met wetten, regels en richtlijnen. De onzichtbare hand uit de economie, de “marktwerking”, zal de chemische industrie op dit pad leiden. Betere technologie zal uiteraard rendabeler, maar ook groener uitvallen.

Vandaag vinden we dat misschien nog een ver verwijderd ideaal, dat ergens verborgen ligt achter de horizon van de bestaande technische mogelijkheden. Maar we zijn hier in Delft, in DelftChemTech, door onderzoek en door ons onderwijs aan een nieuwe generatie technici het nieuwe perspectief aan het verkennen. Met Deborah's getal als richtsnoer, en met “extreme control” als werkzame aanpak, worden de lijnen naar de precisietechnologie steeds duidelijker voorbij die horizon getrokken.

Ons eigen werk

En nu wordt het toch wel eens tijd om met echte onderzoekresultaten voor den dag te komen. Wat hebben onze afstudeerders, promovendi en postdocs alzo ontdekt en in proefschriften en verslagen opgeschreven? Vanaf die inzichten gaat de wetenschap verder op pad.

In dissertaties uit ons Laboratorium heet het laatste hoofdstuk altijd “*THESIS*”. Dat is engels voor proefschrift, maar het betekent eigenlijk “*STELLING*”. In enkele kort en bondig geformuleerde one-liners vertelt de promovendus wat zijn lezers bij moet blijven. De argumentatie wordt bondig bijgeleverd, in een formulering die uitdaagt tot nadenken en wetenschappelijke discussie.

Laat ik dat vraag-en-antwoordspelletje nu zelf ook eens gebruiken en in deze stijlfiguur een paar van onze wetenschappelijke thema's en resultaten aan U voorstellen:

Vraag 1. Kan een vloeistofstroom slippen aan een vaste wand?

Ja, dat kan inderdaad. De entropieproductie van een plugstroom (i.e. bij wrijving langs de wand) is in nauwe capillairen altijd kleiner dan in het stromingsprofiel volgens Poiseuille, dat zich ontwikkelt bij stroming van een visceuze vloeistof zonder slip. (Diss. Annemoon Timmerman; 2002).

Vraag 2. Waarom breken dunne vloeistoffilms met vertraging?

Wanneer de laagdikte kleiner is dan de correlatielengte wordt zelfs een visceuze vloeistof visco-elastisch. (Diss. Lars Evers; 1998)

Vraag 3. Waarom ontstaan concentratieverschillen als een emulsie door een nauw kanaal geperst wordt?

Als hun grootte niet meer verwaarloosbaar is in het stromingsprofiel worden de druppeltjes van hun stroomlijn af geduwd door een kracht loodrecht op die stroomlijn. (Diss. Marjolijn Trijssenaar; 2002).

Vraag 4. Hoe kan de uitvloksnelheid in een dispersie onafhankelijk zijn van de deeltjesgrootte terwijl de interactie tussen de deeltjes met die grootte evenredig is?

De uitvloksnelheid hangt af van de oppervlakteruwheid en niet van de deeltjesgrootte, omdat de reikwijdte van die interactie veel kleiner is dan de deeltjesdiameter. (Diss. Sergei Shulepov; 1997).

Vraag 5. Waarom is de gemeten adhesie tussen metaal- en polymeeroppervlakken niet goed te berekenen met het (thermodynamische) "Work of Adhesion"?

Omdat dan de kluwentropie van de polymeerketens vergeten wordt, en daarmee het effect van adsorptie of depletie. (Diss. André van der Put; 1995).

Vraag 6. Hoe voorkomt een mossel dat hij zelf wordt dichtgelijmd door de secondenlijm waarmee hij zich onder water vastzet?

Het antwoord op die vraag weten Mieke van der Leeden en Sander Haemers. Maar dat proefschrift wordt nu geschreven, dus ik zal U de mosselgeheimen nog niet verklappen! Ik moet trouwens ook niet op deze manier doorgaan. Zo'n quizvragen-spel vertekent de aanpak van het onderzoek. Dit waren fysisch-chemische vraagstellingen en antwoorden die naar voren zijn gekomen bij technologisch onderzoek. Aan het maken van papier, het walsen van staal, porievrij sinteren van keramiek, rookgasontzwaveling in poederkoolcentrales of het dagelijks wassen van de lakens voor een ziekenhuis. En behalve aan grootschalige industriële technologie werkten projectmedewerkers en fysisch chemici van de groep in projecten van het Hechtingsinstituut TUD. In dat instituut wordt samengewerkt met andere ingenieurs, uit de Lucht- en Ruimtevaart en de Civiele Techniek. In dat interfacultaire samenwerkingsverband werd gestudeerd op de sterkte van beton, een revolutionaire lichtgewicht koelwagen ("Cold

Feather") geconstrueerd en we organiseerden een architectuurprijsvraag bij het Lustrum van de T.U. – waarbij de bekroonde inzending ("Nautilus") een beweegbaar gebouw was. We repareerden kunststof sluisdeuren en we verlijmden schoenzolen met polypropyleen door in-line voorbehandeling met UV/Ozon-radicalen. En we hielpen mee om de methode te ontwikkelen voor de restauratie van het Panorama Mesdag in den Haag.

In deze klasse van projecten leer je de verantwoordelijkheid te nemen voor je werk. Want wetenschappelijke inzichten worden er in de praktijk getoetst, op draagkracht en draagwijdte. De vragen zijn nieuw en de antwoorden dus ook. Je moet je nek durven uitsteken want er wordt een werkzame oplossing van het technische probleem verwacht.

Zo konden wij op de universitaire werkvloer van Prof. Vogelesang met zijn mensen interdisciplinair samenwerken aan actuele technische vraagstellingen. Maar door dat werk tegelijkertijd bouwen aan toekomstige technologie. De fysisch chemische benadering van de vraagstukken levert generieke oplossingen, die reiken voorbij de horizon van het specifieke project.

Wat was "Waskracht"

Een sterk voorbeeld daarvan is ons onderzoek aan oppervlakte-actieve stoffen. Die worden in het vakjargon surfactants genoemd. Ik zal die term ook gebruiken. Dat bekt lekker en geeft deze afscheidsrede dus de noodzakelijk "impact". Zo gaat het toe nu de modernere wetenschappelijke literatuur in bladen als *Nature* en *Science* wordt geschreven. Surfactants dus, maar denkt U maar gewoon aan zeep, want dat is een stof met oppervlakte-actieve moleculen.

Samen met IR-TNO probeerden we te begrijpen hoe wasmiddelen werken. Dat onderzoek loopt nog steeds door, vanaf 1992. Er hebben achtereenvolgens een zestal promovendi (Paul Brasser, Vincent Nierstrasz, Lars Evers, Annemoon Timmerman, Pilar Garate en Christophe Cheikh)

aan meegedaan. Bij onze experimenten over "waskracht" waren twee onbegrijpelijke resultaten gevonden. De tijd die nodig is om textiel schoon te wassen is veel te kort. En de dosis zeep die daar bij nodig is lijkt veel te hoog. Alles bezien vanuit bestaande ideeën over waswerking natuurlijk.

U weet allemaal wel dat je in tien minuten een shirt kunt wassen. Maar niemand begrijpt dat. Voor thuis en in de wasserij is dat geen enkel probleem: zo werkt dat nu eenmaal. Maar er zijn ook ingenieurs die machines en apparaten moeten bouwen voor het wasproces. Als die met hun gangbare modellen aan het rekenen slaan krijgen ze een verbazingwekkende uitkomst: schoon wassen moet ongeveer tien uur kosten. Voor het wassen van een overhemd, wat iedereen in tien minuten kan! Het berekende antwoord is dus kennelijk fout.

Maar de manier waarop het uitgerekend is klopt. Althans, dat is de zelfde manier waarmee in de technologie stofoverdracht van een vast oppervlak naar een langsstromende procesvloeistof wordt berekend. Daaruit volgt de optimale verblijftijd bij het ontwerpen van de unit operations in de chemische technologie. En dan lijkt de methode toch heel bevredigend te werken.

Verder zit er ook iets fout met de dosering van het wasmiddel. In ieder leerboek over fysische chemie (e.g. Atkins, Hunter, Adamson of Hiemenz) wordt aan tweedejaars studenten geleerd dat surfactants helpen bij het wassen omdat hun sterke adsorptie de oppervlaktespanning verlaagt. Iedere student slaagt met dat antwoord voor zijn tentamen, maar zijn moeder weet dat het niet klopt. Want bij het wassen gebruikt ze veel meer zeep dan nodig zou zijn om de oppervlaktespanning te verlagen. Wel vijf of tien keer meer dan de c.m.c., de kritische micelvormings concentratie. Vanaf die concentratie hebben zeepoplossingen hun laagst bereikbare oppervlaktespanning. Pas ver boven de c.m.c. krijgen we het "vette" sopje met goede waswerking. Dat heeft met verlaagde oppervlaktespanning niets te maken. Want die blijft constant

bij deze hoge zeepconcentraties terwijl de waswerking tot een maximale waarde toeneemt.

Een nieuw model voor detergentie

Detergentie werkt dus blijkbaar anders. Onze promovendi hebben ontdekt welk mechanisme daar achter zit. Ze hebben hun model ook theoretisch en experimenteel weten te onderbouwen en het toegepast om nieuwe detergentia te bedenken.

Waswerking berust niet op de verlaging van de grensvlakenergie door adsorptie van surfactants. Integendeel, het komt juist door de verhoogde energie als het adsorptieevenwicht verstoord wordt. De verstoring treedt op als de wasvloeistof door de nauwe poriën van het textielweefsel geforceerd wordt.

Er zijn drie fysisch chemische voorwaarden waaraan voldaan moet zijn om goed te kunnen wassen:

1. Er moet vloeistof stromen in de nauwe poriën. We hebben daarstraks bij ons vraag- en antwoordspelletje zien langskomen dat dan slip kan optreden.
2. Er moet voldoende zijwaartse mobiliteit zijn in de geadsorbeerde laag die de vaste vezeloppervlakken overdekt. Dat zal dus afhangen van de druk, de temperatuur, en de eigenschappen van de gekozen surfactant moleculen.
3. De wasvloeistof moet in staat zijn tot "extreme control" en zeepmoleculen naleveren als het adsorptieevenwicht tijdens het wasproces verstoord dreigt te worden.

De geforceerde stroming in de nauwe poriën is het gevolg van pompwerking. Doordat textiel en wasvloeistof in een wastrommel rondwentelen worden draden gestrekt en verbogen. Er wordt aan het weefsel getrokken, zoals aan een vlag die wappert in de wind. Micromechanisch betekent dit dat ondanks de grote wrijving de vloeistof in de vervormde poriën tussen de vezels heen en weer geperst wordt.

Bij hogere concentraties dan de c.m.c. is al het vaste oppervlak van de textielvezels bedekt met een aaneengesloten laag zeepmoleculen. De lokale concentratie in die laag is hoog: wel duizend keer hoger dan in de wasvloeistof. Dat is waarom men surfactantmoleculen oppervlakte-actief noemt. Bij zo'n hoge concentratie vormen de zeepmoleculen een vloeibaar kristallijne oppervlaktelaag, net als dat in een geconcentreerde oplossing zouden doen.

Vanuit de stromende vloeistof grijpt de wrijvingskracht aan op de poriewanden. De adsorptielaag die daar op geadsorbeerd zit wordt meegesleept en verplaatst zich over het oppervlak. Maar dat verstoort het evenwicht tussen de vloeistof en het grensvlak. Waar zeepmoleculen wegstromen moet de geadsorbeerde laag worden aangevuld. Waar ze heen stromen treedt in de grenslaag oververzadiging op. Daar vormen zich zeepmicellen die zich losmaken van het oppervlak.

Als aan- of afvoer geen gelijke tred weten te houden stopt de stroming in de zeeplaag. Een (Marangoni) tegenkracht remt dan de stroming af. En als de stroom van de zeepmoleculen over het vezeloppervlak vertraagd wordt, of zelfs helemaal stopt, dan stopt ook de waswerking. Want die berust er op, dat de vuildeeltjes meegenomen worden in de zeeplaag die over het grensvlak slipt.

(In technologisch vakjargon: de stofoverdracht uit het vaste oppervlak neemt sterk toe, want de convectiestroom in de zeeplaag vergroot het Peclet-getal direct aan het oppervlak. Vaste deeltjes ondervinden een lift-force in de stroom en geëxtraheerde stoffen hoeven niet meer door een boundary layer van micrometers dik te diffunderen. Ze worden al op nano-afstand van het vaste oppervlak meegenomen in de zeeplaag, en afgevoerd in de micellen).

Voor een maximale waswerking moeten we de stroming op gang houden, ondanks de evenwichtsverstoring die ze veroorzaakt. Dat kan door "snelle" surfactants met een hoge concentratie te kiezen. Zo hoog, dat de aanvoer van zeepmoleculen – en hun afvoer door micelvorming – altijd

sneller zijn dan de stroming langs het oppervlak. En hier hebben we precies het technologische recept voor "extreme control". Ondanks de verstoring vanwege de stroming wordt de concentratie in de geadsorbeerde zeeplaag op de evenwichtswaarde gehandhaafd. Als vaste randvoorwaarde voor maximale waskracht.

De implicaties van dit transportmodel overstijgen verre het belang voor de wasmiddelenindustrie. Al zijn we met verschillende bedrijven bezig nieuwe detergents te ontwikkelen op basis van dit volstrekt nieuwe werkingsprincipe. Maar vooral wordt door dit onderzoek aangetoond hoe geroerd kan worden binnen de boundary layers van vaste grensvlakken. Zo kan de stofoverdracht, met behulp van extreme control en door het verstoren van de evenwichtstoestand aan een grensvlak meer dan een factor tien vergroot worden. Procesapparatuur die op stofoverdracht berust kan dan navenant in schaal worden verkleind. Wat weer een enorme vooruitgang oplevert in de hanteerbaarheid van de processtroom en de precisie van het Deborah number. Een stap vooruit dus in de richting van de technologische horizon.

Beyond the blue horizon

Maar hoe leren we een ingenieur om voorbij zijn eigen horizon te reiken. Hoe kunnen we de paradigma's van onze leerboeken openbreken, die ons enerzijds vakkennis en perspectief verschaffen, maar anderzijds het blikveld vernauwen tot wat bekend is. Hoe leer je omgaan met het onbekende?

Op dat punt telt de vent (of vrouw). De sleutel zit in de creativiteit van de ontwerper die nieuwe processen en producten bedenkt. Van 't Hoff zei dat al, meer dan een eeuw geleden, in zijn inaugurele rede aan de Universiteit van Amsterdam. Die rede heette "De rol van de fantasie in de wetenschap". Van Nobelprijswinnaars kon je toen wat leren!

Mijn stelling is, dat de creativiteit van ontwerpers bij hun opleiding kan worden gestimuleerd of onderdrukt. We willen natuurlijk het eerste, maar bereiken vaak het tegendeel. Dat is

een uiterst belangrijk punt. Het is bepalend voor de kwaliteit van ingenieursopleidingen.

Als student leer je aan de T.U. de systematiek van het ontwerpen, de "basic cycle of design". Dat onderscheidt ons van de scheikundestudies aan andere Nederlandse universiteiten. Je leert ook vaag verwoorde wensen te vertalen in technische termen en in meetbare specificaties. Je leert vervolgens alternatieven te bedenken en de oplossing te selecteren die het beste past. En in het vierde of het vijfde studiejaar moet je in de praktijk bewijzen met deze vaardigheden uit de voeten te kunnen.

In de Delftse opleiding scheikundige technologie gebeurt dat bij een ontwerp-opdracht, die vroeger Fabrieksvoorontwerp (FVO) heette en nu Conceptual Process/Product Design (CPD). Bij enquêtes onder onze afgestudeerden blijkt dat overigens het studieonderdeel te zijn geweest waar ze het meest aan gehad hebben voor later, na hun ingenieursexamen. Een ontwerpteam van vier tot acht studenten krijgt de opdracht om, in drie maanden full time werk, een nieuw idee voor een proces of product te ontwerpen. Dat ontwerp is een van de kwalificerende onderdelen in het ingenieursexamen van alle Delftse technologen.

De creativiteit van de ontwerper

Het is al weer een aantal jaren geleden dat ervaren ontwerpers uit de procesindustrie, ingeschakeld om de ontwerpen mede te beoordelen, gingen mopperen over gebrek aan creativiteit. De ontwerpen van onze studenten waren meestal goed genoeg, maar degelijk, conservatief en weinig origineel. Terwijl men van bevlogen studenten juist meer creativiteit verwachtte!

Professor Grievink en ik hebben toen professionele hulp gezocht. Van een psycholoog, die aan conservatoriumstudenten leert hoe je als solist optreedt bij een concert. Hij participeerde een half jaar lang in onze ontwerpteams. En ontdekte ons zwakke punt.

Voor creatief ontwerpen is zelfvertrouwen nodig. Je moet durven afgaan op je persoonlijke intuïties bij het kiezen uit alternatieven en bij het nemen van je ontwerpbeslissingen. Over intuïtie bestaat veel psychologisch onderzoek. Bijvoorbeeld hoe schaakgrootmeesters hun zetten kiezen, musici Mahler interpreteren en chefkoks hun gerechten ontdekken. Intuïtie is niet genetisch ingebakken en intuïtie berust ook niet op kennis alleen. Intuïtie is het resultaat als je niet alleen vakjes geleerd hebt om tentamens te halen, maar als die kennis ook door je verwerkt en ingepast is, door ervaring. En daar, op het punt van verwerken en laten bezinken wat je geleerd hebt, daar gaat het mis voor veel van onze studenten. Ze moeten, volgens een vaste programmering – en in zo kort mogelijke tijd vanwege het door kortzichtige bestuurders met geld opgedrongen studietempo – veel nieuwe dingen leren. Maar daarnaast was weinig tijd beschikbaar om wat je aan ordelijk gestructureerde vakkennis bezit toe te passen in de verwarrende praktijk. Op practica en bij ontwerp opdrachten. En daar wordt het vertrouwen in je intuïtie ontwikkeld.

Nu is de opdracht aan zo'n ontwerpteam van vierdejaars om een werkend concept af te leveren. Dat ontwerp ontwikkelt zich in de beschikbare drie maanden uit een Basis of Design in een hiërarchie van ontwerpbeslissingen. Stel, een student komt in zo'n team met een creatief idee, dat intuïtief, nieuw en goed lijkt. Dan is de moeilijkheid niet om dat voorstel uit te werken. Dat kunnen onze technologiestudenten, zo goed als een muziekstudent alle noten van een partituur in de maat kan spelen. Het probleem ligt – net als bij de solist – in de interpretatie. Hoe krijg je aan de rest van het team uitgelegd dat het voorstel echt zal werken. Geen student heeft daarvoor, gesteld dat het echt een oorspronkelijk idee is dat niet kan worden opgezocht in de literatuur, voldoende parate kennis in huis. En de teamleden hebben niet geleerd op intuïtie te vertrouwen. Dus verdwijnen veel creatieve ideeën onder tafel. Ervaren ontwerpers hebben in de praktijk geleerd te vertrouwen op hun intuïtie, dus op verwerkte kennis. Hun

gelijk wordt pas bewezen door het resultaat. Zij weten wat onze studenten bij het CPD voor het eerst konden ontdekken: goede keuzes geven elegante ontwerpen. De dingen vallen dan vanzelf op hun plaats. Maar onze studenten hebben – hadden – niet de ervaring, niet het vertrouwen in eigen kennis en kunde dat nodig is om te durven luisteren naar je intuïtie.

We hebben toen de structuur van onze opleiding veranderd. Die verandering is behouden gebleven toen voor de hele TNW-faculteit een gemeenschappelijke propedeuse ingevoerd werd. En ook bij de invoering van de nieuwe Bachelors/Masters opzet van het studieprogramma. Het ontwerponderwijs is nu in de Opleiding Scheikundige Technologie en Bioprocestechnologie een doorlopende lijn. In alle studiejaar zijn opdrachten en practica ingebouwd om reeds geleerde vakjes kennis te verbouwen tot de intuïtie die je nodig hebt voor creatieve ontwerpbeslissingen.

We zitten daar mee op een goed pad, ook internationaal, in vergelijking met andere opleidingen. Ik heb in Duitsland, in Engeland en in de Verenigde Staten onze Delftse opleiding scheikundige technologie als voorbeeld horen stellen. Niet zo maar door ambtelijke visitatoren, of door accreditatieboards die studiepunten tellen en studieduur vergelijken. Maar door mensen uit de industriële praktijk, die het functioneren van ingenieurs in hun multinationale bedrijven beoordeelden. Bij de vorming van chemisch technologen tot echte ingenieurs doet onze opleiding mee in de voorste gelederen. Daar zijn we trots op, mijnheer de Rector, Dames en Heren. Want wij lopen hier op een weg die verder reikt dan de horizon.

Peroratie

Mevrouw de Pedel, de tijd is (bijna) verstreken. En het protocol belet mij om de mensen persoonlijk te bedanken die ons werk gedragen hebben. Zij werden impliciet genoemd, telkens als ik het over “ons Laboratorium” had, of over het Hechtingsinstituut of gewoon over onze groep. Of als hun werk paste in mijn betoog vandaag.

Toch veroorloof ik mij, voor het laatst, enkele uitzonderingen. Want ik wil Ger Koper aan U noemen. Wij hebben hem uit Leiden naar Delft gelokt om de leiding van het fysisch-chemisch onderzoek van mij over te nemen. Na inburgering in ons Laboratorium is hij overgegaan op Delftse normen en waarden. Wat mijn vertrouwen in de toekomst van fysisch-chemisch onderzoek en onderwijs binnen onze faculteit alleen maar versterkt.

“Management”, heb ik in Amerika op een cursus geleerd, “is getting things done (by your people!)”. Van de mensen in de organisatie, your people, moeten de prestaties komen waar je als manager mee voor den dag komt. Dat geldt niet alleen de productie van wetenschappelijke resultaten en het onderwijs, maar ook personeelbeleid en financiën van de organisatie. Daar over denkend kom ik altijd weer uit bij Sue van de Giessen, de secretaresse van de groep, businessmanager van L.F.C., aanspreekpunt voor ons allemaal. Sue, wij hoorden jaren bij elkaar. We hebben samen riskante streken uitgehaald als in een spannend avontuur. We zijn soms ook door diepe dalen gegaan, maar we hebben vaak gelachen en we zijn overeind gebleven. Zo hebben we dingen voor elkaar gekregen. Jij kon ons managen, your people. Of het nu de Professor was of de tweedejaars student.

Maurice Peereboom, jij hoort erbij vandaag. Jij was onze hoofd-docent. En wij jouw laboratorium voor onderwijs en onderwijsvernieuwing. Wij voerden een tutorensysteem in, in plaats van instructie. Wij hadden een tweedejaarspracticum zonder assistenten (maar met Nico van Westen opgesteld als “vaste waarde”). Jij bedacht, met Dolf Grunwald samen, hoe we de creativiteit gingen terugbrengen in de studie. Allemaal ingebracht in de Delftse Opleiding ST, waar je zoveel zorg en liefde in geïnvesteerd hebt. Maar mijn persoonlijke dank aan jou heeft niet heel veel te maken met al dat het geonderwijs. Voor mij ben jij, vanaf de eerste dag dat ik in Delft kwam kijken, de verpersoonlijking geweest van kennis en ervaring,

van vertrouwen en subtiel gevoel voor situaties, dat mij (en ons allemaal) liet zien waar ons Laboratorium voor stond en staat.

Ellen, mijn vrouw, lieve Ellen. Waar zouden wij beiden staan vandaag als we niet samen onze koers in het leven hadden uitgezet. Zeker niet hier! Al veertig jaar houden wij van elkaar. Dat geeft jou, dat geeft mij de moed, de kracht, de ruimte en het perspectief op onze weg. Die verder reikt dan elke einder.