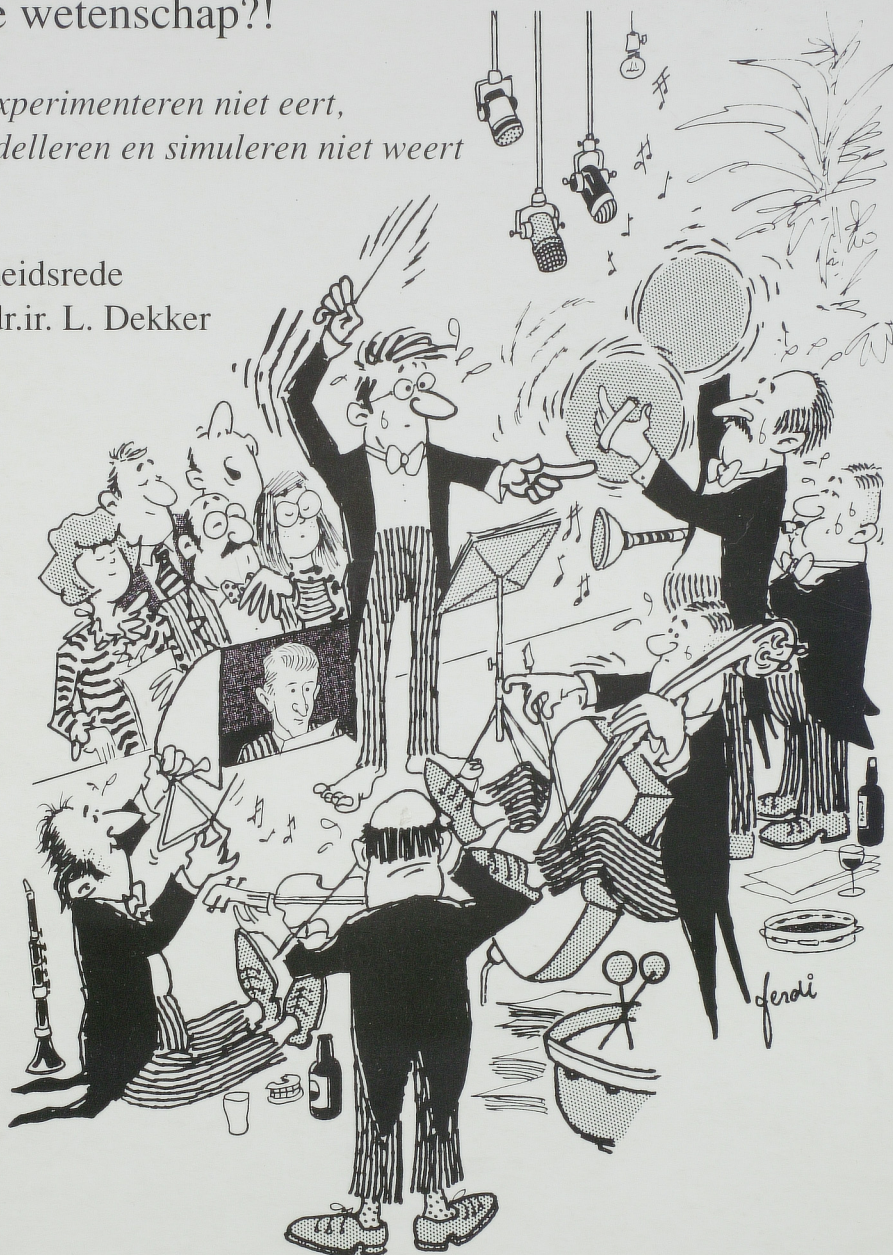


Parallellisme, een nieuwe dimensie in de wetenschap?!

*Wie experimenteren niet eert,
is modelleren en simuleren niet weert*

Afscheidsrede
Prof.dr.ir. L. Dekker



TUDelft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Technische Natuurkunde

703954

Red. 1997

3002896

PARALLELLISME, EEN NIEUWE DIMENSIE IN DE WETENSCHAP?!

Wie experimenteren niet eert, is modelleren en simuleren niet weert

Afscheidsrede

uitgesproken op Woensdag 24 september 1997

door Prof. dr. ir. L. Dekker

hoogleraar aan de Faculteit der Technische Natuurkunde

alsmede

hoogleraar aan de Faculteit der Technische Wiskunde & Informatica

van de Technische Universiteit te Delft



Dekker_
red_
1997

Inleiding

Zoals ik in 1966 ter gelegenheid van de aanvaarding van het niet meer bestaande ambt van lector aan de toenmalige Technische Hogeschool Delft een openbare les gegeven heb, zo zal deze afscheidsrede ook nu bij het beëindigen van mijn ambt als hoogleraar aan de Technische Universiteit Delft plaatsvinden in de vorm van een openbare les. Vooraf spreek ik de wens uit dat deze openbare les U allen zal aanspreken. Als een noodzakelijke voorwaarde om dit te kunnen bereiken richt ik mij derhalve niet in de eerste plaats tot de specialisten onder U. De uitspraak in de titel van de afscheidsrede "Parallellisme, een nieuwe Dimensie in de Wetenschap?!"

houdt met betrekking tot het begrip parallellisme een stellingname in, die vraagt om nadere toelichting en rechtvaardiging. Zowel de geschiedenis van parallel rekenen als de huidige stand van zaken bij parallel digitaal rekenen maken namelijk mijn uitspraak niet vanzelfsprekend. Door vele deskundigen van nu zal deze uitspraak zelfs nog als een niet-plausibele hypothese worden beschouwd en derhalve worden verworpen. In deze openbare les zal ik trachten mijn uitspraak voor U aannemelijk te maken.

De ondertitel van mijn afscheidsrede

"Wie experimenteren niet eert, is modelleren en simuleren niet weert"

geeft weer wat voor mij een belangrijke inspiratiebron is geweest bij mijn loopbaan als ingenieur.

Parallellisme

Datgene wat ik zo juist inleidend heb gezegd, kan dienen als een eerste stap om het begrip parallellisme voor U te verduidelijken. Gedurende de openbare les bent U toehoorder, maar daarnaast (in mindere mate) ook toeschouwer. Bij de interactie tussen ons speelt naast wat U hoort, ook mee wat U en ik zien. De interactie vindt plaats door middel van gelijktijdige "verbale" en "niet-verbale" communicatie. Gedurende de inleiding is er parallele interactie geweest tussen U en mij. Ik heb U toegesproken en U als totaal publiek gezien. U hebt naar mij geluisterd en mij gezien. Dit is parallel in tweeërlei opzicht. Het toespreken, beluisteren en zien is gebeurd respectievelijk naar en vanuit vele plaatsen in deze zaal, of wel parallel in de ruimte. Het beluisteren en zien heeft vrijwel gelijktijdig plaatsgevonden, of wel parallel in de tijd. Dat parallel communiceren tussen U en mij mogelijk is, is enerzijds te danken aan de eigenschappen van de mens als informatie-verwerkend systeem¹ en anderzijds aan de fysische eigenschappen van licht en van het aanwezige interconnectie medium lucht met betrekking tot transport van geluid. Het door Uw oren en ogen waargenomen geluid en licht wordt parallel verwerkt en opgeslagen in Uw hersenen. Dat wil zeggen dat ieder mens op zich, wat betreft onder andere horen en zien, een parallel informatie-verwerkend systeem vormt.

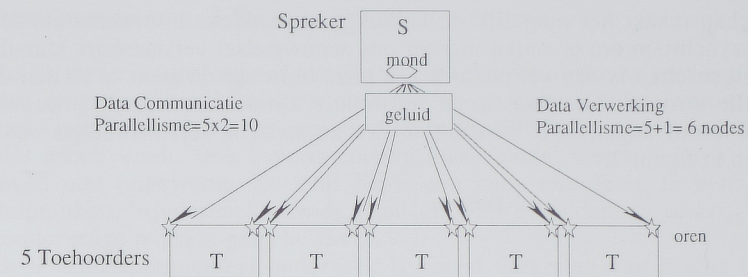
¹stelsel = een samenstel van delen; deze delen worden deelsystemen genoemd.

Door gebruik te maken van menselijke eigenschappen ben ik in staat om onder woorden te brengen wat ik zeggen wil en om deze woorden uit te spreken. U maakt gebruik van menselijke eigenschappen om wat ik als geluid uitspreek na ontvangst te horen en te begrijpen. Voor de connectie van mij als spreker naar U als toehoorders is gebruik gemaakt van het feit dat het met de in onze omgeving aanwezige lucht op bevredigende manier mogelijk is een stroom van geluid in deze ruimte parallel te verspreiden alsmede van een tweede feit, dat dit verspreiden naar menselijke maatstaf in te verwaarlozen tijd geschiedt, dat wil zeggen naar ons gevoel in een oogwenk. De parallelle interactie via geluid tussen U en mij vindt plaats door middel van parallelle connectie en heeft betrekking op informatie-productie, informatie-verzending door mij als spreker en op informatie-transport door de lucht alsmede op informatie-ontvangst, -verwerking en -opslag door U als toehoorders.

In overdrachtelijke zin vormen wij tezamen gedurende mijn openbare les een door de aula begrensd parallel informatie-verwerkend systeem: verder aangeduid als ParAula systeem. Het parallelisme van het ParAula systeem is gelijk aan het aantal toehoorders plus één (de spreker). Informatie-technisch bezien is ParAula een ideaal model van een parallelle computer met mensen als intelligente computing nodes². De efficiëntie is honderd procent, dat wil zeggen het aanwezige parallelisme wordt volledig benut, althans indien ieder van U goed oplettend is. Bovendien is het parallelisme van het ParAula systeem met behoud van efficiëntie schaalbaar van de minimale waarde 2, één toehoorder plus de spreker, tot de maximale waarde 1201, het in de aula toelaatbare aantal van 1200 toehoorders plus de spreker. In het voorgaande is terloops aan de orde geweest parallelle verzending, -ontvangst, -verwerking en -opslag van gegevens³. Dit is gebeurd zonder stil te staan bij de eigenschappen van de hierbij benutte fysische en biologische middelen voor verzending, transport en opslag van gegevens. Dit kon ik doen omdat U door menselijke ervaring hiermee in voldoende mate vertrouwd bent geraakt. Toch ga ik in het navolgende nog wat nader in op de parallelle eigenschappen van lucht en de mens bij de interconnectie tussen mensen door middel van geluid. De parallelle eigenschappen van licht zijn even evident en komen later aan de orde. Bij het voorbeeld "spreker/toehoorders" fungeert de spreker als zender naar alle toehoorders met als fysieke uitgang zijn mond. Elke toehoorder fungeert als stereo ontvanger met als fysieke ingangen beide oren. Dit wil zeggen, er is van de spreker naar elke toehoorder functioneel voor elk oor een afzonderlijke verbinding. Een en ander is schematisch weergegeven in figuur 1.

²computing node = een rekenorgaan van een parallelle computer.

³ gegevens en data hebben gelijke betekenis.



Gegevensverwerking: spreker S en toehoorders T.

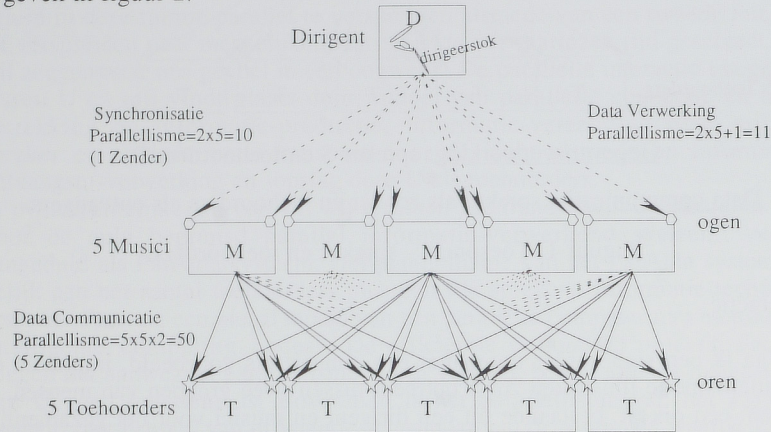
Data communicatie: spreker als zender en toehoorders als ontvangers.

Figuur 1. Toespraak: spreker en toehoorders.

Interactie

Nu ga ik een stap verder door, met een concert als voorbeeld, interactie en parallelisme te illustreren zoals optreedt tussen twee groepen van mensen, te weten: een orkest, bestaande uit een dirigent en musici voor het gezamenlijk produceren van muziek en het publiek, bestaande uit toehoorders voor het gezamenlijk beluisteren van de muziek. Een orkest bestaat uit een groep van samenwerkende musici met elk een eigen instrument en een gezamenlijke partituur. De musici hebben elk, als onderdeel van de gezamenlijke parallelle taak, een eigen deeltaak. Elke musicus voert zijn deeltaak als regel uit met enige onderbrekingen. Dit houdt in dat een deeltaak daardoor uiteen valt in een aantal kleinere met onderbrekingen opeenvolgende deeltaken. Om te voorkomen dat musici in hun eigen tempo spelen vindt het parallelle samenspel van de musici plaats onder leiding van de dirigent van het orkest. Een belangrijke taak van de dirigent is synchronisatie van het samenspel ten einde te zorgen dat de deeltaken van de musici tijdens het concert worden uitgevoerd, zoals is voorgeschreven in de partituur. Dit houdt onder andere in dat de tijdsorde van uitvoering van de deeltaken moet voldoen aan wat uit de partituur volgt ten aanzien van de logische samenhang tussen de deeltaken in de loop van de tijd. Om dit te bereiken gebruikt de dirigent de fysische eigenschappen van licht door als zender middels zijn dirigerestok de nodige visuele aanwijzingen te geven aan alle leden van het orkest. De parallelle informatie-overdracht van musici naar luisteraars vindt weer plaats op basis van volledige connectiviteit. Dat wil zeggen, de muziekbijdrage van elk van de actieve musici wordt als geluid gelijktijdig parallel verzonden naar alle luisteraars. Merk op dat deze parallelle verzending in het voorbeeld van 5 musici en 5 toehoorders equivalent is met een totaal van $5 \times 5 = 25$ tweevoudige verbindingen. Het parallelisme van de data communicatie is dus gelijk aan 50. Een bijzondere eigenschap van het menselijk gehoororgaan is de parallelle toegankelijkheid van beide oren voor gelijktijdig ontvangen muzikale bijdragen. Deze

eigenschap maakt het mogelijk de volledige akoestische informatie als één geheel synchroon om te zetten in voor ons zenuwstelsel verstaanbare stimuli. Deze eigenschap is een voorwaarde om onze hersenen in staat te stellen de parallelle stroom van akoestische informatie zonder merkbare vertraging parallel te ontvangen en te verwerken. Een en ander is vereenvoudigd weergegeven in figuur 2.



Gegevensverwerking: dirigent D, musici M en toehoorders T.

Data communicatie: musici als zenders; dirigent en toehoorders als ontvangers.

Synchronisatie: dirigent als zender en musici als ontvangers.

Figuur 2. Concert: dirigent, musici en toehoorders.

Het voorbeeld "concert/toehoorders" vertoont parallellisme in een drietal vormen: parallellisme van gegevensverwerking; parallellisme van data communicatie en parallellisme van synchronisatie. Bij beide voorbeelden geldt dat het geheugen van het verkregen ParAula systeem verspreid is over de hersenen van alle aanwezigen. Informatie-technisch gezien zijn het dus parallelle systemen met een gedistribueerd geheugen. De voorbeelden "spreker/toehoorders" en "concert/toehoorders" betreffen analyse van het aanwezige parallellisme. Bij geen van beide voorbeelden is een protocol aan de orde geweest waarin de regels beschreven zijn voor informatie overdracht naar de toehoorders, dat wil zeggen voor het realiseren van 'wie krijgt wat'. De reden hiervoor is dat alle toehoorders alle informatie krijgen toegezonden en dat het aan de toehoorders wordt overgelaten in hoeverre zij van de aangeboden informatie gebruik maken. Dit eenvoudige protocol voor informatie-overdracht wordt van oudsher elke dag toegepast bij de distributie van nieuws door middel van dagbladen.

Experimenteren, modelleren en simuleren

Het is mensen van jongs af aan eigen om te experimenteren met systemen in hun omgeving om kennis en ervaring op te doen. Ouders van een baby ontkomen er niet aan door experimenteren te achterhalen wat 'babyliedje' wel en niet lekker vindt. Ook experimenteren door middel van simuleren is in het leven niet ongewoon. Zo leert reeds een baby simuleren te benutten als hulpmiddel, bijvoorbeeld om de aandacht van de ouders te verkrijgen door zonder enige reden te gaan huilen.

Doel van experimenteel onderzoek is veelal vergroten van kennis over het gedrag van een systeem. Experimenteel onderzoek bleef voor de komst van rekenmachines voornamelijk beperkt tot het doen van metingen aan een systeem met behulp van meet-instrumenten op basis van doelgerichte experimenten. Zowel bij het inrichten van een experiment als bij analyse en interpretatie van meetresultaten is het noodzakelijk te beschikken over een bruikbaar systeemmodel. Zonder dat moet experimenteel onderzoek allereerst gericht zijn op het verkrijgen van zo'n model. Een blijvend aspect is het verbeteren van het systeemmodel op grond van verkregen meetresultaten. Hierdoor is experimenteren van oudsher model-gebaseerd.

Modelleren beoogt het bepalen van een modelbeschrijving van een systeem, zodanig gelijkend, dat theoretische en experimentele studie van het systeemmodel gebruikt kunnen worden om eigenschappen van het echte systeem nader te bepalen in afhankelijkheid van systeemparameters, zoals soortelijk gewicht, poreusiteit, alsmede van externe invloeden. De modelbeschrijving van een systeem is niet eenduidig bepaald. De aard van een modelbeschrijving hangt af van het gebruiksdoel van een systeemmodel. Stel bijvoorbeeld dat het doel is experimenteel onderzoek te doen door middel van simulatie op een conventionele sequentiële digitale computer. Dan zal de modellering gericht zijn op het verkrijgen van een goed sequentiële model⁴. In geval dat het doel is een model te gebruiken voor parallelle simulatie, dan moet het modelleren gericht zijn op het construeren van een goed parallel model.

Vaak is experimenteel onderzoek van een systeem zelf praktisch niet uitvoerbaar of economisch niet verantwoord. Dit heeft geleid tot de situatie dat zowel bij toegepaste als theoretische vraagstellingen veel experimenteel onderzoek plaatsvindt door middel van computer simulatie. Simuleren van een systeem houdt in dat experimenteren door het uitvoeren van experimenten aan het systeem, vervangen wordt door het uitvoeren van experimenten aan de computer implementatie van een gevalideerd model van het betreffende systeem. Een voorbeeld is weersvoorspelling door middel van simulatie. Bij computer simulatie is experimenteel onderzoek niet beperkt tot het uitvoeren, al dan niet interactief, van doelgerichte experimenten aan een systeemmodel en het waarnemen van de simulatie resultaten. Computer simulatie laat toe dat de mens een meer actieve rol speelt, zoals interactief bepalen van de verandering van het systeemgedrag door wijziging van een of meer systeemparameters.

⁴sequentiële model = gegevensverwerking gebeurt in stappen.

Toch blijft ook in de toekomst experimenteren door middel van het uitvoeren van experimenten aan het echte systeem noodzakelijk, bijvoorbeeld om te verifiëren of het bij de uitgevoerde simulatie-experimenten gebruikte systeemmodel in voldoende mate is gevalideerd. De betrouwbaarheid van simulatie resultaten staat en valt met de validiteit van het gebruikte systeemmodel. Daarom is modelleren van een systeem, bij experimenteel onderzoek door middel van simuleren, van nog groter belang dan bij uitsluitend experimenteren aan het systeem zelf.

Parallele simulatie in verleden en heden

In het verleden is op beperkte schaal parallelle simulatie toegepast door gebruik te maken van mechanische analoge computers. Het tijdperk van parallelle simulatie is echter eerst goed begonnen in de vijftiger jaren met de komst van de (electronische) analoge computer. Parallele simulatie heeft toen een grote vlucht genomen als een aanvullend hulpmiddel bij experimenteel onderzoek aan continue dynamische systemen. Bijvoorbeeld vele technische systemen werden gesimuleerd op een analoge computer als een analogon⁵ van het parallelle wiskundig-fysische model van het gegeven systeem. Een analoge computer was hiertoe samengesteld uit een arsenaal van computing nodes, zowel rekencomponenten, in staat om reken-operaties te verrichten zoals: optellen, vermenigvuldigen, integreren naar de tijd, alsmede logische componenten, nodig bij abrupt veranderen van bijvoorbeeld systeemparameters. Bij analoge simuleren van een systeem wordt het systeemmodel hiervan op een analoge computer geïmplementeerd als een analoge systeem opgebouwd uit (analoge) computing nodes welke overeenkomstig het interactie-patroon tussen de deelsystemen van het systeemmodel met elkaar verbonden worden door middel van elektrische kabels. Bij een analoge systeem vinden zowel het rekenen in de computing nodes als de interactie tussen computing nodes via parallelle elektrische data links, plaats in de continue tijd en dus parallel en synchron. Volledige analogie bij data processing, data communicatie en synchronisatie waarborgt bij analoge rekenen behoud van parallelisme. De eigenschap van analoge rekenen dat rekenen, communicatie en synchronisatie plaatsvindt in éénzelfde tijd-verzameling, te weten de continue fysische tijd, houdt tevens in dat zowel parallelle modellering als parallelle programmering van een continu, dynamisch systeem een zo eenvoudige zaak is, dat bij wijze van spreken "een kind de was kan doen".

Koppeling van een digitale met een analoge computer tot een hybride computer heeft geleid tot opdeling van een rekentaak over beide machines. De toevoeging van een digitale computer heeft hybride rekenen toegankelijk gemaakt voor digitale programmering. Hybride computers hebben hun eindstadium bereikt met het voorzien van de analoge computer van een hybride computer met een digitaal instelbaar interconnectie-netwerk. Eén van de hybride computers bij het Rekencentrum van de TUDelft is hiermee

uitgerust geweest. Een groot bezwaar van analoge en hybride computers was en bleef dat de toepasbaarheid in sterke mate beperkt is tot de klasse van continue dynamische systemen⁶. Daarnaast was de op fysische gronden beperkte nauwkeurigheid in de praktijk vaak niet toereikend. Ook de komst van een nauwkeuriger digitale opvolger van de analoge integrator heeft niet kunnen voorkomen dat het tijdperk van parallel analoge en hybride rekenen reeds vele jaren achter ons ligt. Desalniettemin blijft kennis van analoge rekenen (mijns inziens) nog steeds waardevol als "een spiegel aan de wand" bij de verdere ontwikkeling van parallel digitaal rekenen.

Verkenkend onderzoek met betrekking tot parallel digitaal rekenen, gestart einde zeventiger jaren bij de faculteit Technische Natuurkunde van de TUDelft heeft geleid tot de bouw van een Delftse Parallele Processor DPP81 met 8 computing nodes, later gevolgd door een kleine serie DPP84's. Als standaard protocol voor informatie-overdracht is bij de Delftse Parallele Processor gekozen voor het zogeheten 'newspaper' protocol. Dit door gebruikers veelvuldig toegepaste protocol is gebaseerd op het uitgangspunt dat door middel van eenvoudige centrale synchronisatie elke computing node met behulp van het eigen locale programma in staat is in elke krant in een eigen 'rubriek' een lokale nieuwsbijdrage te schrijven alsmede het relevante nieuws in de rubrieken van de andere computing nodes te lezen. Het newspaper protocol kan worden opgevat als een extreme vorm van een 'message passing' protocol, waarbij steeds elke te verzenden boodschap wordt verstuurd naar elke computing node. Een DPP84 met 16 computing nodes heeft een aantal jaren dienst gedaan bij het Rekencentrum van de TUDelft.

De komst van parallel digitaal rekenen is in de tachtiger jaren (tijdelijk) in de kiem gesmoord door de intrede van de voor numerieke toepassingen commercieel succesvolle vectorcomputers⁷. De vooraanstaande plaats van de TUDelft op het gebied van parallel rekenen heeft in april 1987 als consequentie gehad de komst van de CONVEX/C1 vectorcomputer bij het Rekencentrum. De derde en laatste versie, de CONVEX/C3, is in bedrijf geweest tot juni van dit jaar. Vectorcomputers leverden een significante vergroting van de rekensnelheid op, terwijl het rekenen en ook de programmering in sterke mate sequentieel georiënteerd bleef. Echter, de bereikbare vergroting van de rekensnelheid bij vector computing bleek spoedig in de praktijk niet voldoende groot te zijn. Een ander heeft ertoe geleid dat het gebruik van de vectorcomputer ALLIANT van de faculteit Technische Wiskunde & Informatica na enkele jaren gereduceerd was tot het opstarten van de DPP84 van het practicum Parallel Rekenen.

De producenten van vectorcomputers zijn inmiddels van de commerciële markt verdwenen of zijn gefuseerd in een poging gezamenlijk een succesvolle sprong te maken naar de markt van efficiënte parallelle (digitale) computers met vele (sequentiële) computing nodes. De recente aanwinst van de TUDelft is de CRAY/T3E, een 'Multiple Program, Multiple Data' parallelle computer.

⁶ continu dynamisch systeem = systeem met geleidelijk veranderende toestand.

⁷vectorcomputing = 'lopende band' data verwerking van vectorberekeningen.

⁵ analogon van een systeem = systeem met gelijk gedrag.

Voor hedendaagse parallelle computers geldt dat zowel de connectiviteit als de schaalbaarheid nog verre van toereikend zijn. Toekomstige ontwikkelingen zijn nodig om de problematiek rond connectiviteit en schaalbaarheid tot een oplossing te brengen.

Parallelle simulatie in heden en toekomst

Een groot potentieel voordeel van parallel digitaal rekenen is dat het algemeen toepasbaar is. Echter, een groot nadeel tot dusver is dat analyse, parallel modelleren en efficiënte exploitatie van parallelisme in het algemeen nog zeer gecompliceerd is. De oorzakelijke reden hiervoor is dat bij parallel digitaal rekenen de computing nodes niet opereren in één en dezelfde tijdverzameling. Dit maakt het net als bij het "concert" voorbeeld noodzakelijk, dat synchronisatie plaatsvindt van buitenaf. Bij een concert kan eenvoudigweg parallelle synchronisatie worden toegepast door middel van visuele aanwijzingen van de dirigent aan alle musici. Bij parallelle gegevensverwerking is van eenvoudige parallelle synchronisatie nog geen sprake. De belangrijkste oorzaak ligt bij de architectuur en de toegepaste hardware van hedendaagse parallelle computers. Interacties tussen parallelle taken vereisen uitwisseling van verkregen resultaten tussen de betreffende computing nodes. Echter, op een tijdstip dat in een computing node één of meer tussenresultaten beschikbaar komen die verzonden moeten worden naar één of meer andere nodes, zal als regel het interconnectie systeem van een parallelle computer niet in staat zijn om de data van de zender node onmiddellijk en gelijktijdig te versturen naar alle betrokken ontvanger nodes. Bovendien zullen in het algemeen niet alle ontvanger nodes onmiddellijk en gelijktijdig toegankelijk zijn voor het ontvangen van data. Dit maakt het niet eenvoudig efficiënte exploitatie van parallelisme te bewerkstelligen bij zowel data processing, data communicatie en synchronisatie. De huidige parallelle computers zijn nog niet te beschouwen als computers, die bruikbaar zijn voor algemene doeleinden en eenvoudig te programmeren zijn. Er is veel inspanning besteed aan parallel programmeren, maar desondanks impliceren de huidige beperkingen en tekortkomingen dat parallelle computers niet voldoen aan de vereiste eenvoud van programmeren. Parallel programmeren is nu nog een ambacht, die specialistische vakkennis vereist. Dit is een belangrijke reden, waarom het gebruik van parallelle computers beperkt is gebleven tot die complexe en/of grootschalige toepassingen, waarbij de verwerkingstijd op een sequentiële computer onaanvaardbaar groot is. Een en ander is voornamelijk een gevolg van het feit dat de hardware, toegepast in de huidige generatie parallelle computers nog gebaseerd is op verouderde technologie. Zowel de functionele eigenschappen als de prestaties van deze hardware zijn verre van toereikend om te kunnen voldoen aan de huidige eisen vanuit de praktijk. Deze stand van zaken is echter geen maatstaf voor de (naaste?) toekomst en wel omdat de huidige stand van de technologie een grote verbetering in dit opzicht toelaat. In de praktijk worden zowel parallelle computers met gedistribueerd geheugen als parallelle computers met gedeeld geheugen gebruikt. Echter, een 'gedistribueerd

geheugen' architectuur past beter bij de interactie-structuur van taakstellingen, welke opgedeeld kunnen worden in veel deeltaken. Het is daarom te verwachten dat 'gedistribueerd geheugen' parallelle computers het gangbare type zal worden.

Voor gebruikers is het noodzakelijk dat parallelle computers in voldoende mate schaalbaar zijn. Schaalbaarheid houdt in dat bij gelijke schaalvergroting van rekenprobleem en parallelle computer, de rekestijd grosso modo gelijk blijft. Schaalbaarheid vereist dat uitbreiding van het aantal computing nodes of wel vergroting van het parallelisme van gegevensverwerking gepaard gaat met een navenante uitbreiding van het parallelisme van zowel data communicatie als synchronisatie. Bij de huidige generatie parallelle computers is de technische invulling van zowel de data communicatie als de synchronisatie een belangrijke oorzaak voor het feit, dat schaalbaarheid nog verre van voldoende is. Gebrek aan schaalbaarheid maakt efficiënte parallelle digitale simulatie van grootschalige toepassingen nog niet mogelijk. Naar de toekomst gezien laat schaalbaarheid nog veel te wensen over.

Electro-optische interconnectie

Data uitwisseling tussen computing nodes bij de huidige generatie parallelle computers is gebaseerd op het benutten van electriciteit als informatie-drager en vindt plaats met behulp van elektrische verbindingen. Echter, op grond van een aantal fysische eigenschappen verdient licht als informatie-drager verre de voorkeur boven electriciteit. Een belangrijke eigenschap is bijvoorbeeld dat in de vrije ruimte elkaar snijdende lichtbundels als optische verbindingen elkaar onderling niet beïnvloeden. Licht, samengesteld uit een aantal verschillende golflengten, kan als even zoveel informatie-dragers worden benut die dan via één optische verbinding parallel kunnen worden getransporteerd. Naast 'vrije ruimte' optische verbindingen kunnen ook 'geleide' optische verbindingen (optische fibers en optische waveguides) worden toegepast. Technologische en technische belemmeringen bij de massa-productie van electro-optische hardware voor massaal parallel werkende informatie-systemen bestaan vrijwel niet meer. Bij de huidige stand van de electro-optische technologie is dan ook te verwachten dat spoedig in de praktijk zal worden overgestapt van elektrische interconnectie systemen naar het toepassen van electro-optische interconnectie systemen, welke gebaseerd zijn op het gebruik van een verscheidenheid van optische verbindingen en electro-optische chips. Het gevolg zal zijn een belangrijke toename zowel in snelheid van data communicatie als in schaalbaarheid van de connectiviteit van interconnectie-systemen. Dit zal ook de schaalbaarheid van parallelle computers sterk doen toenemen en tevens wordt parallel modelleren en programmeren meer applicatie- en gebruikersvriendelijk. Dit laatste houdt in dat de technische invulling van de vormen van parallelisme zodanig moet zijn, dat gebruikers elke toepassing op eenvoudige wijze kunnen modelleren en programmeren tot een efficiënt, schaalbaar en overdraagbaar parallel programma. Naar mijn mening bestaat er dan ook geen twijfel dat druk vanuit de praktijk van gebruikers ook de commerciële

belemmeringen voor de producenten van parallelle computers zal wegnemen, om op een termijn van jaren (en niet van vele jaren) op de markt te komen met applicatie- en gebruikersvriendelijke schaalbare parallelle computers. Dit zal leiden tot de situatie dat parallel programmeren zeker zo eenvoudig is als sequentiële programmeren.

Een belangrijke stimulans voor de ontwikkeling van schaalbare en applicatie- en gebruikersvriendelijke parallelle computers kan zijn de behoefte aan parallelle gegevensverwerking die optreedt bij een moderne trend in de systeem- en regeltechniek. In uiteenlopende toepassingsgebieden, zoals gedragsdiagnose in techniek en psychologie, hebben neurale netwerken hun bruikbaarheid aangetoond om te kunnen fungeren als betrouwbare systeemmodellen. Heden ten dage ontstaat dan ook bij model-gebaseerd regelen van complexe systemen het noodzaak om neurale netwerken te gaan benutten. Hierbij kan als voorbeeld gedacht worden aan de toepassing van parallelle neurale netwerken bij de validatie van het ontwerp, de realisatie, de regeling en de kwaliteitsbewaking van proeffabrieken op systeem- en productie-niveau alsmede bij de regeling en kwaliteitsbewaking van de productie in de praktijk. Bij AKZO NOBEL vindt in deze richting een 'feasibility' studie plaats van hiërarchisch neurale gestuurde (proef)fabrieken. Spin-offs van dergelijke ontwikkelingen kunnen het commerciële 'point of no return' bij de productie van efficiënte, schaalbare en eenvoudig programmeerbare parallelle computers in sterke mate bespoedigen.

Een punt van aandacht bij parallelle simulatie van complexe en grootschalige systemen begint te worden het feit dat gedurende een simulatie experiment een grote hoeveelheid simulatie resultaten wordt geproduceerd. Zo is ook bij het concert voorbeeld sprake van een grote stroom van gegevens naar de toehoorders. Elke toehoorder is in staat, als gevolg van het feit dat de mens beschikt over massaal parallellisme, om deze gegevens snel in te lezen, te verwerken en op te slaan. Voor latere analyse en visualisering van simulatie resultaten is het noodzakelijk dat een grote stroom van gegevens voldoende snel in computergeheugen kan worden opgeslagen en uitgelezen. Dit is nodig om te vermijden dat toegankelijkheid en snelheid van toegang tot het geheugen van een parallelle computer het knelpunt gaat worden bij parallelle gegevensverwerking. Om dit te vermijden is vereist dat een parallelle computer in staat wordt gesteld via het interconnectie-systeem tot snelle parallelle communicatie tussen de computing nodes enerzijds en tussen de computing nodes en een parallel toegankelijk geheugen anderzijds. In dit verband is het vermeldenswaard dat ook bij toepassingen van grote database machines de noodzaak aanwezig is tot het benutten van de verschillende vormen van parallellisme. Ook dit kan een belangrijke stimulans zijn bij de toekomstige ontwikkeling van parallelle computers.

Modelleren van de evaluatie van concerten

Eerder is een concert gebruikt als voorbeeld van een evenement in de Aula van de TUDelft om het begrip parallellisme toe te lichten. Een concert zal nu als voorbeeld worden gebruikt om parallel modelleren te illustreren met betrekking tot het creëren van parallellisme. Veronderstel dat de TUDelft met betrekking tot de uitvoering van evenementen in de Aula overweegt te onderzoeken in hoeverre stelselmatig peilen van de beoordeling van een evenement door deelnemers zinvol en praktisch uitvoerbaar is met behulp van een informatie-verwerkend systeem. Stel dat hierbij als voorbeeld van een evenement een concert wordt verkozen. Het is dan nodig concert uitvoeringen te evalueren. Stel dat hiertoe aan concertbezoekers wordt gevraagd aan de evaluatie bij te dragen door direct na afloop van een concert zich uit te spreken over een aantal belangrijke kenmerken van een concertuitvoering door middel van waarderingscijfers. Om betrouwbare conclusies te kunnen trekken moet het evaluatie onderzoek zich uitstrekken over een voldoende groot aantal concerten en is het nodig dat elke keer een groot percentage van de concertbezoekers aan het evaluatie onderzoek meedoet. Een grote bereidheid tot deelname vereist dat de concert evaluatie gebeurt op basis van wederzijds belang bij de uitslag van de evaluatie, alsmede dat het geen bijzondere inspanning vraagt van de concertbezoekers en dat deelname aan het onderzoek kan plaatsvinden in een aanvaardbare en dus korte tijd. Voor onder andere de bereidheid tot deelname van concertbezoekers is het van betekenis dat de uitkomst van de evaluatie voor hen na afloop van een concert visueel (op een beeldscherm) ter beschikking komt in minder dan ongeveer 10 minuten. De eis van snelle evaluatie doet de vraag rijzen of wellicht parallelle evaluatie van de concerten noodzakelijk is. Om hierop antwoord te kunnen geven is het nodig de concert evaluatie eerst sequentiële te modelleren om vast te stellen of hiermee aan de gestelde snelheidseis kan worden voldaan. Indien dit niet het geval is, dan moet worden nagegaan of parallel modelleren door creatie van parallellisme zodanig mogelijk is, dat de parallelle verwerkingstijd aan de gestelde snelheidseis voldoet. Zoals eerder is benadrukt, hangt een modelbeschrijving af van het gebruiksdoel van een model. Dit betekent dat voor het nemen van een beslissing het niet nodig is bij het modelleren van de concert evaluatie grote nauwgezetheid toe te passen ten aanzien van alle in het eventueel later onderzoek te betrekken kenmerken. Sequentiële evaluatie met behulp van één computer leidt tot de volgende situatie. De waarderingscijfers van toehoorders worden, na op papier gezet te zijn, ingeleverd en door een computer operator (in volgorde van binnenkomst) sequentiële als 'invoer' data files ingevoerd en vervolgens door de computer sequentiële verwerkt met behulp van een 'concert evaluatie' programma. In het geval dat er 1200 toehoorders deelnemen aan de evaluatie omvat de sequentiële taak een serie van 1200 deeltaken om de 1200 'invoer'data files te reduceren tot even zovele 'interne'data files. Vervolgens worden deze 'interne'data files geïntegreerd tot één 'uitvoer'data file. Stel dat de gemiddelde tijd per toehoorder voor de handmatige invoer van gegevens en voor de verwerking van de 'invoer'data files tot

'interne'data files gelijk is aan respectievelijk 55 en 5 seconden. Stel dat de 'integratie'tijd in orde van grootte één minuut bedraagt. Dan is de totale tijd voor de invoer van de 'invoer'data files en voor de verwerking tot de 'uitvoer'data file respectievelijk 18 uur en 20 minuten en 1 uur en 41 minuten. De totale sequentiële verwerkingstijd voor 1200 toehoorders is dus ongeveer 20 uur. Dit betekent dat sequentiële invoer en verwerking duidelijk te veel tijd in beslag neemt. Implementatie van een sequentiële model van de concert evaluatie komt dus niet in aanmerking voor nader onderzoek.

Inbreng van parallellisme bij modelleren van de concert evaluatie is daarom noodzakelijk. Dit vraagt om het ontwerpen van een parallel informatie-verwerkend systeem, verder aangeduid als ParInfo systeem, dat wel in staat is om aan de gestelde snelheidseis te voldoen. De vraag is dus of het parallellisme van het ParInfo systeem toereikend gemaakt kan worden om de 'invoer'data files voldoende snel tot 'uitvoer'data file te verwerken. Een verbeterde situatie ten opzichte van puur sequentiële verwerking ontstaat door alle zitplaatsen in de aula te voorzien van een 'terminal' en deze via een stervormig interconnectie-netwerk te verbinden met de digitale computer. Dit maakt mogelijk dat de toehoorders rechtstreeks via toetsen hun waarderingscijfers parallel kunnen invoeren en aanbieden aan de digitale computer. Dat reduceert de tijd voor het handmatig invoeren van de 'invoer'data' files aanzienlijk en wel met ongeveer een factor 1200 of wel tot ongeveer 1 minuut. Echter, er verandert niets aan de tijd van ongeveer één uur voor de sequentiële verwerking van de 1200 'invoer'data files. Met andere woorden deze introductie van 'invoer'parallellisme is niet toereikend.

Een verdergaande creatie van parallellisme is dus nodig. Het beschouwde ParInfo systeem, samengesteld uit een digitale computer gekoppeld met 1200 terminals, is toegespitst op parallel aanbod van gegevens via 1200 terminals aan één digitale computer. Door de terminals te vervangen door computing nodes wordt het ParInfo systeem een parallel computing systeem, dat in staat is om naast parallele invoer tevens een rekentaak, opgesplitst in onafhankelijke deeltaken, efficiënt parallel ten uitvoer te brengen. Bij zo'n ParInfo systeem leidt parallel modelleren van de concert evaluatie op natuurlijke wijze tot opsplitsing in twee sequentiële deeltaken: een voorbereidingstaak en een nabewerkingstaak. De eerste taak betreft parallele invoer van gegevens door de toehoorders en vervolgens parallele verwerking door de computing nodes van de 'invoer'data files tot 'interne'data files. De tweede taak betreft de sequentiële integratie van de 'interne'data files, afkomstig van de computing nodes, tot de 'uitvoer'data file. Deze integratie wordt uitgevoerd door de digitale computer.

De voorbereidingstaak bestaat uit 1200 onafhankelijke parallele deeltaken. Dus deze taak heeft een expliciet⁸ verwerkingsparallellisme gelijk aan 1200 en vereist bij parallele verwerking geen data communicatie en synchronisatie. De te verwerken gegevens per parallele deeltaak zijn weliswaar verschillend, maar overigens zijn de deeltaken op identieke wijze gericht op reductie van

⁸expliciet parallellisme = parallellisme dat geen communicatie vereist.

gegevens. Dit houdt in dat voor het uitvoeren van de parallele deeltaken de computing nodes hetzelfde digitale programma kunnen gebruiken. Een en ander betekent dat de parallele invoer en parallele verwerking van de deeltaken plaats vindt met een efficiëntie van 100%. Voor de voorbereidingstaak betekent dit in vergelijking tot het sequentiële model een reductie van zowel de invoertijd als de verwerkingstijd van de 'invoer'data' files met een factor 1200. De voorbereiding van de evaluatie gegevens leidt tot een reductie van het aantal invoergegevens van de digitale computer. Bovendien geldt dat de snelheid van invoer van gegevens vanuit de computing nodes naar de digitale computer een factor van minimaal 1000 sneller gaat dan handmatige invoer. Een en ander reduceert de totale tijd voor invoer en verwerking van de 'interne'data files tot minder dan één minuut. Tevens treedt op een reductie van de nabewerkingstaak. Als gevolg hiervan daalt ook de verwerkingstijd van de nabewerkingstaak tot minder dan één minuut. Dit resulteert in een totale verwerkingstijd van minder dan 2 minuten, wat ruimschoots voldoet aan de snelheidseis. Het verkregen parallele model van de "concert" evaluatie komt dus, wat de snelheidseis betreft, in aanmerking voor nader onderzoek.

De introductie van computing nodes in plaats van terminals heeft tot dusver niet geleid tot de noodzaak wijziging aan te brengen in de topologie van het interconnectie-netwerk tussen de computing nodes en de digitale computer. Dit kan veranderen indien de vraagstelling bij de evaluatie van een evenement zo omvangrijk is, dat de sequentiële verwerking van de nabewerkingstaak te veel tijd blijkt te kosten. Dan moet worden overgegaan tot parallel modelleren van de nabewerkingstaak. Dit betekent dat de computing nodes benut moeten worden voor parallele verwerking van voor- en nabewerkingstaak. Parallelizeren van de integratie van vele data files tot één data file leidt als regel tot veel afhankelijkheid tussen de parallele deeltaken. Dit heeft als consequentie dat tussen computing nodes ook onderling uitwisselen van gegevens nodig is. Dit houdt in dat een interconnectie-netwerk vereist is met beduidend meer connectiviteit.

Uit voorgaande analyse volgt dat een ParInfo systeem een parallel informatie-verwerkend systeem moet zijn en tevens dat zo'n systeem technisch realiseerbaar is. Om antwoord te kunnen geven op de vraag of realisatie van een ParInfo systeem zinvol is, moet het belang van een ParInfo systeem voor de TUDelft meer duidelijk zijn alsmede is het nodig een kosten/baten analyse te maken.

Parallel modelleren

Parallel modelleren beoogt het construeren van een parallel systeemmodel, zodanig dat de rekentijd van het parallele systeemmodel op een parallele digitale computer aanmerkelijk kleiner is dan de rekentijd van een gelijkwaardig sequentiële systeemmodel op een sequentiële digitale computer. Bij parallele simulatie van complexe en grootschalige systemen is het een strikte noodzaak te kunnen beschikken over een parallel systeemmodel met veel

exploiteerbaar parallellisme. Dit betekent dat parallel modelleren van een systeem gericht moet zijn op construeren van een parallel systeemmodel met veel expliciet parallellisme. Parallele simulatie is dan eenvoudig, omdat er geen noodzaak is tot data communicatie. Bij een parallel model met uitsluitend expliciet parallellisme is het parallellisme met 100% efficiëntie te benutten. Dit treedt op indien een parallel model is opgebouwd uit onafhankelijke deeltaken. Een voorbeeld is het berekenen van de waarden van een gegeven functie, zoals het berekenen van de rek van een veer bij een gegeven verband tussen kracht en rek voor een reeks van krachten. Het berekenen van de rek kan voor al deze krachten parallel plaatsvinden om de simpele reden dat er geen interactie optreedt tussen deze berekeningen.

Vaak leidt modelleren van een systeem op natuurlijke wijze tot een opsplitsing van het systeem in vele onderling verbonden parallele deelsystemen. Dit betekent dat systeemdecompositie vaak een eerste middel is bij parallel modelleren om de hoeveelheid exploiteerbare parallellisme te vergroten.

Parallel modelleren van een systeem moet gericht zijn op:

- minimaliseren van de benodigde gegevensverwerking zowel bij data processing als bij data communicatie en synchronisatie,
- maximaliseren van het beschikbare parallellisme zowel bij data processing als bij data communicatie en synchronisatie.

Deze doeleinden zijn ten dele tegenstrijdig en laten zich (nu nog) moeilijk vertalen in algemeen geldende richtlijnen voor het construeren van een parallel systeemmodel. Dit betekent dat bij parallel modelleren het dikwijls noodzakelijk is om proefondervindelijk een aanvaardbaar compromis te vinden tussen deze doeleinden. Niet zelden is het nodig te zoeken naar andere, wellicht betere alternatieven.

Er bestaat veel digitale software voor het oplossen van sequentiële systeemmodellen. Dit betekent in de praktijk dat parallel modelleren veelal inhoudt het transformeren van het digitale programma van zo'n sequentieel model in een zo goed mogelijk parallel model. Zo'n transformatie is niet eenvoudig te verwezenlijken en bovendien als regel bevat het resulterende parallele systeemmodel weinig exploiteerbaar parallellisme. Voor parallel modelleren van bestaande digitale software geldt dat het een ambacht is, die specialistische vakkennis vereist.

Frusterend bij parallel modelleren van een systeem is dat formuleren van een op zich goed parallel systeemmodel bij implementatie op bestaande parallele computers toch vaak resulteert in een lage prestatie. Een grondoorzaak hiervoor is dat zowel de functionele eigenschappen van de architectuur als de technische eigenschappen van de hardware nog bij lange na niet toereikend zijn. Bijvoorbeeld kan een lage prestatie veroorzaakt worden door een tekort aan connectiviteit van het interconnectie systeem en/of inadequate kwaliteit van de koppeling tussen dit interconnectie systeem en de computing nodes. Daarnaast, door het nog vrijwel ontbreken van standaardisatie van de architectuur van parallele computers, geldt dat parallele software, ontwikkeld voor een bepaald type parallele computer, veelal slecht overdraagbaar is naar een parallele computer van een ander type.

Vermelding verdient dat een drastische reductie van de verwerkingstijd van parallele modellen toelaat te zoeken naar parallele modellen, die naast een hoge rekensnelheid ook uitblinken in robuustheid ten opzichte van andere eigenschappen, zoals ongevoeligheid van de verwerkingstijd bij wijzingen in modelparameters. Dit is van belang, omdat een belangrijke toename van de robuustheid van een parallel systeemmodel de toepasbaarheid hiervan aanzienlijk vergroot.

De ontwikkeling van parallel modelleren verkeert nog in een beginstadium. Het doel van parallel modelleren is zoveel mogelijk parallellisme te creëren en bij het benutten van het parallele model zoveel mogelijk parallellisme te behouden. Langs welke wegen dit bereikt kan worden vraagt nog het nodige onderzoek. Voor een tweetaal eenvoudige voorbeelden zal een begaanbare weg naar het gestelde doel worden aangestipt. Bij lineaire systemen is een potentiële mogelijkheid om parallellisme af te dwingen het toepassen van het superpositie beginsel door de oplossing te formuleren als de som van de oplossingen in een aantal bijzondere gevallen op een zodanige wijze dat het systeem in elk van deze gevallen veel expliciet parallellisme bevat. Zo kan de oplossing van een lineair elliptisch randwaarden probleem, gedefinieerd in een rechthoekig gebied, worden geformuleerd als de som van de oplossingen van een aantal deelproblemen, die elk veel expliciet parallellisme bevatten. Een ander voorbeeld is het bepalen van de oplossing van een lineair continu dynamisch systeem met een gegeven begintoestand, dat tevens wordt beïnvloed door externe invloeden. De oplossing is dan te beschouwen als de superpositie van een particuliere oplossing en het resterende inschakelverschijnsel. Voor het bepalen van elk van deze deeloplossingen is een oplossingsmethode te formuleren met veel expliciet parallellisme.

Numeriek modelleren

Alhoewel de mens in doen en laten ten opzichte van de omgeving reflexmatig in sterke mate parallel georiënteerd handelt, geldt dat bewust intelligent handelen zoals lezen en rekenen in sterke mate sequentieel georiënteerd is. Bij lezen van onder andere Nederlandse tekst geldt als volgorde: "van links naar rechts en van boven naar beneden". Ook bij rekenen met getallen is de mens bij het bepalen van de volgorde van uitvoeren van de optredende rekenoperaties aan regels gebonden. De potentie van mensen tot parallele informatieverwerking laat toe dat een mens bij het doen van onderzoek leert de problematiek in sterke mate parallel georiënteerd te overdenken. Toch heeft de mens bij modelleren van systemen nooit de behoefte gevoeld het in een systeem aanwezige parallellisme expliciet in de modelbeschrijving tot uiting te laten komen. Waarschijnlijk is dit achterwege gebleven, omdat het in de praktijk niet lonend was en niet omdat parallellisme van een systeem moeilijk te onderkennen is. Zo is bij in de praktijk veel voorkomende systemen direct te constateren dat parallellisme aanwezig is, omdat de relaties tussen systeemgrootheden, zoals bijvoorbeeld bij een continu systeem tussen temperatuur en gasdruk, parallel in plaats en tijd geldig zijn. Bij rekenen met getallen hanteert

een digitale computer dezelfde volgorde regels als de mens doet bij handrekenen. Dit heeft als consequentie gehad dat de digitale computer is ontstaan als een computer met één sequentiële rekenorgaan. Hetgeen in het voorgaande over modelleren gezegd is, geldt grotendeels voor systemen in het algemeen. De aandacht wordt nu beperkt tot in tijd en plaats continue systemen, zijnde een belangrijke categorie van systemen in onder andere de technische wetenschappen. De oplossing van een continu systeem bestaat in elk punt van het definitie-gebied. Modelleren van een continu systeem tot een goed gelijkend model zal in eerste instantie resulteren in een continu systeemmodel. Echter, een digitale computer kan een continu systeemmodel niet als zodanig nabootsen, omdat in een eindige tijd slechts berekeningen kunnen worden uitgevoerd voor een eindig aantal punten binnen het definitie-gebied. Dit betekent dat bij gebruik van een digitale computer een extra stap in het modelleren vereist is. Het continue systeemmodel moet worden benaderd door een goed gelijkend numeriek systeemmodel. Bovendien moet een sequentiële oplossingsmethode worden ontworpen, waarmee de oplossing in een groot aantal punten binnen het definitie-gebied nauwkeurig en snel op een sequentiële computer kan worden berekend.

Ontwerpen en ontwikkelen van numerieke modellen en sequentiële oplossingsmethoden heeft geleid tot een aparte tak der wiskunde: de numerieke wiskunde. In het tijdvak der numerieke wiskunde zijn vele spitsvondige methoden ontwikkeld, die optimaal waren toegespitst op het gebruik van sequentiële computers. Bij de komst van de vectorcomputers kon een groot deel van deze numerieke methoden naar tevredenheid worden aangepast. Dit geldt niet langer bij de komst van parallelle computers en wel omdat de in een sequentiële oplossingsmethode toegepaste spitsvondigheden veelal principieel seriële verwerking vereist en dus bij parallelizeren verloren gaan. Dit houdt in dat bij het onderzoek in de numerieke wiskunde een heroriëntatie zal moeten plaats vinden. Niet denkbeeldig is zelfs dat een situatie ontstaat, waarbij de (sequentiële) numerieke wiskunde als aparte onderzoekdiscipline verdwijnt en een onderdeel wordt van parallel modelleren.

Onderwijs

Voor wijd uiteenlopende aandachtsgebieden zowel in praktijk als in theorie gaat parallelisme een wezenlijke rol vervullen bij modelvorming en simulatie van complexe problemen. Dit vraagt als consequentie om een weerslag hiervan in het onderwijs. Dit kan leiden tot de noodzaak bij het onderwijs aandacht te besteden aan onderricht in de grondbeginselen van parallel modelleren en simuleren van systemen. In dit verband is het een goede stap dat de TUDelft vanuit het Onderwijs Stimulerings Fonds een initiatief in deze richting steunt.

Slotwoord

Of ik er in geslaagd ben het voor U aannemelijk te maken dat mijn uitspraak in de titel van mijn afscheidsrede " Parallelisme, een nieuwe dimensie in de wetenschap?!" op waarheid berust, dat weet ik niet. Het is aan U en anderen om dat te beoordelen. Wat ik hoop is dat U mijn openbare les in enigerlei mate heeft kunnen waarderen en dat voor U het begrip 'parallelisme' inmiddels een intrigerende betekenis heeft gekregen. Velen onder U hebben in mijn officieel werkzame leven wezenlijk wat voor mij betekent. Echter, U bent met te velen om U daarvoor nu afzonderlijk mijn waardering te laten blijken.

Eén uitzondering wil ik maken en wel voor Prof. dr. ir. C. J. D. M. Verhagen. Waarde Kees, jouw voortvarenheid bij het in dienst nemen van mij bij de TUDelft heeft mij definitief op het pad van toegepast onderzoek gebracht. Het heeft mij als generalist in bloed en nieren de kans geboden specialist te worden en te zijn en te blijven voor zover en zo lang dat nodig en nuttig was.

De tekst van mijn afscheidsrede is ten goede beïnvloed door kritisch commentaar van Ina Bareman, Maurice Elzas, Wim Smit, Peter Tas en Jan Zuidervaart, waarvoor ik hen van harte dank zeg.

Productiviteit staat hoog in het vaandel van de TUDelft. Ik dank Marja, mijn vrouw, voor haar bijdrage aan mijn productiviteit voor dat deel van mijn werk dat nuttig en nodig is, maar waaraan binnen de TUDelft zelf niet meer voldoende aandacht en tijd besteed kan worden.

Naar de toekomst gezien wil ik diegenen onder U, die bij de TUDelft werkzaam zijn, toewensen dat de uitspraak "Na regen komt zonneschijn" voor U allen zal betekenen volop zon.

Ik dank U voor Uw aandacht.

Ik heb gezegd.