

CWI

Beleidsnota 1988-1993

Projectbeschrijvingen



Centrum voor Wiskunde en Informatica
Centre for Mathematics and Computer Science
Amsterdam the Netherlands

Beleidsnota 1988-1993

Projectbeschrijvingen

januari 1988



Centrum voor Wiskunde en Informatica
Centre for Mathematics and Computer Science

Kruislaan 413 1098 SJ Amsterdam
P.O.Box 4079 1009 AB Amsterdam the Netherlands

Bibliotheek
Centrum voor Wiskunde en Informatica
Amsterdam

*Het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI)
is het onderzoeksinstituut van de Stichting Mathematisch Centrum,
die in belangrijke mate wordt gefinancierd door de
Nederlandse organisatie voor wetenschappelijk onderzoek NWO*

*Copyright © 1988, Stichting Mathematisch Centrum
Kruislaan 413, 1098 SJ Amsterdam
Postbus 4079, 1009 AB Amsterdam
Telefoon 020-592 9333*

Lijst van Projecten

Globale analyse	4	Computergrafiek	21
Niet-lineaire functionaalanalyse	4	Gebruikersinterfaces	22
Asymptotiek	5	Dialogoprogrammering	22
Systeem- en regeltheorie	5	Methodenbanken	23
Verwerking en reconstructie van beelden	6	Intelligente CAD-systemen	23
Computational statistics	7		
Semiparametrische statistiek	8		
Stochastische processen	8		
Analyse en besturing van informatiestromen in netwerken	9		
Numerieke programmatuur	10		
Numerieke oplossing van stationaire problemen	10		
Numerieke oplossing van evolutie-problemen	11		
Cryptografie	12		
Symbolisch rekenen	12		
Combinatorische optimalisering	13		
Getaltheorie met behulp van de computer	13		
Concurrency	14		
Formele specificatiemethoden	15		
Uitbreidbare programmeeromgevingen	15		
Expertsystemen	16		
Logische aspecten van kunstmatige intelligentie	16		
Termherschrijfsystemen	16		
Geïntegreerde gebruikersomgevingen	17		
Constructieve algoritmië	18		
Complexiteit en algoritmen	18		
Processor-architecturen	18		
Methodologie van open architecturen	19		
Gespreide besturingssystemen	19		
Gespreide adaptieve informatiesystemen	20		
Ergonomie en programmaconstructie	20		

Inleiding

Het CWI streeft ernaar, voorzover personele en financiële middelen dat veroorloven, waar mogelijk kansrijk geachte nieuwe onderzoeksprojecten in de wiskunde en informatica te ontwikkelen. Hiertoe zal steeds samenwerking met en afstemming op het onderzoek dat elders in Nederland (bij universiteiten, grote technische instituten en het bedrijfsleven) plaatsvindt worden nagestreefd. Veelal zullen nieuwe projecten aansluiten bij reeds lopende projecten, en zullen oude projecten verdwijnen of in vernieuwde en aangepaste vorm voortgang vinden.

Hieronder volgen korte beschrijvingen van de projecten welke het CWI in de komende tijd naar verwachting gaat uitvoeren. In een aantal van deze projecten gaat het om interdisciplinair onderzoek, waarbij meer dan één afdeling binnen het CWI is betrokken. Mede daarom is in onderstaande opsomming de huidige afdelingsstructuur slechts ten dele gevolgd. Gekozen is voor clustering rond de thema's Analyse, Stochastiek, Numerieke Wiskunde, Algebra & Combinatoriek, Programmatuur, Algoritmiëk & Architectuur en Interactieve Systemen. Ook bij deze indeling behoort een aantal projecten uiteraard nog tot meer dan één cluster.

Globale analyse

Globale analyse is een onderzoeksveld dat niet alleen een autonoom belang heeft, maar ook een belangrijk hulpmiddel is voor de mathematische fysica. Op het CWI betreft dit in het bijzonder de studie van differentiaalvergelijkingen op allerlei variëteiten, zoals projectieve ruimten en Grassmann variëteiten. De studie van invarianten zal hierbij een belangrijke plaats gaan innemen. Het onderwerp sluit aan bij ander, reeds lopend onderzoek op het CWI. Deelgebieden van de globale analyse zoals stabiliteitstheorie, ergodentheorie, vreemde aantrekkers en bifurcatie kwamen binnen het CWI reeds, al dan niet fragmentarisch, aan bod. Er is echter vooral verband met het onderzoek in het kader van het project dat thans nog loopt onder de naam Mathematische Fysica. In dit project wordt de aandacht speciaal gericht op integreerbare systemen (waaraan overigens niet alleen aspecten van globale analyse zit-

ten, maar ook bijvoorbeeld van representatietheorie en van algebraïsche meetkunde). Voorbeelden van integreerbare systemen zijn Todaroosters, de Korteweg-de Vries vergelijking, de zelfduale Yang-Mills vergelijking, niet-lineaire σ -modellen en nog een dertigtal andere vergelijkingen, waarvan verscheidene belangrijke toepassingen hebben. In het CWI-onderzoek ligt de nadruk hierbij op symmetrie-aspecten. Het ligt in de bedoeling het project Mathematische Fysica in de richting van de globale analyse te laten groeien. Verder wordt ook het lopende onderzoek aan analyse op halfenkelvoudige Liegroepen en symmetrische ruimten, waarvan het van belang is dat de op het CWI aanwezige expertise behouden blijft, ondergebracht in het project Globale Analyse.

Niet-lineaire functionaalanalyse

De klassieke lineaire analyse (op Hilbert- en

Banach-ruimten) heeft nu zijn voortzetting gevonden in de niet-lineaire functionaalanalyse. Daarbij gaat een krachtige stimulans uit van toepassingen in de natuurkunde en biologie. Voor een aantal daar gestelde problemen is het noodzakelijk bestaande technieken te verbeteren en ook nieuwe methoden te ontwikkelen. Daarbij wordt veel verwacht van meetkundige, en speciaal topologische methoden, zoals die van de 'Russische school' (Krasnoselski en anderen). Het moderne onderzoek sluit aan bij de methoden van Poincaré en Julia over dynamische systemen welke nu, na een halve eeuw, opnieuw sterk in de aandacht staan.

In Nederland wordt hoofdzakelijk gewerkt aan dynamische systemen voorzover dit zgn. Hamilton-systemen, met de hemelmechanica als toepassingsgebied, betreft. Het CWI-project beoogt het accent te leggen op dissipatieve dynamische systemen, en toepassingen daarvan zowel in de natuurkunde als de biologie te bestuderen. Het project beoogt ook meer inzicht te verkrijgen in de structuur

van de oplossingen van niet-lineaire functionaalvergelijkingen. Dergelijke vergelijkingen vormen een goed kader voor de beschrijving van onder andere chaos, vreemde aantrekkers en invariante maten.

Voor de kwalitatieve, of geometrische, theorie van oneindig-dimensionale dynamische systemen zijn traditioneel belangrijke inspiratiebronnen: diffusieproblemen, golfvoortplanting en vertraagde oorzaak-gevolg relaties. Vooral door werk op het CWI is recentelijk een nieuwe inspiratiebron aangeboord, en wel op het terrein van de biomathematica: partiële functionaal-differentiaalvergelijkingen die de dynamica van fysiologisch gestructureerde populaties beschrijven. Het juiste raamwerk voor deze klasse van problemen wordt verkregen door een systematisch gebruik van dualiteit. Met de tot nu toe ontwikkelde storingstheorie voor duale halfgroepen van operatoren zijn semilineaire problemen eenvoudig en effectief te analyseren. Op het programma staat nu de uitwerking in de context van een aantal concrete biologische modellen en herschrijving van de algemene theorie van functionaal-differentiaalvergelijkingen met behulp van het nieuwe begrippen- en stellingenapparaat. Het onderzoek zal vooral stabiliteits- en bifurcatietheorie betreffen, maar ook de mogelijke rol van dualiteit bij andere aspecten van de theorie. Bovendien zal worden gestreefd naar een theorie voor quasi-lineaire problemen. Ook op langere termijn beoogt dit project de integratie van het modelleren van biologische verschijnselen, de analyse van concrete problemen en de ontwikkeling van een algemeen functionaal-analytisch kader.

Asymptotiek

Asymptotische methoden zijn voor veel fysische of biologische problemen belangrijke hulpmiddelen om kwalitatieve informatie te verkrijgen over oplossingen van vergelijkingen en om benaderingen voor oplossingen te construeren. Op deze wijze kan men inzicht krijgen in de afhankelijkheid van parameters in deze problemen, welk inzicht niet altijd uit numerieke methoden is te krijgen.

Door de aanzienlijke ervaring die de laatste jaren is opgebouwd, is het CWI een vraagbaak geworden voor problemen op het gebied van de complexe analyse, integralen en differentiaalvergelijkingen. Mede omdat in dit verband herhaaldelijk van buiten ook voor het eigen onderzoek interessante problemen worden aangedragen, blijft voor deze taak mankracht gereserveerd.

Hiernaast wordt het systematisch onderzoek naar standaardmethoden en -technieken voortgezet. Een belangrijk deel van het onderzoek betreft de asymptotiek van integralen, en daarbij vooral uniforme ontwikkelingen. Een monografie over dit onderwerp is in voorbereiding. Voor de ontwikkeling van nieuwe ideeën en gefundeerde methoden vormen vaak functies uit de fysica en de statistiek de inspiratiebron. Hoewel de aanpak in dit project voldoende algemeen is, wordt er voornamelijk gewerkt aan toepassingsgerichte problemen, waarbij ook de numerieke bruikbaarheid aan de orde komt.

Systeem- en regeltheorie

Systeem- en regeltheorie stelt zich ten doel wiskundige modellen voor dynamische verschijnselen op te stellen en te analyseren en algoritmen te ontwikkelen voor regel- en voorspellingsproblemen. Het praktisch belang ligt in de groeiende maatschappelijke behoefte aan automatische regeling en gegevensverwerking, bijvoorbeeld de regeling van robots, verkeer en computers, de verwerking van spraaksignalen en de voorspelling van lucht- en waterverontreiniging.

Op het CWI heeft dit geleid tot onderzoek op het gebied van *realisatie* en *systeemidentificatie*, *regeltheorie* en *filtertheorie*. De systeemtheorie wordt van twee zijden bestudeerd: deterministisch en stochastisch. In de eerste categorie is een centraal onderdeel de studie van lineaire systemen, zoals die onder andere voorkomen in de mechanica, in elektrische netwerken en in de econometrie. Hierbij gaat de aandacht vooral uit naar realisatietheorie, metrisering en approximatie, en regeling en voorspelling. In het bijzonder wordt gewerkt aan de representatietheorie van systemen met een Hamiltoniaanse of gradiëntstructuur, hetgeen onder meer van belang is voor de dynamica van grote, zeer buigzame mechanische structuren. Veel regel- en voorspellingsproblemen zijn deels stochastisch van aard, bijvoorbeeld regeling van overbelasting van telefooncentrales en de verwerking van beelden. Het streven is daarom te komen tot een theorie voor stochastische systemen. Daartoe worden de stochastische

aspecten van bovengenoemde onderzoeksgebieden in diverse situaties bestudeerd. Ander onderzoek betreft systemen met een gegeneraliseerde toestandsruimte (descriptorsystemen). Dit zijn niet-noodzakelijk causale lineaire systemen, waarnaar het CWI hoopt de voor causale systemen zeer succesvol gebleken meetkundige benadering te kunnen uitbreiden. Voorts wil het CWI gaan werken aan een systeem- en regeltheorie voor systemen op eindige ruimtes. Hieraan is behoefte vanuit de communicatietechniek en de informatica. Concrete problemen zijn: signaalverwerking van discreetwaardige signalen; representatie- en regelproblemen in de informatica, speciaal voor relationele gegevensbanken en kennisbanken; en de regeling van geautomatiseerde produktiesystemen. Tenslotte lopen op het CWI nog twee door de STW gefinancierde projecten op het gebied van systeem- en regeltheorie: voorspellings- en regelproblemen voor verkeer op autosnelwegen, en de regeling van overbelasting van communicatiesystemen.

Verwerking en reconstructie van beelden

Op vele terreinen krijgt men steeds meer te maken met informatie in de vorm van beelden, zoals televisiebeelden, opnamen met behulp van röntgen- of gammastraling, satellietfoto's, en radar- en sonarkaarten. De (re)constructie, bewerking, transmissie en

analyse van zulke beelden, welke zonder de computer ondenkbaar zouden zijn, vormen thans een veelbelovend veld van studie op het grensvlak van wiskunde, informatica en techniek.

Er bestaat een grote verscheidenheid aan toepassingen, die zich weerspiegelt in het brede spectrum aan betrokken wiskundige disciplines: analyse, algebra, topologie, numerieke wiskunde, statistiek en systeemtheorie. Daarnaast speelt uiteraard de informatica een essentiële rol. Al deze voor dit typisch multidisciplinaire onderzoek benodigde ingrediënten heeft het CWI in huis en maken het bij uitstek geschikt om onderzoek op dit terrein aan te vatten. Binnen het Centrum bestaan er wat betreft dit onderwerp nauwe contacten tussen de verschillende deeldisciplines.

Een belangrijk onderdeel van beeldreconstructie is computertomografie, met toepassingen vooral in de medische wetenschap, maar ook bijvoorbeeld in de analyse van seismische gegevens in verband met de olie-exploratie. De wiskundige basis die in principe de oplossing van het probleem levert, de Radon inversieformule, stamt reeds uit 1917, maar in de praktijk zijn er allerlei obstakels, bijvoorbeeld de instabiliteit van numerieke procedures. Steeds belangrijker worden statistische technieken, vanwege de grote hoeveelheden te bewerken gegevens, de in de praktijk altijd optredende ruis, en de noodzaak *à priori* (statistische) informatie omtrent het object te kunnen gebruiken.

Een stroming in de digitale beeldverwerking die heden ten dage veel aandacht krijgt is de

mathematische morfologie, een systematische theorie van beeldtransformaties en -functionalen met als hoofddoel het formuleren van kwantitatieve uitspraken over beelden. De belangrijkste principes van de mathematische morfologie zijn (i) translatie-invariantie en (ii) semi-continuïteit. Een andere interessante ontwikkeling is voorts het gebruik van Markov-velden en 'statistische koeling' door Geman & Geman (1984) bij de segmentatie en restauratie van door ruis vervormde beelden. Hierin vindt men verscheidene elementen terug uit de statistische fysica, zoals stochastische Markov-velden, Gibbs-distributies en Ising-modellen.

Binnen dit project zal het CWI zich de komende jaren richten op de volgende onderwerpen:

Reconstructie van NMR-beelden. In dit reeds gestarte onderzoek, waarbij contact bestaat met Philips Medical Systems Division, bestudeert men reconstructieproblemen van bewegende beelden.

Mathematische morfologie. Het blijkt dat de algebraïsche structuur van de objectruimte (volledige tralie) een belangrijke rol speelt bij de karakterisering van morfologische transformaties (en functionalen) en dat translatie-invariantie slechts één van de vele mogelijkheden is; rotatie-invariantie in combinatie met schaalverandering is een tweede. Er zal in eerste instantie aandacht worden besteed aan de fundamentele algebraïsche en topologische aspecten van de mathematische morfologie. Naar verwachting zal geleidelijk aan ook aandacht worden besteed aan toepassingen.

Inverse verstrooiing en beeldverwerking van seismische data. Dit reeds lopende onderzoek geschiedt in samenwerking met het Koninklijke/Shell Exploratie en Productie Laboratorium en betreft de reconstructie van de structuur van aardlagen uit seismische signalen.

Statistische analyse van beeldgegevens. Doel is te komen tot een algemene methodologie voor het aanpakken van klassieke statistische probleemstellingen — van exploratieve data-analyse en modelbouw tot schattings- en toetsingsproblemen — terwijl de gegevens in de vorm zijn van beelden in plaats van cijferreeksen. Er is samenwerking met TNO en met CSIRO (Australië), onder meer wat betreft het gebruik van hetzelfde case-study materiaal. Een concreet statistisch onderzoek van beeldgegevens uit de elektronenmicroscopie is reeds gaande.

Men tracht een stochastisch model op te stellen met parameters die overeenkomen met voor de onderzoeker belangrijke vragen. In het algemeen bevat een beeld zoveel informatie dat de meeste nog hanteerbare modellen niet in staat zijn zo'n beeld te genereren. Het CWI wil zich richten op gedeeltelijk gespecificeerde modellen, voor de statistische analyse waarvan nieuwe principes nodig zijn. De verwachting is dat de *stochastische meetkunde* (de studie van stochastische geometrische objecten) en de *fractaltheorie* nuttige bouwstenen voor zulke modellen kunnen leveren: fractals bijvoorbeeld bij het meten en analyseren van texturen (een zeer belangrijk onderwerp, vooralsnog zonder theoretische onderbouwing), terwijl stochastische meetkunde al een belangrijke rol speelt bij de stereologie (uitspraken over ruimtelijke

objecten uit laag-dimensionale doorsneden). Beide disciplines hebben sterke banden met de mathematische morfologie, speciaal wat betreft het gebruik van 'structurele elementen'. Het valt te verwachten dat de stochastische meetkunde ook kan bijdragen tot de oplossing van problemen van *discretisatie* (discrete bemonstering van continue objecten). Verder wordt gedacht aan onderwerpen als de toepassing van *cellulaire automaten* in de beeldverwerking en het gebruik van *multi-resolutie methoden* voor bewegende beelden. Voor een groot deel van dit onderzoek is het noodzakelijk te beschikken over *beeldverwerkingsapparatuur* met bijbehorende software. Hierbij zal de afdeling Interactieve Systemen de nodige inbreng moeten leveren. Het CWI streeft naar een spoedige introductie van deze hulpmiddelen.

Computational statistics

Traditioneel is het statistisch onderzoek in Nederland zeer theoretisch van aard. Voor een gezonde ontwikkeling van het fundamentele statistische onderzoek op het CWI is echter het innovatieve gebruik van moderne hard- en software onmisbaar, en er dient daarvoor dan ook een onderzoeksgroep te worden opgezet.

Computational statistics is een nieuw project (nu nog deelproject van Toegepaste Statistiek). Door de explosieve groei van rekenkracht en -middelen zijn allerlei voordien onhanteerbare statistische modellen en analysemethoden praktisch bruikbaar geworden, hetgeen ook weer heeft geleid tot interes-

sante nieuwe wiskunde, zoals bij Efron's bootstrap-methode het geval is geweest. Expertise op dit gebied is een onmisbare schakel om resultaten van wetenschappelijk onderzoek in de mathematische statistiek in de praktijk te brengen en om statistische consultatie van betekenis uit te voeren. Het CWI is betrokken bij samenwerking in de toepassing van statistiek op praktijkproblemen (bijvoorbeeld het enkele jaren durende consultatieproject in samenwerking met Rijkswaterstaat en het KNMI betreffende overschrijdingslijnen langs de Nederlandse kust) en de ontwikkeling van dergelijke hulpmiddelen zal zowel zulke samenwerking als ook het gebruik van daaruit voortvloeiende resultaten door anderen sterk bevorderen. Verder is men bezig een pakket te ontwikkelen voor de data-analyse van door de tijd lopende waarnemingsprotocollen in samenwerking met ontwikkelingspsychologen en ethologen. Ook is een tweetal STW-aanvragen in voorbereiding betreffende de statistische analyse van de betrouwbaarheid van programmatuur (debugging modellen) en spline smoothing bij het Wicksell-probleem (stereologie).

Dit project sluit enerzijds aan bij traditioneel sterke onderzoeksactiviteiten op het CWI zoals de studie van semiparametrische modellen, een onderwerp uit de fundamentele statistische theorie dat ook internationaal sterk in de belangstelling staat. Uit deze hoek zijn bijzondere ontdekkingen te verwachten op het grensvlak tussen mathematische statistiek en numerieke wiskunde, bijvoorbeeld in verband met keuzen van discretisatie/smoothing parameters. Het CWI zal de computerimplementatie van algemene semiparametrische schattingsmethoden gaan

onderzoeken, en wil op den duur bijdragen aan een integratie van algoritmiek en stochastiek in de statistiek.

Semiparametrische statistiek

Aangezien de belangstelling voor dit onderdeel van de theoretische statistiek nog steeds groeiende is, zal het op het CWI reeds enige jaren lopende onderzoek in de semiparametrische statistiek worden voortgezet in een aantal nieuwe richtingen. Het fundamentele statistische onderzoek op het CWI richt zich vooral op situaties met parameters of waarnemingen uit oneindig-dimensionale ruimten ('abstract inference'). Doel in dit project is het afleiden van statistische procedures en het bepalen van hun eigenschappen bij semiparametrische modellen (die deels parametrisch, deels niet-parametrisch van aard zijn), alsmede toepassing van technieken uit de parametrische statistiek bij niet-parametrische modellen, in het bijzonder schattingstheorie.

In de semiparametrische schattingstheorie tracht men alleen dat deel van een verschijnsel waarin men is geïnteresseerd parametrisch te modelleren. Daardoor zijn voor dat deel kwantitatieve conclusies te trekken zonder nadere onrealistische aannamen te hoeven maken. In het kader van de vraag hoe optimale schatters te construeren zullen de resultaten van het onderzoek aan de NPMLE (non-parametric maximum likeli-

hood estimator) als gegeneraliseerde M-schatter nu worden geformuleerd voor een algemene genormeerde vectorruimte. Die theorie moet dan speciale gevallen zoals het Cox regressiemodel kunnen bevatten en verklaren. Verder zal in het kader van het Landelijk NWO-project 'Statistiek voor grote parameterruimten' onderzoek worden verricht naar toepassing van moderne empirische procestheorie op semiparametrische modellen en zal worden samengewerkt met andere Nederlandse statistici (KUN, RUL, UvA, VU).

Bootstrapmethoden worden bij veel statistische problemen toegepast om de variabiliteit van statistische grootheden te schatten. Zij zijn semiparametrisch in bredere zin, namelijk dat men niet-parametrische methoden gebaseerd op empirische verdelingsfuncties gebruikt om de nauwkeurigheid van schattingen in onder andere parametrische modellen te bepalen. Het onderzoek zal worden voortgezet in de volgende richtingen: constructie van bootstrap-betrouwbaarheidsintervallen, gebaseerd op gegeneraliseerde L-statistics; gladheidsaannamen bij het bewijzen van asymptotische optimaliteitseigenschappen van de bootstrap; en het asymptotisch gedrag van jackknife- en bootstrapschatters in situaties waar klassieke methoden onbruikbaar zijn. Ook zal een cursus voor potentiële gebruikers van bootstrapmethoden bij industrie en overheid worden georganiseerd.

Stochastische processen

Op het CWI komen bij diverse onderdelen van de hier beschreven projecten stochastische aspecten aan de orde, bijvoorbeeld bij de regeling van overbelasting van telefooncentrales, de verwerking van beelden, de prestatieanalyse van computer- en communicatienetwerken en bij algoritmen voor combinatorische optimalisering. Ook is er thans nog onderzoek aan dynamische systemen gaande dat zich richt op het effect van stochastische storingen en op de bepaling van transportparameters in verband met stochastische wandelingen op random netwerken. Het in het onderhavige project beschreven onderzoek is gericht op stochastische processen gezien vanuit de statistiek en de waarschijnlijkheidstheorie. Op het CWI bestudeert men stochastische processen in ruimte en tijd, onder meer stationaire processen en stochastische modellen voor verkeersstromen. Ook wordt aandacht gegeven aan de fundamentele theorie van de statistische analyse van stochastische processen.

In het onderzoek welke stationaire processen zijn te beschrijven als functionalen op een Markov-keten tracht men op het CWI inzichten uit de fysica, waar bepaalde processen worden beschreven door 'interactie', te gebruiken. Speciaal zal de aandacht uitgaan naar een meerdimensionaal rooster van stochastische variabelen, en de tijdsevolutie daarvan. Het onderzoek naar de uniciteit van

de Gibbs-verdeling voor zo'n rooster (hier zijn relaties met het verschijnsel van fase-overgang) gaat voort. Er zijn raakvlakken met problemen zoals filevorming in de verkeertheorie en de ontwikkeling van cellulaire automaten in de informatica. Ook het kanstheoretische aspect van de beeldanalyse zal worden verkend, vooral in verband met de beeldrestauratiemethoden gebaseerd op het werk van Geman & Geman (digitalisatie leidt tot effecten van discretisatie en anisotropie). Voor een goede detectie van onregelmatigheden en wijzigingen in verkeersstromen is het van groot belang het statistisch gedrag te kennen van bepaalde gemeten parameters zoals de gemiddelde snelheid en volgtijd. Daartoe worden, in nauwe samenwerking met Rijks-waterstaat, stochastische modellen in ruimte en tijd voor de verkeersstromen ontwikkeld en later getoetst aan gegevens van Rijks-waterstaat. Zo'n model beschrijft het ontstaan en het verloop van schokgolven en de verplaatsing en aangroeiing van verstoringen.

Wat de statistische analyse van stochastische processen betreft, gaat speciaal de aandacht uit naar de analyse van waarnemingen aan een semimartingaal aan de hand van zijn Grigelionis-karakteristieken, die de infinitesimale probabilistische ontwikkeling van het proces beschrijven. Tegelijkertijd wordt gebruik gemaakt van de moderne theorie van de asymptotische statistiek, gebaseerd op lokale asymptotische normaliteit (Ibragimov en Has'minskii). Een belangrijk thema is het onderzoek aan gedeeltelijk gespecificeerde modellen. Daarbij valt te denken aan regressie-analyse en tijdreeksanalyse waarin alleen eerste- resp. tweede- orde karak-

teristieken van een proces worden gemodelleerd. Een optimaliteitstheorie voor schatters in zulke modellen bestaat nog amper. Veel aspecten van dit onderzoek sluiten aan bij het project Semiparametrische statistiek.

Analyse en besturing van informatiestromen in netwerken

Dit project omvat de prestatie-analyse van computersystemen en telecommunicatienetwerken. De nadruk ligt hierbij op de bestudering van congestie (opstoppen) en de controlemechanismen daarvoor. Naast traditionele toepassingen in de telefonie richt het CWI-onderzoek zich vooral op de communicatie binnen en tussen computersystemen, en via satellieten. De snel groeiende invloed van computer- en communicatiesystemen in het dagelijks leven maakt dit project van groot maatschappelijk belang. De verkeersstromen in zulke systemen zijn stochastisch van aard. De wiskundige theorie van complexe stochastische systemen moet nog grotendeels worden ontwikkeld. Het te bestuderen model bestaat uit een netwerk van Bedieningsorganen met wachtrijen van klanten die daarvan gebruik willen maken. Men tracht dan uitspraken te doen over wacht- en verblijftijden van klanten, wachtrijlengten en blokkeringskansen.

Op het CWI komen zowel fundamentele als toepassingsgerichte kanten van het onderwerp aan bod.

Bij de analyse van wachtrijmodellen ligt de nadruk op exacte analytische technieken, in het bijzonder voor randwaardeproblemen,

tijdsafhankelijk gedrag en interactie tussen interne en externe verkeersstromen.

In de telecommunicatie voltrekken zich nog steeds grote veranderingen. Door de toenemende digitalisering in de communicatie zullen spraak en beeld naast computergegevens over hetzelfde netwerk worden verzonden (ISDN = Integrated Services Digital Network). De wachtrijtheorie is het geschiktste hulpmiddel om kwantitatief inzicht te krijgen in de prestatie van zo'n netwerk. Het CWI-onderzoek zal zich de komende jaren richten op regeling van overbelasting (zie ook *Systeem- en regeltheorie*) en integratie van verscheidene verkeerstypes, alsmede geautomatiseerde fabricage.

In de prestatie-analyse van computersystemen zal de aandacht (blijven) uitgaan naar diverse protocollen (token-ring en andere), feedback mechanismen (onder meer in verband met time-sharing) en machinevolgordeproblemen. Verder zal het CWI, aansluitend bij de internationale trend, zich intensiever bezighouden met 'software tools' zoals standaardpakketten voor wachtrij-analyse.

Tenslotte zal onderzoek beginnen naar de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van systemen die onderhevig zijn aan storing en slijtage (gemodelleerd als een stochastisch proces). Er is sterke overeenkomst met de wachtrij-analyse van complexe netwerken. In eerste aanleg zal worden gewerkt aan beslissingsregels voor systemen met twee componenten. Later zullen systemen met meer componenten aan de orde komen.

Numerieke programmatuur

Dit project bestaat uit twee aandachtsgebieden: de programmeertaal Ada, en parallel numeriek rekenen.

De *programmeertaal Ada* (US Department of Defence, 1983) is in de eerste plaats ontworpen voor 'real-time computation'. Algemeen wordt echter aangenomen dat Ada ook op vele andere gebieden zal worden gebruikt, onder andere bij het uitvoeren van grootschalige wetenschappelijke berekeningen. Omdat numerieke berekeningen optreden in zeer veel wetenschappelijke en technische computertoepassingen, is de noodzaak van numerieke programmatheken in Ada duidelijk. De eis van portabiliteit sluit de mogelijkheid uit eenvoudigweg interfaces met bestaande programmatheken in andere programmeertalen te leveren. Voor het maken van overdraagbare programmapakketten is volledige uniformiteit noodzakelijk betreffende het gebruik van de vele mogelijkheden van de taal zoals nieuwe types, operatoren, hiërarchische indeling van bibliotheken, programma-opbouw, gescheiden compilatie en het 'linken' van programmamodulen, foutenopvang en parallele verwerking. Door de Europese Commissie wordt invoering van Ada in het kader van de bevordering van het maken van grootschalige, betrouwbare, efficiënte en overdraagbare programmatuur krachtig gestimuleerd.

In het kader van de internationale werkgroep Ada-Europe Numerics Working Group en een door de EG gesubsidieerd project zal op het CWI aan de volgende doelen worden meege-

werkt:

- Uitbreiding van Ada door het voorstellen en invoeren van een universele standaard ten behoeve van standaard elementaire functies.
- Het bereiken van hoge nauwkeurigheid in eindresultaten van samengestelde floating-point berekeningen (project onder leiding van Siemens München).
- Het zoeken naar een mogelijk vervolg in ESPRIT-verband van een inmiddels afgeronde 'pilot study' voor het maken van een volledige numerieke programmatheek in Ada.

Parallel numeriek rekenen speelt in op de verwachting dat de volgende doorbraken op het gebied van computertoepassingen zullen plaatsvinden met behulp van parallele processoren. Men denke hierbij in de eerste plaats aan numerieke toepassingen zoals de modellering en simulatie van fysische en chemische processen (drie-dimensionale stromingen rond een vliegtuig, waterstromingen, vervuilingseffecten, moleculaire structuren, veel-deeltjes problemen), maar ook aan niet-numeriek getinte processen (economische modellen, verkeerssimulatie, vertaalprojecten, kunstmatige intelligentie). Thans opereert reeds een flink aantal parallele systemen (CRAY X-MP, iPSC, Sequent, Alliant, Connection Machine) met uitgebreide software (bedrijfssystemen, C-, Pascal-, Fortran 77-compilers) met veel succes in de praktijk. Op diverse plaatsen in het buitenland treft men deze computers aan bij grote bedrijven, onderzoekslaboratoria en universiteiten. Hierdoor hebben onderzoekers bij die instel-

lingen een significante voorsprong kunnen opbouwen, en zijn hun onderzoekprogramma's krachtig gestimuleerd.

Doel van het voorgestelde CWI-project is om parallele numerieke methoden te onderzoeken voor het oplossen van de wiskundige problemen die ontstaan bij het modelleren van toepassingen als bovengenoemd, en daarbij landelijk een coördinerende rol te spelen. Hierbij moet worden opgemerkt dat voor de ontwikkeling van dit onderzoek de beschikbaarheid van een bestaand parallel systeem van groot belang is. Helaas beschikt het CWI nog steeds niet over toegang tot zo'n parallel systeem.

Een soortgelijk project op het gebied van vectorrekenen is enkele jaren geleden op het CWI gestart. Dit onderwerp geniet grote interesse in Nederland. Een door het CWI georganiseerd landelijk colloquium trok enorme belangstelling en in het najaar van 1987 organiseerde het CWI een cursus 'Vector- en Parallel Rekenen'.

Numerieke oplossing van stationaire problemen

Het onderzoek in dit project richt zich op de ontwikkeling en analyse van moderne technieken voor het efficiënt oplossen van randwaardeproblemen. De vergelijkingen waar deze problemen mee zijn verbonden komen zeer vaak voor in technische toepassingen (sterkteleer, stromingsleer, elektriciteitsleer, e.d.). Omdat het onderzoeksgebied zeer uitgebreid is concentreert het CWI zich in dit project op de bestudering van

multiroostertechnieken. Met deze technieken kan men zeer grote stelsels algebraïsche vergelijkingen zeer efficiënt oplossen.

Een deel van het project betreft voortzetting van lopend onderzoek. Het gaat hierbij om de fundamentele analyse van de multiroosteralgoritmen en de samenhang met andere defectcorrectietechnieken, bestudering van singulier gestoorde randwaardeproblemen, het gebruik van adaptieve methoden bij (bijna-) discontinuïteiten in de oplossing van een partiële differentiaalvergelijking, en achtergrondonderzoek voor de ontwikkeling van efficiënte methoden voor de compressibele Navier-Stokes vergelijkingen.

In opdracht van de European Space Agency ESA wordt thans onderzoek uitgevoerd naar de convergentieversnelling van de Eindige Volume Euler-discretiseringsmethode met behulp van de multiroostermethode. Dit bouwt voort op resultaten behaald in de ontwikkeling van een snelle oplosalgoritme van de stationaire Eulervergelijkingen voor twee-dimensionale stromingen op basis van multiroostertechnieken. Het onderzoek richt zich op twee-dimensionale stromingen (ook met discontinuïteiten) in verschillende soorten kanalen of om vliegtuigprofielen.

Een nieuw onderzoek betreft de studie van numerieke methoden voor halfgeleiderberekeningen. Deze zijn van cruciaal belang voor de elektronische industrie. Het afgelopen decennium is namelijk de computersimulatie van halfgeleiders, naast en in plaats van het maken van prototypes, essentieel geworden bij de ontwikkeling van halfgeleiders en chips. Het mathematische model bestaat uit een stelsel gekoppelde sterk niet-lineaire partiële differentiaalvergelijkingen. De

huidige situatie is uiterst onbevredigend, want de numerieke methoden zijn veel te langzaam, terwijl ook de betrouwbaarheid te wensen overlaat. Het probleem is niet te verhelpen door meer computerfaciliteiten: de numerieke technieken zijn ontoereikend en vereisen fundamenteel onderzoek. De zich voordoende problemen zijn: sterke niet-lineariteit, variabelen die sterk in grootte-orde variëren, sterk singulier gestoord gedrag, en een ingewikkelde geometrie. Onderzoeksdoelen zijn: wiskundige analyse, ontwikkeling van aangepaste discretiseringstechnieken, adaptieve rooster-generatie, niet-lineaire multiroostermethoden, en drie-dimensionale problemen.

Onderzoek op dit terrein vindt onder andere plaats op de Technische Universität Wien, Bell Laboratories, Stanford en Philips ISA in Eindhoven. Met de laatste zijn reeds contacten gelegd, wat heeft geleid tot contractresearch. Het beoogde project is echter van veel fundamenteeler aard en moet dan ook worden beschouwd als nieuw. Het wordt uitgevoerd in het kader van het nationale Innovatieve Onderzoek Programma (IOP) voor IC-technologie.

Numerieke oplossing van evolutie-problemen

Dit project omvat de ontwikkeling, analyse en documentatie van algoritmen voor het bepalen van numerieke oplossingen van beginwaardeproblemen voor partiële differentiaalvergelijkingen. Het gaat erom inzicht te krijgen in de stabiliteit, nauwkeurigheid en efficiëntie van het algoritme. Het onderzoek

is onder meer van belang voor de numerieke stromingsleer. Mede door de komst van supercomputers is dit aandachtsgebied sterk groeiende en van groot praktisch belang.

Belangrijk onderdeel van dit project is het onderzoek naar adaptieve roostertechnieken. Deze komen aan de orde bij de ontwikkeling van numerieke programmatuur, indien men streeft naar maximale gebruikersvriendelijkheid door het numerieke oplosproces zo veel mogelijk automatisch te laten verlopen. Hieraan bestaat vooral behoefte bij ingenieurs, chemici, electronici, etc. in de grote industriële research-laboratoria, die weinig of geen kennis hebben van de gebruikte oplosmethode. Een illustratief voorbeeld is een evolutievergelijking met als oplossing een steil golffront. Voor zo'n berekening is een zeer fijn, en dus duur rekenrooster nodig. Aanpassing daarvan aan de lokale omstandigheden, het liefst gestuurd door realistische foutschatters, zou tot een aanzienlijke kostenbesparing kunnen leiden. Hiervoor is echter nog veel fundamenteel onderzoek nodig. De Nederlandse universiteiten werken nog niet aan adaptieve roostertechnieken. Het CWI heeft al wel een project in deze richting lopen, waarvan het onderhavige (STW-) project als een ombuiging kan worden gezien. Er zal worden samengewerkt met Shell, waar dergelijk onderzoek ook plaatsvindt. Ook zal achtergrondonderzoek naar Lagrangemethoden plaatsvinden. Internationaal staat het onderwerp volop in de belangstelling. Met een aantal buitenlandse instellingen zijn reeds contacten gelegd: het Reading Institute for Computational Fluid Dynamics (Oxford), Rensselaer Polytechnic Institute and NASA Langley Research Center, en de Universiteit

ten van Leeds en Valladolid.

Hiernaast is in het kader van de samenwerking tussen CWI, Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium onderzoek gepland naar drie-dimensionale ondiep-watervergelijkingen. Met de introductie van vectorcomputers is de numerieke behandeling van zulke problemen in zicht gekomen. In een 'meerlagenmodel', afkomstig van Rand Corporation (VS), zullen tijdsafhankelijke 3D-stromings- en transportprocessen worden berekend. Wegens de in vergelijking met een 2D-model grotere rekeninspanning is een zo efficiënt mogelijk algoritme hier van groot belang. Het CWI heeft al ruime ervaring met expliciete technieken op vectorcomputers voor ondiep-watervergelijkingen. Verder is een STW-project aangevraagd voor de ontwikkeling van een Boussinesq-model, uitgaande van de programmatuur die is ontwikkeld in het kader van het in 1987 afgesloten STW-project: 'Evaluatie en stabilisering van numerieke methoden voor de ondiep-water vergelijkingen'.

Overig onderzoek in dit project betreft stabiliteit en convergentie voor niet-lineaire problemen, de incompressibele Navier-Stokes vergelijking en differentiaal-algebraïsche vergelijkingen. Tenslotte zal in het kader van de door de Open Universiteit te ontwikkelen Wiskunde-leergangen achtergrondmateriaal worden geleverd voor het gebruik van numerieke standaardpakketten.

Cryptografie

Naar verwachting zal het gebruik van gespreide computersystemen sterk toenemen, bijvoorbeeld in elektronische betalingssystemen en in netwerken waarin vertrouwelijke gegevens worden verstuurd. De computers in zo'n systeem zijn veelal door onveilige kanalen verbonden. Daardoor kan informatie vervalst of 'afgeluisterd' worden. Met behulp van cryptografische technieken kan men de veiligheid van gespreide computersystemen verhogen. In de cryptografie bestudeert men zowel het beveiligen van vertrouwelijke gegevens door vercijfering als het verhinderen van vervalsing van informatie die over een onveilig kanaal wordt verstuurd. Voor het laatste voorziet men de gegevens van een 'digitale handtekening' en een protocol ter versturing van de boodschap.

Het CWI-project richt zich op de ontwikkeling en implementatie van cryptografische protocollen, onderzoek naar bestaande systemen zoals DES (Data Encryption Standard), en het ontwikkelen van de wiskundige onderbouwing.

Hoofdonderwerp voor de komende jaren zal zijn het maken van nieuwe protocollen ter beveiliging van gespreide systemen, in het bijzonder voor het versturen van boodschappen, betalingen, geloofsbrieven en in het algemeen berekeningen door meerdere gebruikers. De beoogde protocollen zijn gebaseerd op de reeds bestaande ideeën rond 'untraceability' en 'limited pseudonymity'. Dit vereist verder vernieuwend onderzoek op het gebied van protocollen, cryptografische

algoritmen en complexiteits-theoretische analyse.

Verder zal het algemene theoretische onderzoek naar cryptografische protocollen en de studie van conventionele cryptografische technieken (onderzoek van het DES-systeem, ontwerp en evaluatie van algoritmen) worden voortgezet.

Ook wordt verder gewerkt aan plannen die de functie van het CWI als 'clearing house' van cryptografische expertise zullen gaan versterken. Activiteiten op dit gebied omvatten bijvoorbeeld advisering betreffende de aanschaf van cryptografische apparatuur door niet-militaire Nederlandse organisaties, de organisatie van Europese samenwerking om te komen tot cryptografische standaardalgoritmen, en diverse consultaties met banken.

Symbolisch rekenen

Symbolisch rekenen en formulemanipulatie is een steeds belangrijker hulpmiddel aan het worden voor de wiskundige onderzoeker. In allerlei gebieden is inmiddels de grens bereikt van wat nog met de hand kan worden uitgevoerd. Voorbeelden zijn de berekening van karakertabellen van groepen en berekeningen aan Lie-groepen van vectorvelden in verband met niet-lineaire filtertheorie. In de natuurkunde is een klassiek voorbeeld de uitwerking van de Dirac-algebra in berekeningen van elementaire deeltjes-processen met behulp van het programma SCHOONSCHIP. Nu zijn er al ruim twintig jaar pakketten op de markt (SCHOONSCHIP, REDUCE, CAYLEY, MACSYMA, μ Math), en het CWI zou zich

kunnen beperken tot het beschikbaar stellen hiervan (CAYLEY en MACSYMA zijn reeds aanwezig). Om een goed en efficiënt gebruik te bereiken is het echter gewenst dat het CWI actief betrokken is bij de verdere ontwikkelingen op dit gebied. Er is nog zeer veel onderzoek te verrichten in deze nog prille tak van computerberekeningen. Daarbij zou men zich speciaal kunnen richten op ondersteuning van diverse onderzoeken op het CWI waarbij dit zeer welkom zou zijn (procesalgebra, filtertheorie, asymptotische ontwikkelingen in de statistiek, etc.). Voor het CWI is dit een vrijwel nieuw project. In Nederland wordt alleen op de Universiteit Twente en de KU Nijmegen onderzoek in deze richting gedaan. Voordeel van het CWI is de aanwezigheid van unieke computervoorzieningen en de bijbehorende expertise.

Combinatorische optimalisering

Meetkundige en kansgestuurde methoden in de combinatorische optimalisering staan in toenemende mate in de belangstelling.

Meetkundige aspecten duiken op bij modellen, bewijsmethoden, algoritmen en constructie- en decompositiemethoden. Binnen de meetkunde bestrijken zij een breed gebied, waarin euclidische ruimten, eindige meetkunden, homotopietheorie en algebraïsche meetkunde voorkomen. De meest in het oog springende voorbeelden zijn:

- de polyhedrale combinatoriek, waarbij lineaire programmerings- technieken worden gebruikt om te komen tot de polynomiale

oplosbaarheid van allerlei problemen en tot de praktische oplosbaarheid van groot-schalige beslissingsproblemen (zoals een handelsreizigersprobleem met 2392 steden);

- de basisreductiemethode voor roosters, aansluitend bij de klassieke meetkunde der getallen en met toepassingen in combinatorische optimalisering, cryptografie en getaltheorie;
- de homotopiemethoden, voor het ontwerpen van 'very large scale integrated circuits', gebruik makend van de topologische structuur van de onderliggende oppervlakken;
- de 'computational geometry', van belang voor gebieden als patroonherkenning, 'computer graphics', 'robotics' en 'concurrency control in databases'.

Daarnaast noemen wij de eigenwaardenmethoden en de corresponderende theorie van orthonormale representaties, de constructie van optimale codes, de decompositiemethode voor binaire ruimten van Seymour, en de op homotopie en homologie gebaseerde bewijzen van Lovász.

Stochastische aspecten komen aan de orde bij de formulering van probleemttypen, probleeminstanties, en algoritmen. Stochastische probleemttypen zijn gerelateerd aan modellen in de stochastische programmering en de wachtrijtheorie. Stochastische probleeminstanties vormen de basis voor de probabilistische analyse van algoritmen, die complementair is aan de traditionele 'worst-case' benadering. Stochastische of kansgestuurde algoritmen tenslotte zijn oplossingsmethoden die, ruw gezegd, nu en dan met een dobbelsteen gooien.

Voor allerlei herkenningsproblemen, zoals het testen van de primaliteit van een getal, bestaan kansgestuurde algoritmen die sneller werken dan deterministische methoden, maar met een bepaalde kans een foute oplossing of zelfs géén oplossing te leveren. Dit onderzoek heeft geleid tot een nieuwe en bloeiende tak van de complexiteitstheorie.

Voor optimaliseringsproblemen vindt het randomiseringsprincipe toepassing bij de constructie en iteratieve verbetering van heuristische oplossingen. Er zijn verscheidene vormen van kansgestuurde benaderingsalgoritmen, die bekend staan onder beeldende namen als 'extensie en rotatie', 'selectie en clustering' en 'statistische koeling'. Het onderzoek op dit gebied verkeert in een beginstadium.

Het werk aan de combinatorische optimalisering op het CWI betreft momenteel vooral *interactieve* en *parallele* methoden. Een heroriëntatie in de richting van *meetkundige* en *kansgestuurde* methoden wordt overwogen.

Getaltheorie met behulp van de computer

Doel van dit vrij kleine project is de bestudering van fundamentele, vaak zeer oude problemen uit de getaltheorie met behulp van moderne (numerieke) methoden en met gebruikmaking van snelle computers. Het project wordt uitgevoerd vanuit de bestaande algebraïsche expertise op het CWI.

Getaltheoretische problemen zijn vaak elegant en met weinig woorden te formuleren en hebben daarom niet alleen wetenschappelijke,

maar ook didactische betekenis. De uitstekende computerfaciliteiten van het CWI vormen een efficiënt hulpmiddel bij het (vaak saaie) onontbeerlijke verzamelen van empirische gegevens.

Met behulp van de computer wordt getracht de grenzen van de tot heden verworven kennis zo ver mogelijk te verleggen; hierbij worden regelmatig nieuwe 'verschijnselen' geobserveerd en soms ook wiskundig bewezen. In de loop der jaren is op het CWI ruime kennis en ervaring op dit gebied vergaard: Riemann-hypothese, vermoeden van Mertens, vermoeden van Goldbach, speciale getallen zoals 'bevriende' getalparen en 'hypervolmaakte' getallen, en het ontbinden in priemfactoren van zeer grote getallen.

Voor de komende tijd staan op het programma: onderzoek van factorisatiemethoden voor zeer grote getallen op vectorcomputers en parallelle computers (CYBER 205, ETA¹⁰, NEC SX/2, CRAY X/MP), en voortzetting van het onderzoek naar constructiemethoden voor getallen met een speciale structuur (vooral met betrekking tot bevriende getalparen speelt het CWI internationaal een centrale rol).

Concurrency

Gespreide gegevensverwerking, speciaal verwerking door meerdere processoren, is thans een centraal thema in de theoretische en toegepaste informatica. Ontwikkelingen in de architectuur van computersystemen vervullen hierbij een sleutelrol. Bij het concurrency-project op het CWI richt de probleemstelling

zich op parallellisme in programmeertalen, met uitlopers enerzijds naar de wiskundige grondslagen zoals domeintheorie, anderzijds naar computerarchitecturen geïnspireerd door parallelle berekeningsmodellen.

Van de vele studies over talen voor concurrency noemen we een tweetal met een baanbrekend karakter: Hoare's *Communicating Sequential Processes* en Milner's *Calculus for Communicating Systems*. Beide werken introduceren een aantal fundamentele begrippen op het terrein van concurrency en zijn de inspiratiebron geweest van een indrukwekkende hoeveelheid vervolgstudies. Wiskundige modelvorming voor concurrente programmeerconcepten is wezenlijk moeilijker dan voor sequentiële programma's. Bij de laatste kan men veelal volstaan met het onderzoek van het invoer-/uitvoergedrag in de vorm van een geassocieerde functie. Bij parallelle programma's is het echter doorgaans nodig om ook de geschiedenis der verwerking — in de vorm van een gestructureerde weergave van de acties en toestanden onderweg — in de beschouwing te betrekken. Bovendien stuit men bij het concurrency-onderzoek vaak op oneindig voortlopende berekeningen. Daarvoor zijn nieuwe technieken nodig, die bijvoorbeeld zijn ontleend aan de theorie van oneindige woorden. Ook ontmoet men nieuwe problemen, zoals betreffende 'fair scheduling'. In het algemeen vertoont de semantiek van concurrency raakvlakken met de theorie van de formele talen (bijvoorbeeld trace-talen) die niet optreden in het sequentiële geval. Metrische procestheorie wordt in het project gebruikt bij de fundering van diverse semantische modellen, waarbij de sporen (traces) van de

berekeningen terugkeren in de vorm van Plotkin's 'resumpties'. Een verdere doelstelling van het project is een bijdrage te leveren aan het semantisch onderzoek van concrete talen voor concurrency, alsmede aan het onderzoek naar de gezondheid en volledigheid van formele systemen om eigenschappen zoals correctheid, terminatie en deadlock freedom van concurrente programma's te beschrijven. De volgende deelonderwerpen zullen de komende jaren (meer) aandacht krijgen:

- Poging tot unificatie van de semantiek van de gemeenschappelijke kern van het verschijnsel concurrency zoals dat zich voordoet bij imperatieve, declaratieve en 'logische' talen;
- Grondige studie van semantiek en bewijstheorie van object-georiënteerde talen, in het bijzonder de taal POOL (Parallel Object Oriented Language);
- Semantiek van het dataflow berekeningsmodel.

Verder zal een keuze worden gemaakt uit onderwerpen zoals: concurrency-aspecten van database talen, massief parallellisme en lerende systemen, en concurrency in relatie tot epistemische logica.

Het CWI zal ernaar streven de in dit project thans vigerende samenwerkingsverbanden (Landelijk Project Concurrency LPC, ESPRIT) te continueren. Voor het LPC voorzien we voortzetting in het NFI-project REX (Research and Education in Concurrent Systems).

Formele specificatiemethoden

Naast programmeertalen zijn tegenwoordig ook specificatietalen van groot belang in de software engineering. Specificatietalen hebben tot doel de beoogde functionaliteit van een software- of hardwarestelsel wiskundig te beschrijven. Daartoe moeten deze talen worden voorzien van een formeel wiskundige semantiek. Dit verklaart de naam 'formele specificatietalen' waarmee zij tegenwoordig worden aangeduid.

In dit CWI-project worden fundamentele eigenschappen van deze specificatietalen onderzocht, in het bijzonder met betrekking tot concurrency, waarbij vooral procesalgebra wordt gebruikt, en voorts met betrekking tot de beschrijving van data waar met name gebruik wordt gemaakt van algebraïsche specificaties.

Rond formele specificaties bestaat een breed spectrum van probleemgebieden, met als kernthema's het *ontwerp*, de *verificatie* en de *validatie* (met behulp van automatisch gegenereerde prototypen) van specificaties. Deze thema's kunnen worden gezien als opvolgers van respectievelijk het gestructureerd programmeren uit de jaren zeventig, de programmaverificatie-thematiek van het eind der jaren zestig, en het automatisch programmeren dat nog uit de jaren vijftig stamt. Voor elk van deze thema's zijn inmiddels vele technieken en methoden bekend. Deze zullen in het onderhavige project worden bestudeerd en zo mogelijk verder ontwikkeld.

Hoewel de in dit project toegepaste tech-

nieken afkomstig zijn uit de software engineering, blijken deze soms ook bruikbaar te zijn voor de specificatie van hardwarecomponenten. Dat is bijvoorbeeld het geval bij het doorrekenen van geïntegreerde logische schakelingen door middel van procesalgebra. Onderzoek terzake toepassingen van formele methoden in hardwarespecificatie vormt een nevenactiviteit van het project. Op langere termijn zou binnen dit project expertise moeten ontstaan over een breed spectrum van formele specificatiemethoden, doch de nadruk zal blijven liggen op de ontwikkeling en fundamentele analyse van een klein aantal wiskundig toegankelijke methoden.

Uitbreidbare programmeeromgevingen

Dit project wordt geheel uitgevoerd in het kader van het tot eind 1989 lopende ESPRIT-project 348 GIPE (Generation of Interactive Programming Environments), samen met het Nederlandse softwarehuis BSO, het Franse onderzoekcentrum INRIA en het eveneens Franse softwarehuis SEMA. Doel is op basis van formele taaldefinities interactieve programmeeromgevingen te genereren, waarin voor programma's in die taal faciliteiten zijn voor syntax-gestuurd editen met gelijktijdige type-controle, incrementele evaluatie en symbolische debugging van programma's. Op langere termijn wordt gestreefd naar een interactieve omgeving voor het ontwikkelen van talen, die uitbreidbaar is in de zin dat bij een nieuw ontwikkelde taalspecificatie automatisch een nieuwe

(deel)omgeving wordt gegenereerd waarbinnen met die taal kan worden gewerkt.

Verwezenlijking van deze doelstelling vereist zowel op korte als langere termijn onderzoek op een aantal terreinen:

- *Theorie en praktijk van algebraïsche specificatie.* Dit project baseert zich, althans wat betreft de statische en dynamische semantiek van talen, op algebraïsche definities van semantiek.
- *(Incrementele) parsergeneratie voor algemene contextvrije grammatica's.* Bij het samenvoegen van taaldefinitie-modules, die elk hun eigen syntaxdefinitie bevatten, rijst het probleem hoe de bijbehorende parsers zo snel mogelijk samen te voegen tot een nieuwe parser voor de samengestelde grammatica. Bij interactief syntaxgestuurd editen van modules die hun eigen syntax definiëren komt dit probleem in verscherpte vorm naar voren.
- *Afleiden van incrementele algoritmen uit niet-incrementele specificaties.* Het is een voordeel als degene die een formele taaldefinitie maakt, geen rekening hoeft te houden met het vereiste incrementele gedrag van de te genereren type-checker en evaluator.
- *Het compileren van algebraïsche specificaties.* Algebraïsche specificaties zijn niet zo maar uitvoerbaar, maar vereisen een compilatieslag.
- *Het genereren van compilers uit algebraïsche taaldefinities.* Het GIPE-project beperkt zich tot interpretatieve evaluatie van programma's in de gegenereerde omgeving, maar uiteindelijk moet snellere evaluatie

mogelijk zijn door programma's eerst te compileren.

- *Partiële evaluatie.* Partiële evaluatie is een algemene methode om efficiënte gespecialiseerde programma's af te leiden uit algemene versies. Deze methode speelt op het ogenblik al een rol bij het afleiden van incrementele type-checkers, maar zal nog aan belang winnen in verband met het genereren van compilers.

Expertsystemen

Het onderzoek in dit project richt zich op de toepassing van methoden van kennis-representatie (logische formalismen, productieregels, frame-representaties), automatisch redeneren (resolutie, chaining-methoden, inheritance, agenda-mechanismen) en het omgaan met onvolledige en onzekere informatie in expertsystemen. Dit onderzoek is van belang omdat de huidige technieken onvoldoende geschikt zijn voor de ontwikkeling en het onderhoud van omvangrijke kennisbanken. Een heldere declaratieve semantiek van gehanteerde methoden van kennis-representatie wordt hierbij nagestreefd. Deze is in de huidige expertsysteemschillen nog niet gerealiseerd. Door zo'n semantiek kunnen uitspraken worden gedaan met betrekking tot inconsistentie. Onderzocht zal worden op welke wijze een scheiding kan worden aangebracht tussen de declaratieve en de operationele delen van een kennisbank. Frame-systemen kunnen bij dit onderzoek van belang zijn. Ook bieden frame-representaties mogelijk een uitgangspunt voor het

modulariseren van kennisbanken.

In het kader van het door Philips Research Laboratorium Eindhoven geleide SPIN-project PRISMA wordt onderzoek gedaan naar de toepassing van parallelisme in expertsystemen. Dit onderzoek zal resulteren in een expertsysteemschil, geïmplementeerd in de parallelle object-georiënteerde taal POOL-X.

Zowel voor het deel van het onderzoek dat plaats vindt in het kader van PRISMA als voor het resterende onderzoek van de project-groep wordt samengewerkt met diverse instellingen. Doel is inzicht te verwerven in de praktische bruikbaarheid van de ontwikkelde technieken. Hierbij wordt de realisatie van specifieke toepassingen met de ontwikkelde systemen nagestreefd, die mogelijk als inspiratiebron kunnen dienen voor verder onderzoek.

Logische aspecten van kunstmatige intelligentie

De recente toename van de toepassingen van kunstmatige intelligentie leidt tot een groeiende noodzaak om haar methoden en technieken te verduidelijken en te verifiëren. Het doel van dit project is het verrichten van fundamenteel onderzoek betreffende de logische grondslagen van enkele aspecten van kunstmatige intelligentie. Speciaal wordt hierbij gedacht aan expertsystemen. Bij dit onderzoek wordt een belangrijke rol gespeeld door logisch programmeren en deductieve gegevensbanken.

Logisch programmeren heeft zijn eigen

methoden en technieken ontworpen die direct van toepassing zijn bij de constructie van expertsysteemschillen. Specifieke vragen die hierbij aan de orde komen betreffen de rol van recursieve regels, modularisatie, selectieve besturingsmechanismen, parallelisme en metaredenering.

Deductieve gegevensbanken vormen een uitbreiding van de relationele gegevensbanken, waarin sommige relaties met behulp van regels zijn gedefinieerd. Dit kader is speciaal interessant wanneer men een specifieke vorm van redenering over een bestaande verzameling van gegevens wil maken. De uitbreidingen van deductieve gegevensbanken zijn bijzonder nuttig om verschijnselen als niet-monotone redenering, het genereren van verklaringen en het redeneren met onzekerheid formeel te definiëren en bestuderen.

Wanneer kennis in natuurlijke taal wordt beschreven, dient aandacht te worden gegeven aan de behandeling van het tijdsaspect. Deze problematiek behoort tot het domein van verwerking van natuurlijke talen. Een succesvolle benadering van dit probleem veronderstelt een goed begrip van het gebruik van tijden in natuurlijke talen en vereist een adequate representatie van tijd en constructie van een tijdslogica die met niet-monotone redenering kan worden gekoppeld.

Termherschrijfsystemen

Termherschrijfsystemen, ook wel termreductiesystemen of 'term rewriting systems' (TRS) genoemd, vormen een paradigma voor berekeningsprocedures. De lambda calculus, wel-

licht het bekendste TRS, speelde al in de jaren dertig een cruciale rol in de mathematische logica bij de formalisering van het berekenbaarheidsbegrip; veel later figureerde hetzelfde reductiesysteem in een doorbraak op het gebied van de denotationele semantiek van programmeertalen. Het verwante systeem van de Combinatorische Logica bleek meer recent een interessant medium voor de implementatie van functionele programmeertalen. Mogelijk nog geschikter voor deze taak is de op het ogenblik sterk in de belangstelling staande Categorische Combinatorische Logica, die een opmerkelijke verbinding legt tussen abstracte begrippen uit de categorietheorie en elementaire stappen in machinale berekeningen.

De aantrekkelijkheid van termherschrijfsystemen is gelegen in hun zeer eenvoudige syntax en semantiek, die een goede wiskundige analyse mogelijk maken. Daarnaast lenen ze zich, althans in principe, op natuurlijke wijze tot het implementeren van parallele berekeningen, waarmee het bestuderen van TRS-en van fundamenteel belang is voor projecten die de ontwikkeling van parallele reductiemachines beogen.

Een ander thema, waar TRS-theorie een fundamentele rol speelt, betreft de analyse en implementatie van algebraïsche datatype specificaties, en het 'equational programming'. Een nog andere richting van toepasbaarheid is het vermogen van TRS-en om een decisie-algoritme te geven voor het 'woordprobleem' in equationele theorieën en voor bekende algebraïsche structuren zoals groepen en ringen. Knuth-Bendix completeringsalgoritmen vormen hier een belangrijk hulpmiddel.

Een project Termherschrijfsystemen als

beoogd zal zich bezighouden met aspecten van grondslagen die een duidelijke relevantie hebben voor een of meer van de talrijke hier genoemde toepassingen. Te denken valt hierbij bijvoorbeeld aan studies van de volgende aspecten: reductiestrategieën, de inherent sequentiële versus parallele karakteristieken van TRS-en, het vermogen van TRS-en om elkaar te simuleren (existentie van 'universele TRS-en'), en hiërarchisch gestructureerde TRS-en. Een belangrijk thema is ook het inbrengen van een termherschrijvingscomponent in het logisch programmeren, met als doel een integratie van functioneel en logisch programmeren.

Van zelfstandig belang is het gebied van de type theorieën (Martin-Löf, de Bruijn met AUTOMATH, Huet en Coquand met de 'theory of constructions'). Er is een natuurlijke aansluiting bij dit project, namelijk via TRS-en als polymorfe lambda calculus.

Geïntegreerde gebruikersomgevingen

Door nieuwe technische ontwikkelingen (snellere processoren, grotere geheugens, raster-schermen) is het mogelijk geworden de snel in aantal groeiende groep van eindgebruikers van gebruiksvriendelijker omgevingen te voorzien dan de inmiddels traditionele op besturingstalen gebaseerde omgevingen. Desondanks zijn ook de modernere omgevingen, zodra de vriendelijker buitenste schil gepasseerd is, niet geïntegreerd: ze bestaan in principe uit los van elkaar opererende toepassingen die alleen ten koste

van veel gebruikersinspanning ertoe gebracht kunnen worden in enigerlei vorm samen te werken. Voor de meeste gebruikers, die niet zelf programmeren, is dit alleen mogelijk door voortdurende manuele interventie. Zolang het gaat om routinewerkzaamheden met op maat gemaakte toepassingen is dit een nauwelijks optredend probleem, maar de realiteit is dat de nieuwe gebruikers voor het merendeel computers gebruiken voor telkens wisselende, niet tevoren vastgelegde taken. Enkele commercieel (niet toevallig) zeer succesvolle programmatuurprodukten bestaan uit een aantal samenwerkende toepassingen, maar de integratie is daar op ad-hoc basis en het produkt als geheel heeft een gesloten karakter.

In dit project worden mogelijkheden onderzocht en ontwikkeld voor omgevingen waarin de gewenste integratie gerealiseerd kan worden. Toepassingen zijn hierbij geen op zich staande eenheden die worden "aangeropen", maar komen tot werking doordat de eindgebruiker objecten (zoals documenten) binnen een bepaalde context creëert of wijzigt. De doelstelling van het project is tot een demonstratieversie te komen van een prototype van een dergelijke omgeving. Hierbij wordt gestreefd naar samenwerking met andere partners, zoals op het gebied van de kantoorautomatisering. Een belangrijk onderdeel van het onderzoek is theorievorming en de ontwikkeling van een methodologie voor ontwikkelaars van toepassingen. Om het te maken demonstratiemodel te beproeven is het ook nodig een aantal basistoepassingen en andere toepassingen te ontwikkelen.

Een wenselijke uitbreiding van dit onderzoek zou het gebied van End-User Programming en Visual Programming bestrijken. Het gaat

hierbij erom het scheppen van nieuwe (betrekkelijk eenvoudige) toepassingen binnen het bereik te brengen van meer eindgebruikers dan met conventionele programmeermethoden mogelijk is.

Constructieve algoritmiek

De afgelopen jaren zijn belangrijke vorderingen, ook internationaal, geboekt met betrekking tot notatiesystemen, calculi en theorieën voor het systematisch ontwikkelen van algoritmen uit specificaties. Het onderzoek aan het CWI heeft hierbij een duidelijke rol gespeeld, en dit nieuwe gebied trekt zowel internationaal als in Nederland een groeiende aandacht. Het gaat hier om een methode van programmatuurontwikkeling waarbij programma's door het toepassen van algoritmische wetten en stellingen op een systematische manier stapsgewijs worden afgeleid van een specificatie op hoog niveau, analoog aan de wijze waarop bijvoorbeeld in de integraalrekening resultaten worden afgeleid. Behoudens zaken als schrijffouten en dergelijke, die grotendeels mechanisch gecontroleerd kunnen worden, is de correctheid van het resulterend programma gegarandeerd. Belangrijke onderzoeksonderwerpen voor de komende tijd zijn transformatie van deductieve systemen (logic programs) en transformatie tussen de deductieve en andere (imperatieve en applicatieve) stijlen, uitbreiding van het begrip "executeerbare specificatie", en de uitwerking van theorieën voor meer systemen dan tot nu behandeld.

Naast het fundamentele onderzoek gaat een NFI-project van start, gericht op de constructie van een transformatiesysteem, in samenwerking met de Universiteiten van Nijmegen en Utrecht.

Complexiteit en algoritmen

In dit project, dat reeds enkele jaren met succes loopt, gaat het om het ontwerpen van efficiënte algoritmen, vooral voor gedistribueerde berekeningen, en fundamenteel onderzoek naar de concrete complexiteit van algoritmen. Door de steeds grotere problemen die met de computer kunnen worden aangepakt is de behoefte aan efficiëntere algoritmen sterk toegenomen. Allerlei technologische ontwikkelingen, zoals het vergroten van het gebruiksgemak in programmeeromgevingen, brengen nieuwe en moeilijke algoritmische problemen met zich mee. Het CWI-onderzoek aan niet-conventionele architecturen zoals computernetwerken en aan gespreide informatiesystemen heeft dan ook een grote algoritmische component. De vraagstukken betreffen het ontwerp, de constructie en het gebruik van apparatuur, en de toepassingen. Op het CWI zoekt men oplossingen voor deze algoritmische problemen vanuit de praktijk van netwerken, parallelle architecturen en bijvoorbeeld ook heuristische algoritmen.

Ook de komende jaren zal het onderzoek gericht blijven op de ontwikkeling van theorie voor geavanceerde gespreide systemen zoals computernetwerken, multiprocessorsystemen en geïntegreerde schakelingen. In het bijzon-

der zijn aan de orde: architectuur (communicatiegraaf), communicatieprotocollen, en de wisselwerking daartussen. Belangrijke vraagstellingen daarbij zijn onder meer (i) de ontwikkeling van een formeel berekeningsmodel voor multicomputers waarbij de communicatiekosten op een realistische manier in rekening worden gebracht, en (ii) het ontwikkelen van theorie over asynchrone communicatie-interfaces.

Nieuw onderzoek betreft de implementatie van atomaire gedeelde registertoegang door asynchrone hardware in verband met het probleem van concurrent lezen en schrijven, en het verschijnsel dat theoretische algoritmen en in de praktijk van computernetwerken gebruikte algoritmen radicaal verschillende aandaken over 'tijd' maken.

Het onderzoek naar gespreide algoritmen, protocollen en architecturen, en naar de tijdsafhankelijkheid van algoritmen vindt plaats in samenwerking met het Massachusetts Institute of Technology MIT.

Processor-architecturen

In Nederland is sinds het eind van de jaren vijftig onderzoek op het gebied van processor-architecturen vooral gericht geweest op de problematiek van de realisatie van processoren met behulp van de dan bestaande technologie, en minder op fundamentele vragen met betrekking tot het ontwerp van een architectuur. De wel te beluisteren gedachte dat onderzoek naar processor-architecturen alleen zinvol is als dit in een grootschalig project (twintig tot honderd personen) gebeurt,

waarvoor dan in Nederland geen plaats zou zijn, is niet in overeenstemming met het ervaringsgegeven dat veel vernieuwend fundamenteel onderzoek op dit gebied door kleine groepen is gedaan.

In het verleden waren de ontwerpers van een processor-architectuur vanuit economische overwegingen gedwongen zich te beperken tot een gering aantal functies om daarmee tot een logische, orthogonale opzet te komen. Door de mogelijkheid een groot aantal functies op één chip bijeen te brengen, waardoor bij wijze van spreken alles realiseerbaar is wat bedacht kan worden, is de vraag naar een fundamentele benadering van het functioneel architectuurontwerp weer actueel geworden. Inmiddels is genoegzaam duidelijk dat van de mogelijkheden van barokke architecturen in de praktijk slechts een betrekkelijk klein deel toepassing vindt, terwijl meestal sommige belangrijke functies met zulke restricties zijn omgeven dat de kwaliteit van de programmatuur eronder lijdt. De doelstelling van dit project is een bijdrage te leveren aan de theorievorming op dit gebied, rekening houdend met het veranderende computergebruik (zoals grotere code- en gegevenssegmenten, veel context-switches en object-georiënteerdheid). De verwachting is dat er in het komende decennium een groei van (kleinschalige) Europese computerbedrijven zal optreden wanneer de techniek van de 'silicon-compilatie' zal kunnen worden gebruikt. In dat geval zal dit onderzoek van groot belang kunnen zijn.

Methodologie van open architecturen

In toenemende mate spelen 'open architecturen' een rol bij de ontwikkelingen van standaards. In wezen is een open architectuur niets anders dan een verzameling module-interfaces. De bestaande standaards die op basis van een open-architectuurformule ontwikkeld zijn, alsmede de gang van zaken bij de totstandkoming van zulke standaards, laten zien dat er dringend behoefte is aan een systematische methodiek voor de ontwikkeling van zo'n open architectuur. De hiervoor noodzakelijke inzichten bestaan in hoofdzaak al en zijn in de literatuur te vinden, maar zijn in hun huidige vorm niet direct, zonder verdere ontwikkeling, op open systeemarchitecturen toe te passen.

Ook zonder het oogmerk van standaardisering zijn open architecturen van groot belang. Als voorbeeld noemen we het Euromath-project, dat beoogt een geïntegreerde werkomgeving voor wiskundigen tot stand te brengen, waarvan telecommunicatie voor het uitwisselen van gegevens tussen wiskundigen en voor het raadplegen van gegevensbestanden deel uitmaakt, maar ook de verwerking van wiskundige teksten en het gebruik van programmatuur voor formulemanipulatie en dergelijke. Deze omgeving moet gerealiseerd worden op een heterogeen geheel aan apparatuur en binnen een zekere verscheidenheid aan besturingssystemen, en zal in gedeelten beschikbaar komen. Iets dergelijks is alleen mogelijk als het systeem gestoeld is op de conceptie van een open architectuur.

Gespreide besturingssystemen

Het onderzoek in dit lopende project is gecentreerd rond het ontwerp en de implementatie van het gespreide besturingssysteem Amoeba. Dit systeem is opgebouwd uit werkstations, een processor pool, file servers en andere gespecialiseerde server-machines. Het geheel is verbonden door middel van een snel lokaal netwerk. De gebruikers hebben de beschikking over de reken capaciteit van hun werkstations, die zo nodig kan worden aangevuld door die van processors uit de processor pool. Verder is er een aantal meer of minder gespecialiseerde file-systemen waar gebruikers informatie kunnen opslaan en uitwisselen.

Amoeba is operationeel en is qua documentatie en ondersteuning thans bijna gereed voor algemeen gebruik bij dagelijkse werkzaamheden. Het onderzoek richt zich nu op een tweetal nog bestaande belangrijke fundamentele problemen: uitbreidbaarheid en fout-ongevoeligheid. Een gespreid systeem zou idealiter onbeperkt uitbreidbaar moeten zijn (men spreekt van *scalability*), in de zin dat bij verdubbeling van het aantal hardware-componenten de voor de gebruikers toegankelijke capaciteit ook verdubbelt, terwijl de responstijden gelijk blijven (bij gelijk gebruik). Verder worden gebruikers steeds afhankelijker van de ononderbroken beschikbaarheid van computersystemen. Daarom dient een gespreid systeem een hoge graad van betrouwbaarheid en fouttolerantie te hebben. Bijgevolg is het van belang deelsystemen te ontwerpen die ongevoelig zijn voor

bepaalde klassen van veel voorkomende storingen.

Op het ogenblik hebben sommige onderdelen van Amoeba nog niet de gewenste graad van uitbreidbaarheid en foutongevoeligheid. Amoeba is echter een uitstekende testomgeving, doordat elke functie wordt gerealiseerd in vrijwel onafhankelijke *services*. Het onderzoek richt zich thans op:

- *locating migratable objects* in zeer grote netwerken;
- koppeling van lokale, autonome Amoeba's via wide-area networks en gateways;
- ontwerp van een zeer snelle, doch fout-tolerante gespreide file-server;
- debugging van grof-parallele programma's.

Voorts wordt onderzoek gestart naar:

- *command interpreters* voor besturing van gespreide (en parallelle) toepassingen;
- ontwerp van een Amoeba kernel voor multiprocessoren en load-balancing in de processor pool.

Het Amoeba project wordt uitgevoerd in nauwe samenwerking met de Vakgroep Informatica van de Vrije Universiteit te Amsterdam. Er zijn vrij intensieve contacten met het Computer Laboratory van Cambridge University (waar men nu ook Amoeba gaat gebruiken) en met het DEC System Research Center in Californië. In het kader van COST-11 wordt gezamenlijk onderzoek uitgevoerd met 15 instituten in 8 Europese landen naar de aspecten van gespreide systemen die specifiek met wide-area networks te maken hebben.

Gespreide adaptieve informatiesystemen

Doelstelling van dit reeds enkele jaren lopende DAISY-project (Distributed Adaptive Information Systems) is modellen te ontwerpen en softwaretechnieken te ontwikkelen teneinde een adaptief en efficiënt informatiesysteem te realiseren. Het is bijvoorbeeld thans onmogelijk om relatief ongestructureerde en ongelijksoortige gegevens zoals documenten, beeld en geluid, op eenzelfde voet te behandelen als uniforme gestructureerde informatie. Ook ontbreekt het begrip 'tijd': traditionele informatiesystemen geven slechts een momentopname van de gemodelleerde, zich dynamisch wijzigende informatie. Anderzijds moet een toekomstig informatiesysteem zonder 'down' te gaan kunnen worden aangepast aan wijzigingen in architectuur of (hulp)programmatuur en het moet het evolutieproces dat ieder informatiesysteem als onderdeel van een organisatie doorloopt, ondersteunen.

De in dit project beoogde architectuur van informatiesystemen bestrijkt globaal de volgende vier niveaus: toepassingen, mens-machine interface, bewerkingen en opslag van objecten. Het onderzoek spitst zich de komende jaren toe op de onderste twee lagen en op de formalisering van database-modellen. Er is een drietal deelprojecten:

- *PRISMA* (Parallel Inference Storage Machine). Dit onderzoek beoogt kennis te verwerven van en ervaring op te doen met database machines die gebaseerd zijn op

een zeer grote hoeveelheid direct toegankelijk geheugen en vele processoren. Het wordt mede uitgevoerd in het kader van het gelijknamige Philips SPIN-project, waarin wordt samengewerkt met de Universiteit Twente, Philips Natuurkundig Laboratorium, en de Universiteiten van Amsterdam en Utrecht. Binnen het DAISY-project zal de komende jaren de meeste aandacht uitgaan naar dit deelproject en de te verwachten follow-up.

- *GODAL* (General Object-centered Database Language). In het bijzonder wordt onderzocht of het *guardian* concept, waarbij een proces algoritmisch reageert op het herkennen van een declaratief beschreven toestand van de database, in een object-centreerde database-benadering effectief is.
- *Database modelling*. Meestal zijn de voorwaarden waaronder informatie uit een database kan worden geëxtraheerd, onvoldoende beschreven. Dit kan leiden tot problemen bij bepaalde vormen van wijzigingen in de database (view updates). Doel van dit deelproject is een model te ontwerpen, gebaseerd op topologie en categorietheorie, waarmee deze problemen formeel kunnen worden beschreven en geanalyseerd.

Ergonomie en programmaconstructie

Er is een aantal talen waarin programmatuurontwikkeling een orde van grootte minder tijd kost dan in bijvoorbeeld Pascal of Ada:

Smalltalk, Prolog, SETL (en ABC), en vierde-generatietalen. Het interessante is dat de winst in produktiviteit in deze talen met geheel verschillende middelen wordt bereikt. Deze middelen zijn relatief onafhankelijk en in principe combineerbaar. Een goed ontworpen taal waarin de essentialia op een geïntegreerde manier beschikbaar zijn hoeft zeker geen mammoettaal te zijn (vergelijk de grote eenvoud van ABC tegenover haar grote uitdrukingsmacht). Ieder van de genoemde talen heeft bepaalde nadelen (Smalltalk: geen typering; Prolog: nauwelijks datastructuren; etc.) die ze voor omvangrijke toepassingen of bepaalde belangrijke toepassingsgebieden minder geschikt doet zijn. Ook dat is te ondervangen. Een verdere verhoging van de bruikbaarheid kan worden bereikt door toepassing van de in het project Constructieve Algoritmiek verworven inzichten.

Vooralsnog is de doelstelling van dit project niet een complete nieuwe taal te ontwikkelen, maar te onderzoeken welke mogelijkheden er zijn om diverse nieuwe programmeerparadigma's te combineren, wat daarbij fundamentele of praktische begrenzingen zijn, in hoeverre het mogelijk is door nieuwe combinaties vereenvoudigend te werken en wat een en ander in termen van programmeerproduktiviteit betekent. Hierbij wordt uitdrukkelijk niet gedacht aan beginners, maar juist aan professionele programmatuurontwikkelaars en aansluiting bij moderne inzichten met betrekking tot de methodologie van programmatuurontwikkeling. De op het CWI aanwezige expertise op het gebied van programmeertaalontwerp in combinatie met nieuwe inzichten en ontwikkelingen op het gebied van programmeertalen bieden een

goede gelegenheid de problematiek in kwestie op meer fundamentele wijze te benaderen.

Computergrafiek

Dit vakgebied omvat twee hoofdthema's: het *beschrijven* en het *manipuleren* van informatie door middel van beelden. De grote uitdrukingskracht van beelden bewerkstelligt een zeer efficiënte informatie-overdracht. De semantische en syntactische rijkdom van beelden houdt echter in dat hun gebruik voor dit doel een ingewikkelde en zeer rekenintensieve aangelegenheid is. De huidige onderzoeksprojecten richten zich op een computercapaciteit van miljarden instructies per seconde. Maar deze rekenkracht zinkt nog altijd in het niet bij het menselijk vermogen om beelden te verwerken. Teneinde bij het behandelen van informatie via de computer door middel van beelden toch te komen tot gebruikersvriendelijke systemen is het zaak die relatief beperkte computercapaciteit zo goed mogelijk te benutten.

Hoofdthema in de komende vijf jaren is de mens-machine interactie door middel van beelden van drie-dimensionale objecten, de *interactieve 3D-computergrafiek*. Interactie kenmerkt zich door incrementele beeldwijzigingen. Om snel het zich wijzigende object of beeldaspect te kunnen identificeren moet de beeldbeschrijving doeltreffend zijn gestructureerd. Vanuit deze beschrijving moet de nieuwe beeldgeneratie plaatsvinden. Voor hoogwaardige interactie is verdere ontwikkeling van zowel de structurering der beeldinformatie als van snelle beeldgeneratie nood-

zakelijk.

Het ontwerpen van incrementele algoritmen voor beide doeleinden, alsmede het onderzoek naar hun parallelisering, vormt een nog te ontsluiten gebied. Deze algoritmen kunnen dan eventueel in VLSI worden gerealiseerd.

Voortbouwend op de ervaring opgedaan met GKS-3D (drie-dimensionaal Graphical Kernel System) en PHIGS (hiërarchieke datastructuren voor interactieve grafiek) zal een geavanceerde beeldbeschrijvingstaal worden ontwikkeld met een compleet kleurenmodel en de bovengenoemde structureringsfaciliteiten. In het kader van een STW-project zullen nieuwe algoritmen voor incrementele 3D-grafiek worden onderzocht. Deze zullen gedeeltelijk als VLSI-modulen deel gaan uitmaken van een geheel nieuwe grafische werkstation-architectuur.

In het verlengde van het fundamentele onderzoek wordt in het kader van externe financiering (STW, contractresearch) onderzoek verricht naar ontwerpmethoden voor grote grafische gegevensbanken met de bijbehorende gebruikersinterfaces.

De betrokken projectgroep neemt deel in tal van ontwikkelingen op het gebied van computergrafiek, zowel nationaal als internationaal: standaardisatie in ISO-verband, samenwerking in het kader van de Europese Associatie voor Computergrafiek, en ondersteuning van de software-industrie. Er wordt naar gestreefd deze vooraanstaande positie te handhaven.

Gebruikersinterfaces

Een gebruikersinterface is de verzameling hulpmiddelen waarmee een gebruiker toegang krijgt tot een informatiesysteem. Het kan vele vormen aannemen: een bedieningspaneel, een commandotaal, een tekensysteem, etc. Een gebruikersinterface bevat alle benodigde functies om van de abstracte informatie in het systeem een concrete representatie te maken voor de gebruiker in de vorm van woord, beeld en geluid.

Door de toenemende omvang en complexiteit van informatiesystemen enerzijds en de wens om deze toegankelijk te maken voor gebruikers met een minimum aan training anderzijds worden steeds hogere eisen gesteld aan de afbeeldingsfuncties in het werkstation. Een voor de hand liggende verbetering is werkstations uit te rusten met het vermogen om spraak te genereren of te herkennen, natuurlijke taal te begrijpen en beelden te kunnen interpreteren. In dit project gaat de aandacht vooral uit naar beeldinterpretatie. Dit is een nog vrijwel onbetreden terrein. Het grote verschil met 'computer vision' (beeldherkenning van een door een camera geregistreerd beeld) is dat het werkstation zelf het beeld opbouwt, en dat de nadruk dus niet ligt op de beeldherkenning, maar op de correlatie met andere informatie. Voor dit onderzoek gebruiken wij een beeldtaalmodel, aan de hand waarvan de syntax en de semantiek van de formele beeldtaal worden onderzocht.

De beschikbare interactieve functies dienen

ter realisering van een beeldtaalsyntax, waarmee een beeldbeschrijving componentsgewijs en hiërarchiek kan worden opgebouwd. Zowel de componenten als de structurering zijn van belang voor de betekenis van het beeld (de correlatie met andere informatie). Op het werkstation moeten technieken worden gerealiseerd om tegelijk met het beeld ook de interpretatie ervan te kunnen aan-geven.

Deze thematiek zal worden aangepakt op drie manieren:

- *Picture editing*, de syntactische behandeling van het beeld. Hierbij doen zich tal van nieuwe problemen voor, zoals het feit dat een beeld geen sequentiële structuur heeft en een gebruiker dus de beeldstructuur (=syntax) niet gemakkelijk kan raden. Daarnaast moet het systeem zeer tolerant zijn voor inherent onnauwkeurige specificaties.
- *Constructive input*, het ondersteunen van gebruikersinvoer op basis van semantische informatie. Het systeem probeert zo snel mogelijk de betekenis van invoer te ontdekken en maakt dit bekend door het constructieproces te beïnvloeden (bijvoorbeeld stylen en anticiperen). Het uiteindelijke doel is een gebruiker een "schetsomgeving" te verschaffen.
- *Workstation management*, het oproepen van de juiste context voor een gegeven taak. Dit omvat aansluiting op het werkstation resource management (bijvoorbeeld window manager), en het dynamisch installeren van de juiste beeldsyntax-parser en semantische interpretator.

Bij de implementatie zal onder meer gebruik worden gemaakt van logische en object-georiënteerde programmeertalen.

Dialogoprogrammering

Bij dialogoprogrammering is het doel een specificatiemethode te ontwerpen waarmee het gedrag van een systeem tijdens interactie nauwkeurig kan worden vastgelegd. De specificatiemethode moet het mogelijk maken het gedrag van het systeem te bepalen aan de hand van de ontwerpeisen. Interactie kan zich afspelen tussen een gebruiker en een computer, maar ook tussen een extern proces en een computer.

Dialogoprogrammering kent de volgende probleemstellingen:

- Modelleren van het externe gedrag (bijvoorbeeld gebruikersacties). Dit is de basis van het herkennen van invoer.
- Formele specificatie van het interne gedrag, speciaal de controlestructuur. Hierbij wordt vastgelegd op welke herkende patronen wordt gereageerd. Het is een misverstand te denken dat op elk herkend patroon ook wordt gereageerd.
- Het genereren van interne representaties van geaccepteerde invoerconfiguraties voor verdere verwerking. Hieronder valt ook de behandeling van geweigerde invoer.
- Het visualiseren van bovengenoemde drie processen.

Op het CWI is een specificatietaal 'Dia-

loogcellen' (DICE) ontwikkeld, alsmede een experimentele implementatie. De ervaringen hiermee zijn zeer positief. De taal leent zich voor het doeltreffend specificeren van complexe grafische gebruikersinterfaces.

In de komende jaren zal het systeem verder worden ontwikkeld door toevoeging van geavanceerde faciliteiten zoals automatische foutherstelling, dynamische scheduling als basis voor het verleggen van de aandacht (focus), adaptive control, parametriseerbare dialogen en een historie-mechanisme.

Er wordt een tweede implementatie voorzien op een vijfde-generatie computer zodat het inferentiemechanisme beter kan worden ondersteund. Daarnaast zijn uitbreidingen voorzien naar ingewikkelder besturingsproblemen zoals robotics en meer in het algemeen machine-machine communicatie.

Methodenbanken

Methodenbanken zijn informatiesystemen waarin gegevensbanken en programmatheken met elkaar zijn geïntegreerd. Dit type systemen is nodig om de vele autonome componenten van een complex computersysteem (bijvoorbeeld een compleet ontwerp- en fabricagesysteem) met elkaar te laten samenwerken. Men hoopt langs die weg onder meer het CIM-ideaal (computer integrated manufacturing) dichterbij te brengen.

Methodenbanken belichamen de informatietechnologie nodig voor het ontwerpen, gebruiken en onderhouden van dergelijke complexe systemen. Volgens het concept van

methodenbanken worden standaard ontworpen voor de uitwisseling van gegevens en voor externe besturing. Deze standaards zijn een combinatie van functieschema's en gegevensformaten.

Voorbeelden van toepassingen van methodenbanken zijn: een gegevens-schema voor ontwerp-informatie tezamen met een stelsel pre- en post-processoren, de beschrijving van een te fabriceren object, de collectie beweringsprocedures voor fabricage tezamen met een procedure om een concrete bewerking te bepalen. In elk van deze voorbeelden is er sprake van integratie.

Een belangrijk aspect van dergelijke grote systemen is de distributie en het gelijktijdige gebruik door vele gebruikers. Al naar gelang de aard van het gebruik is een ander zicht op het systeem nodig. Met name interactief gebruik eist flexibiliteit om beslissingen en bewerkingen telkens anders tussen gebruiker en systeem te verdelen.

In de komende jaren zal vooral aan interactieve methodenbanken worden gewerkt. Dat wil zeggen dat zowel de gegevens als de daarmee samenhangende bewerkingen interactief beheerd c.q. bestuurd kunnen worden. Een van de doelstellingen zal zijn een grote mate van consistentie en uniformiteit te realiseren tussen verschillende gebruikersinterfaces die bij zo'n complex systeem horen.

Het werk aan methodenbanken wordt gedeeltelijk uitgevoerd in het kader van samenwerkingsprojecten:

- Een werkvoorbereidingssysteem, als SPIN/FLAIR-project samen met de Universiteit Twente;

- ISNAS, een geïntegreerd systeem voor het oplossen van stromingsproblemen op basis van Navier-Stokes vergelijkingen samen met NLR, Rijkswaterstaat en MARIN.

Voorbereidingen voor verdere projecten in het kader van het Nationale Technologieprogramma en ESPRIT zijn gaande.

Intelligente CAD-systemen

CAD-systemen (CAD = Computer-Aided Design) worden op het ogenblik nog niet gebruikt om het eigenlijke ontwerpwerk te ondersteunen. Het zijn veeleer hulpmiddelen om ontwerpbeslissingen te specificeren en gedeeltelijk te analyseren. Voor het eigenlijke ontwerpen moet men redeneren in plaats van registreren. Het ligt derhalve voor de hand om een op redenering gebaseerd CAD-systeem te realiseren door gebruik te maken van kunstmatige intelligentie.

In het IIICAD-project (III = Intelligent, Integrated, Interactive) zoekt men een gezonde theoretische basis voor het toepassen van kunstmatige intelligentie in CAD. Hieruit kunnen fundamentele problemen worden afgeleid die met behulp van kunstmatige intelligentie kunnen worden opgelost (multi-world mechanisms, naive physics, non-monotonic logic, etc.). De oplossingen worden vervolgens geïntegreerd in een programmeertaal voor IIICAD (ontwerpscenario's). Op basis van een implementatie van deze taal (IDDL = Integrated Data Description Language) wordt een prototype van zo'n IIICAD-systeem ontworpen en gebouwd.

De theoretische basis omvat een ontwerptheorie, die het ontwerpproces beschrijft waarvan CAD een onderdeel vormt. Deze theorie verschaft ook inzicht in de rol van ontwerp-informatie in het ontwerpproces, waaruit kan worden afgeleid hoe ontwerp-informatie in een CAD-systeem moet zijn ondergebracht. Tevens omvat het de theorie van te ontwerpen objecten. Deze theorieën zijn applicatie-gebonden. Derhalve wordt een beperkt aantal van deze (bestaande) theorieën ingebracht, onder andere met behulp van 'naive physics'-methoden.

De derde en laatste theorie is weer van algemene aard en behandelt het probleem van

kennisrepresentatie. Bij de realisatie van het experimentele IIICAD-systeem wordt een analyse gemaakt van het ontwerpproces om te komen tot een taakverdeling en samenwerkingsvorm tussen gebruikersinterface, scenario's en kennismodulen. De laatste twee kunnen zijn gespecificeerd met behulp van IDDL, de eerste met behulp van DICE (cf. het project *Dialogprogramming*). De IDDL-implementatie vindt in eerste instantie plaats op basis van bestaande Smalltalk-80 en Prolog-systemen, zodat in korte tijd een prototype beschikbaar is.

Naast het IIICAD-project wordt gewerkt aan

kennisrepresentatie voor ontwerpen. De vele beslissingssituaties die zich tijdens het ontwerpen voordoen maken dit een bij uitstek geschikt onderzoeksveld voor kennisrepresentatie. Belangrijke vragen zijn:

- In hoeverre kent/ontdekt het systeem de bedoeling van de ontwerper?
- Kan kennisrepresentatie een creatief proces ondersteunen?
- Welke redeneertechnieken zijn typerend voor het ontwerpen?

Het werk aan kennisrepresentatie zal voortbouwen op de theorie van het IIICAD-project.