

De ruimte

*onder redactie van
Suzette Haakma en Etienne Lemmens*

,

**Bureau Studium Generale UU
Heidelberglaan 8
3584 CS Utrecht**

De ruimte verscheen naar aanleiding van het gelijknamige
Studium Generale symposium, voorjaar 2000.

Uitgave: najaar 2002

Overname van één of meer artikel(en) of gedeelte(n) daaruit is
slechts toegestaan na verkregen toestemming van Bureau
Studium Generale UU en betreffende auteur(s).

Redactie: Suzette Haakma en Etienne Lemmens

Illustratie omslag: Het universum naar Senga (1750-1837).

Ontwerp omslag: Frans H. Janssen

Druk: IDC - Repro Faculteit Sociale Wetenschappen

ISBN: 90-393-2978-8

Inhoudsopgave

<i>Inleiding</i> Suzette Haakma/Etienne Lemmens	5
<i>De subatomaire ruimte</i> Ger van Middelkoop	9
<i>Het 'waar' van het menselijke brein. De cognitieve neuro- wetenschap van de ruimte</i> Albert Postma	23
<i>Ruimte in de architectuur: de grot, de hut, de tent en de leegte</i> Rob Dettingmeijer	41
<i>De virtuele ruimte. Computergames: interface van de eenen- twintigste eeuw</i> Joost Raessens	61
<i>De muzikale ruimte</i> Rudolf Rasch	79
<i>De kromming van tijd en ruimte</i> Vincent Icke	99
<i>Personalia</i>	121

Inleiding

Suzette Haakma en Etienne Lemmens

Wat is ruimte? Het antwoord op deze vraag levert niet veel meer op dan 'de afwezigheid van iets' of 'de leegte, gedefinieerd door zijn begrenzingsen'.

In de astronomie is de ruimte 'de wereld, waarin het heelal geordend wordt'. In de fysica onderzoekt men de structuur van de ruimte, waarin de zintuiglijk waarneembare verschijnselen plaatsvinden en in de psychologie houdt men zich bezig met de voorstellingen van de ruimte. Kortom, allemaal verschillende definiëringen van hetzelfde verschijnsel, in respectievelijk verschillende orden van grootte.

Evenals in de voorgaande bundels over *Chaos* (1999) en *De Tijd* (1999), zal in deze bundel over *De Ruimte* bekeken worden in hoeverre een vergelijk tussen de opvattingen uit verschillende wetenschapsgebieden over hetzelfde thema leidt tot een betere begripsvorming van het verschijnsel.

Vanuit zes disciplines wordt het begrip ruimte omschreven en gedefinieerd. Van de grootste ruimte, het heelal met het zonnestelsel en de planeten in de astrofysica, naar de kleinste ruimte op subatomair niveau in de natuurkunde. Daartussenin ontmoeten we de psychologische ruimte in het waarnemingsonderzoek; de virtuele ruimte in de digitale wereld; het gebruik van de ruimte in de architectuur en de 'muzikale' ruimte in de muziekwetenschap.

Inleiding

De natuurkundige Van Middelkoop opent met een bijdrage over *de subatomaire ruimte*.

Ruimte in de subatomaire fysica heeft de karakteristieke afmeting van een femtometer (10 tot de macht -15 m, oftewel een miljardste van een miljoenste meter). Deze afmeting komt overeen met de straal van een proton (waterstofkern). Hoewel een proton — naar alle waarschijnlijkheid — uit een paar puntdeeltjes bestaat, is het geenszins een lege ruimte.

De psycholoog Postma onderzoekt hoe mensen de ruimte waarnemen en herinneren en welke fouten ze daarbij maken.

Ruimtelijke waarneming bestaat uit een mentale representatie van de ruimte. Deze representatie is enerzijds picturaal van aard (zoals: in de ruimte staat een computer en een lamp) en anderzijds relationeel gericht (zoals: de lamp staat schuin achter de computer). De waarneming van het wat en het waar wordt gecombineerd tot een mentaal beeld van de ruimte. De zogenoemde metrische functie van de ruimtelijke cognitie bevindt zich in de rechterhersenhelft. De linkerhelft daarentegen, zo wijzen interessante experimenten uit, is evenzeer belangrijk voor het ruimtelijk waarnemingsvermogen van de mens.

Onder de titel 'De grot, de hut, de tent en de leegte' beschrijft de kunsthistoricus Dettingmeijer *de ruimte in de architectuur*. Had vóór het einde van de negentiende eeuw vrijwel niemand begrepen wat architectuur en ruimte als begrippen met elkaar te maken konden hebben, in het midden van de twintigste eeuw beschouwen de meeste architecten, critici en zelfs historici de ruimte als het meest wezenlijke begrip bij het spreken over architectuur. Wat men eronder moet verstaan blijft uiterst vaag. Er ontstaan veel misverstanden door een willekeurig gebruik van begrippen uit de bètawetenschappen, zoals 'de vierde dimensie', 'de gekromde ruimte' en 'quantumleaps'.

Relatief nieuw is *de virtuele ruimte* zoals die kan worden vormgegeven in de digitale wereld. In deze virtuele ruimte gelden

geen grenzen meer, behalve wellicht de grenzen van de rekenkracht van de computer. Raessens gaat in zijn bijdrage in op de realiteitsimpresies van de vormgegeven ruimte. De vormgegeven ruimte heeft een voorlopig hoogtepunt gevonden in de virtuele werkelijkheid.

In de ééentwintigste eeuw zullen we wat betreft onze behoefte aan informatie, communicatie en amusement in toenemende mate afhankelijk worden van computergenererde werelden. Naarmate de digitale wereld verder in het dagelijkse leven wordt geïntegreerd, zal de scheidslijn tussen de virtuele en de echte ruimte verdwijnen.

De musicoloog Rasch gaat in op de relatie tussen *muziek en de ruimte*. Muziek is sterk afhankelijk van ruimtelijke factoren. De ruimte moet de muziek doorgeven zonder de structuur van de muziek te veranderen.

In het vrije veld is er geen belemmering voor het transport van muziek. Hier is enkel de afstand tot de bron van invloed op de hoorbaarheid. Muziekinstrumenten voor buiten zijn dan ook hard klinkend. In de besloten ruimte kan er sprake zijn van indirect geluid, door weerkaatsing van geluid of nagalm. Hier heeft ruimte direct invloed op de structuur van de muziek. Rasch toont aan dat er een samenhang bestaat tussen de omvang van het orkest, het aantal toeschouwers, het muzikale repertoire en de ruimte.

In zijn artikel *De kromming van tijd en ruimte* stelt de astrofysicus Vincent Icke de kosmologische ruimte aan de orde.

Reeds vroeg in de zeventiende eeuw kwam de natuurkundige Descartes tot het inzicht, dat ruimte niet 'niets' is, maar een wezenlijk onderdeel van de structuur van ons heelal. Het duurde nog drie eeuwen na Descartes, voordat de gedachte dat ruimte echt fysisch 'iets' is, door Einstein werd gevormd tot een bruikbaar natuurkundig instrument: de Algemene Relativiteitstheorie.

Inleiding

Icke laat zien hoe Einstein erin slaagde om de structuur van ruimte en tijd te beschrijven en welke verbluffende conclusies volgen uit deze beschrijving. Als voorbeelden worden de verbazingwekkende compacte objecten, de zogenoemde 'zwarte gaten' gebruikt.

De artikelen zijn bewerkingen van lezingen, gehouden op het symposium *De Ruimte*, (mei 2000), georganiseerd door het Bureau Studium Generale van de Universiteit Utrecht.

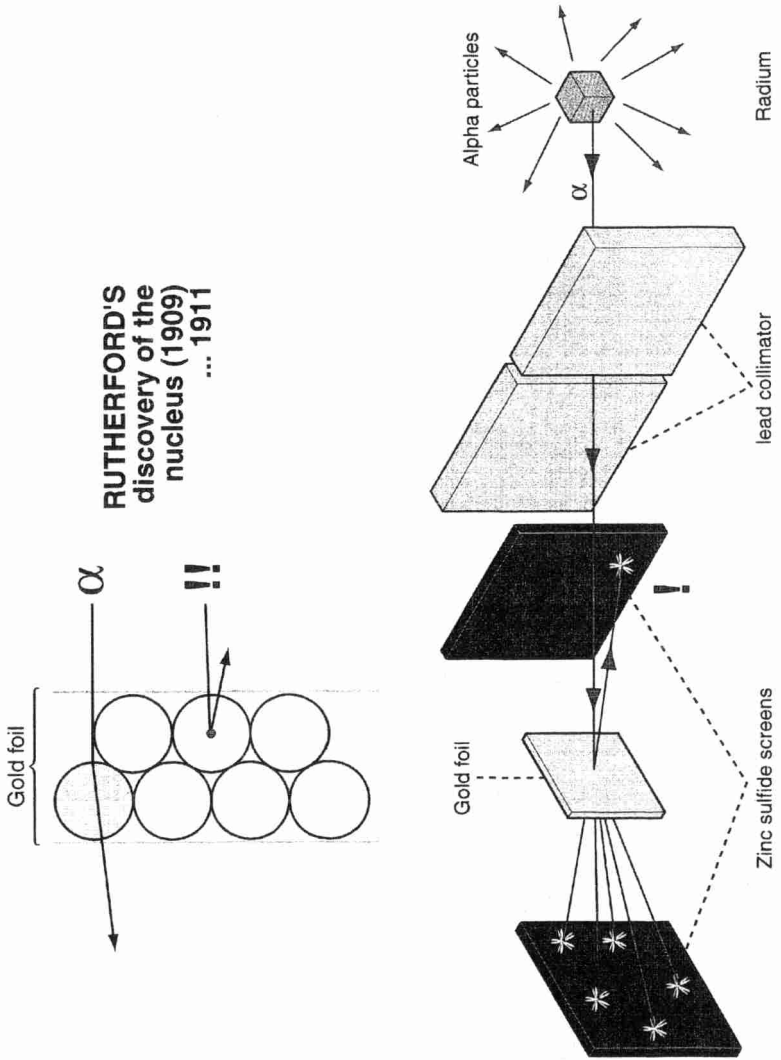
De subatomaire ruimte

Ger van Middelkoop

Het atoom

Een atoom is — populair gezegd — vrijwel geheel leeg. Deze kennis is ongeveer honderd jaar oud. Het begrip atoom bestaat veel langer. Al in de Griekse Oudheid vroeg men zich af of stoffen tot in het oneindige deelbaar zouden zijn. Misschien was er een kleinste deel dat nog de eigenschappen van die stof zou representeren.

Het was de scheikunde — in het bijzonder Mendelejev — die ons op weg hielp de verschillende atomen te rangschikken naar (chemische) eigenschappen. Niet lang daarna in het begin van de twintigste eeuw, werd een (mechanisch) model ontwikkeld van het atoom. De gevolgen van deze ontwikkeling waren groot en nieuwe ontdekkingen volgden elkaar in een hoog tempo op. Rond de vorige eeuwwisseling wist men van het negatief geladen elektron als een zéér klein atoomdeeltje. Ook was bekend dat atomen elektrisch ongeladen zijn. Een atoom moest dus wel een mengsel zijn van deeltjes met negatieve lading (de elektronen) en deeltjes met positieve lading; in totaal evenveel als de totale negatieve lading. Ook de afmeting van



Afbeelding 1.

een atoom was ongeveer duidelijk: één Ångström (10^{-10} m, ofwel één tienmiljardste meter).

In 1911 deden Marsden en Geiger (van de Geiger-teller) in Manchester een belangrijke ontdekking. Toen ze een dun gouden plaatje met α -deeltjes bestookten 'om te zien wat er zou gebeuren' zagen ze sommige van die deeltjes *terugverstrooien*. Rutherford interpreteerde dit verschijnsel door de conclusie te trekken dat goudatomen moeten bestaan uit een zware kleine kern met daar omheen de zéér lichte elektronen. De voor huidige maatstaven eenvoudige opstelling is geschetst in *afbeelding 1*.

Vrijwel onmiddellijk (1913) introduceerde Niels Bohr (Kopenhagen) daarop zijn model voor het waterstofatoom; een positief geladen kern (het proton) met in een baan eromheen één (negatief geladen) elektron. En passant voerde hij in dat slechts bepaalde banen voor elektronen zijn toegestaan! Een ongehoorde en gewaagde suggestie. Hij moest wel want anders kreeg hij ruzie met de mechanica. In feite legde Bohr een belangrijke basis voor de *quantummechanica* die pas rond 1930 echt ingang vond: de mechanica (of liever de beschrijvingswijze) die moet worden toegepast op systemen van atomaire of nog kleinere afmetingen.

Het bohrse atoom is ontstellend leeg: de kern blijkt zo'n honderdduizend keer kleiner te zijn dan het atoom, dus slechts zo'n 10^{-15} m. In verhouding is dat hetzelfde als de afmeting van de Utrechtse Domkerk voor het atoom, met een speldenknop erin als de kern! Het is een beeld dat gebaseerd is op de gewone mechanica. De quantummechanica die nog steeds als de enig juiste beschrijving geldt voor atomaire of kleinere systemen, leert echter dat die atomaire ruimte allesbehalve leeg is: er is overal in die ruimte een zekere kans om het elektron aan te treffen.

Samenvattend kunnen we zeggen dat de atomaire ruimte zeer klein is — één tienmiljardste meter als afmeting — maar niet zo

leeg als we dachten. Dit thema zal ons in de rest van dit verhaal achtervolgen.

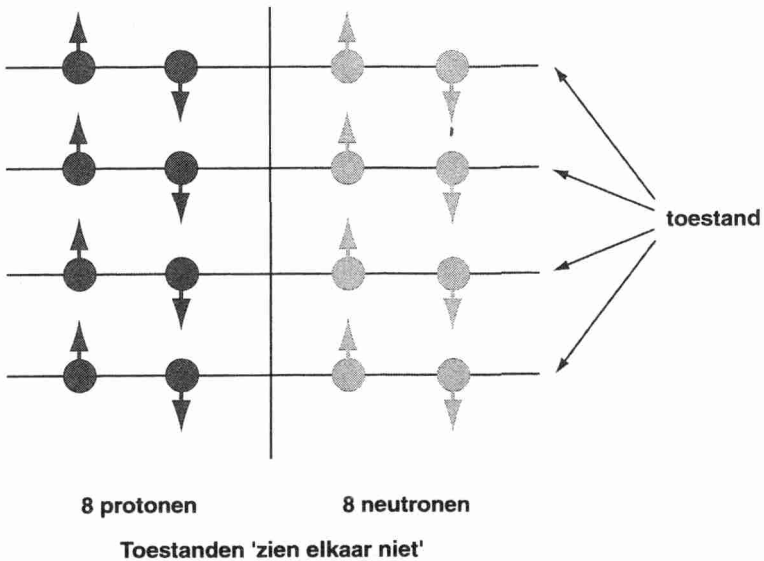
We gaan nu naar de echte subatomaire ruimte. Als maat daarvoor nemen we de afmeting van een proton (10^{-15} m). Dat is heel redelijk, want één van de grootste atomen die wij kennen — het goudatoom — heeft slechts een vijfmaal grotere straal.

In de tijd van Rutherford leek de kern een elementair, dat wil zeggen ondeelbaar, onderdeel van het atoom. Het bestaan van radioactief verval van sommige kernen en — uiteindelijk — de ontdekking van een neutraal kerndeeltje, het neutron (Chadwick, 1932, ook in Manchester), leidde tot de conclusie dat met twee bijna identieke bouwstenen, het proton en het neutron, alle kernen kunnen worden gemaakt. Deze kennis heeft de grote stoot gegeven aan de ontwikkeling van de kernfysica waarbij zich ideeën ontwikkelden die erg vreemd lijken. Laat ik er één proberen uit te leggen; die heeft direct te maken met het vullen van de ruimte — nu de subatomaire.

Binnen de kern

Om het vervolg te kunnen 'begrijpen' moeten we het eerst over spin hebben. Spin is de hoeveelheid draaiing die een deeltje (een proton of neutron, maar ook een kern of elementair deeltje) om zijn eigen as heeft — als tolletje. Spin werd ontdekt bij het elektron door onze landgenoten Goudsmit en Ühlenbeck (Leiden, 1925) toen ze nog student waren! De quantummechanica leert dat de grootte van spin slechts bepaalde waarden kan aannemen, of zoals we zeggen gequantiseerd is. Zo kan de spin van bepaalde soorten deeltjes slechts $1/2 \hbar$ zijn of soms ook $3/2 \hbar$, $5/2 \hbar$, en van andere $0 \hbar$, $1 \hbar$ of soms ook $2 \hbar$. De grootte \hbar (spreek uit: h-streep) is de constante van Planck (gedeeld door 2π , een eigenaardigheid die met het streepje wordt aangeduid). De deeltjes met halftallige spin noemen we fermionen (naar de Italiaanse fysicus Fermi) en de andere heten bosonen (naar de Duitser Bose). Deze deeltjes vertonen een eigenaardig verschil in gedrag. Het formalisme van de quantummechanica

leert dat een deeltje zich altijd in een zekere 'toestand' bevindt (omschreven door een zogenoemde golf functie). Verder blijkt dat er slechts twee identieke fermionen (bijvoorbeeld protonen) in één toestand passen mits hun spins tegengesteld zijn (dus bijvoorbeeld links- en rechtsdraaiend); het uitsluitingsprincipe van Pauli. Voor bosonen is dat niet het geval; er passen er oneindig veel in één toestand. Dit fermiongedrag heeft een merkwaardige consequentie: in een kern, opgebouwd uit protonen en neutronen (dat zijn fermionen) kunnen deze deeltjes slechts per paar in één toestand zitten en dan nog met hun spins tegengesteld gericht. Een kern met zestien deeltjes, acht protonen en acht neutronen (de kern van het zuurstofatoom) moet dus vier van die toestanden hebben voor protonen en ook vier voor neutronen; dit is schematisch aangeduid in *afbeelding 2*.



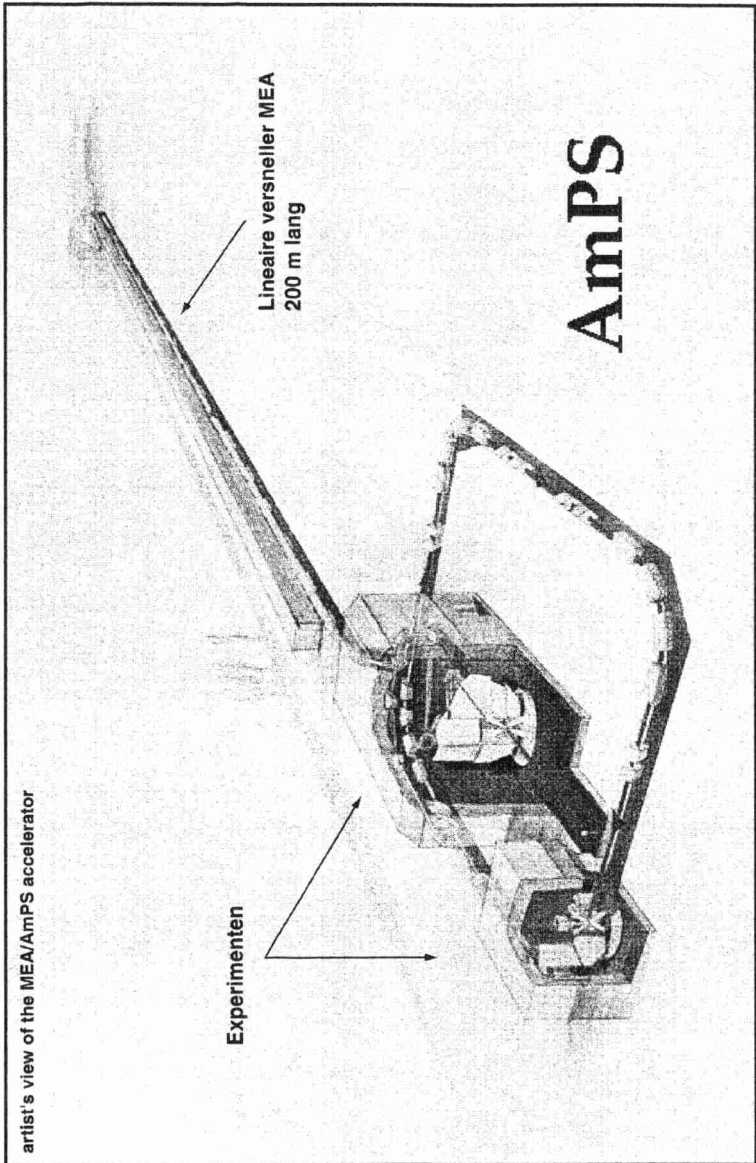
Afbeelding 2.

Omdat deze verschillende toestanden 'onafhankelijk' zijn — niets met elkaar te maken hebben — *zijn de protonen en neutronen bijna geheel vrij in hun beweging* (uiteraard binnen hun toestand). Een model hierop gebaseerd — het zogenaamde schillenmodel, ook wel 'onafhankelijke deeltjesmodel' genoemd — blijkt kernen heel goed te beschrijven.

Dat was bepaald niet de verwachting: protonen en neutronen zijn behoorlijk 'harde' bolletjes met een straal van 1 femtometer (fm, ofwel 10^{-15} m). Het blijkt dat een kern met A nucleonen (aantal protonen én neutronen tezamen) een straal heeft van $R = 1,2 A^{1/3}$, dat wil zeggen dat de bolletjes als knikkers in een bolvormig) zakje zitten in een dichte pakking; hoezo vrije beweging? Anders gezegd, de ruimte is zeer gevuld en toch kunnen de deeltjes vrij ten opzichte van elkaar bewegen!?

Een experiment

Het is aardig om stil te staan bij één van de vele experimenten die op dit gebied zijn gedaan. Zulke experimenten lijken op de proef van Rutherford. Geen α -deeltjes met lage energie (zo'n 5 MeV) in dit geval, maar elektronen versneld door een lineaire versneller met een maximale energie van 700 MeV (het elektron heeft een spanningsverschil van 700 miljoen volt doorlopen over een afstand van tweehonderd meter). Deze Medium Energy Accelerator (MEA) met een opslagring (AmPS: Amsterdam Pulse Stretcher) was tot eind 1998 bij het NIKHEF (Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica) in bedrijf in Amsterdam. *Afbeelding 3* geeft een beeld van de versneller en de ring.



Afbeelding 3.

Elektronen met een energie van 700 MeV kunnen gemakkelijk 200 tot 500 MeV overbrengen op een kern waaraan ze verstrooid worden. Dat gebeurt via fotonen, lichtdeeltjes, de dragers van de elektromagnetische kracht. Een foton van 200 MeV heeft een golflengte van 1 fm, en kan dus goed een proton in de kern onderscheiden, net als bij zichtbaar licht waar we objecten van 0,5 — 1 μm (duizendste millimeter) via een microscoop kunnen onderscheiden omdat dat overeenkomt met de golflengte van licht. Op deze manier kan het schillenmodel worden getoetst. Het merkwaardige is dat die beschrijving heel goed blijkt te kloppen en dat is vreemd in het licht van de dichte pakking van protonen en neutronen (zie boven).

Elementaire deeltjes

Een korte uitleg van de verdere ontwikkelingen in de speurtocht naar de elementaire bouwstenen en de krachten ertussen is nodig voor we de ruimte binnen het proton kunnen betreden. In het midden van de jaren vijftig —het valt samen met de oprichting van het laboratorium voor onderzoek naar elementaire deeltjes CERN bij Genève door een tiental West-Europese landen — scheidden zich de geesten van de kernfysici en de later zogenoemde hoge-energiefysici. De laatsten zetten de speurtocht naar de elementaire deeltjes voort. Dit was geen eenvoudige opgave. Na vele jaren en na vele nieuwe — niet zo elementaire — deeltjes te hebben gevonden, bracht Gell-Mann eerst enige theoretische orde aan. De vele ontdekte deeltjes bleken in eenvoudige schema's van acht- of tientallen gerangschikt en geklassificeerd te kunnen worden door een nieuw soort deeltje, het quark, te postuleren. Op grond van de wiskundige theorie van groepen — en geïnspireerd door de experimentele resultaten — zouden er aanvankelijk drie soorten zijn; ze kregen de namen 'up' en 'down' (de bouwstenen van proton en neutron) en 'strange' (voor deeltjes met 'vreemde' eigenschappen). Na de spectaculaire ontdekking van het J/ψ — deeltje (tegelijk in Brookhaven op Long Island door Ting en

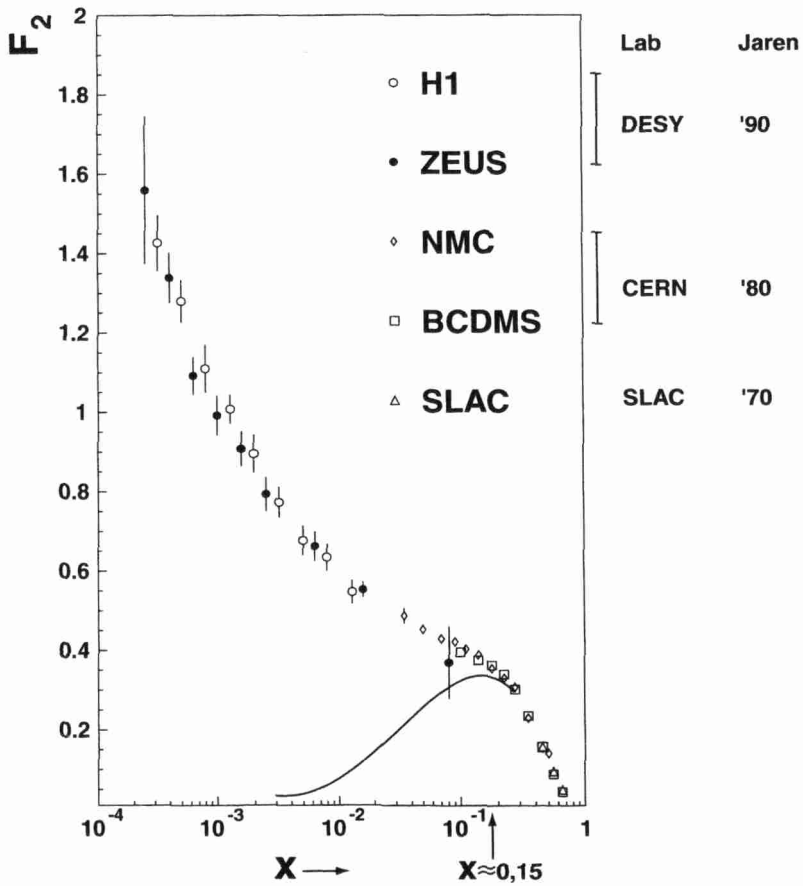
bij SLAC in Californië door Richter) begin jaren zeventig bleken er — uiteindelijk — zes quarks te moeten zijn. De J/psi-ontdekking leidde tot het quark 'charm' (tover), en kort daarop werd 'bottom' gevonden. Het duurde vele jaren totdat de ontbrekende en verreweg de zwaarste 'top' op Fermi-lab bij Chicago werd ontdekt.

Terug naar de hypothese van quarks door Gell-Mann. Tot eind jaren zestig waren er twee kampen: de gelovigen en de ongelovigen. Totdat in 1969 bij de lineaire versneller van SLAC (Stanford, Californië), in opnieuw een 'eenvoudig' Rutherford-experiment harde pitten in het proton werden gevonden; aanvankelijk partonen genoemd. Toen het er ook nog eens drie bleken te zijn was het pleit gewonnen; deze partonen werden met de quarks van Gell-Mann geïdentificeerd. De ongelovigen moesten toegeven dat deeltjes met ladingen van $2/3$ en $1/3$ van de elektronlading bestaan, zonder ze ooit direct te hebben kunnen waarnemen.

Deze spectaculaire ontdekkingen leidden tevens tot de formulering van de quantum-chromodynamica (QCD), die werd geïnspireerd door de quantum-elektrodynamica (QED), de succesvolle theorie die de elektrische (en magnetische) kracht op subatomair niveau beschrijft (en die onder andere leidt tot het foton als drager van die kracht). Het krachtdragerdeeltje van QCD wordt gluon genoemd. De overdracht verloopt via *kleurlading*. De kleurkracht is vele malen sterker dan de elektrische kracht. Verdere — belangrijke — bijzonderheid is dat de sterke kracht *toeneemt* als functie van de afstand. Dit is geheel anders voor de elektrische kracht, die net als de zwaartekracht in sterkte omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand ($1/r^2$). Deze eigenschap van de sterke kracht heeft grote consequenties voor de subatomaire ruimte.

Binnen het proton

We zagen eerder dat een 200 MeV foton een golflengte van 1 fm heeft en dat we daarmee protonen binnen kernen uitstekend



Afbeelding 4.

kunnen zien. Om substructuur (de quarks) waar te kunnen nemen zal de golflengte zo'n tien à honderd maal kleiner moeten zijn. Dat betekent een energie-overdracht aan het proton van zo'n 2-20 GeV (1 GeV = 1000 MeV). Daarom moet een deeltjesversneller, bij voorkeur van elektronen, ten minste 20 GeV kunnen leveren. En dat is precies de energie die bij SLAC in 1969 beschikbaar was en waarmee partonen (de quarks) werden gevonden.

Verschillende groepen bij CERN, maar ook bij Fermi-lab (Chicago) hebben later de quarks in het proton uitvoerig bestudeerd. Daarbij werd ontdekt dat alle quarks in het proton tezamen slechts *de helft* dragen van de impuls (hoeveelheid van beweging: $p=mv$) van het proton. De conclusie hieruit is dat de resterende impuls in de gluonen moet zitten! Aangezien een gluon *elektrisch ongeladen* is kan het niet direct gezien worden door elektronen.

In *afbeelding 4* staan metingen uitgezet van vijf experimenten. Het oudste is dat van SLAC; 'BCDMS' en vervolgens 'NMC' zijn de CERN-experimenten. Zij werden uitgevoerd met een bundel van muonen (zware elektronen) bij een energie van 100-300 GeV. Ten slotte, ZEUS en H1 zijn experimenten in het onderzoekscentrum DESY bij Hamburg waar versnelde elektronen (30 GeV) botsen op versnelde protonen (900 GeV). Hierbij kunnen energieën worden overgedragen van zo'n 100 GeV, dat wil zeggen een ruimtelijk oplossend vermogen van 0,002 fm ($2 \times 10^{-18} \text{m}$)!

In *afbeelding 4*, overgenomen uit een overzichtsartikel van Engelen en Kooijman (NIKHEF), staat de gemeten zogenaamde structuurfunctie F_2 uitgezet tegen de quarkimpuls x . Deze structuurfunctie geeft de verdeling (als functie van de impuls) van *alle quarks* in het proton. Merk op dat de resultaten van de experimenten zeer goed met elkaar overeenstemmen en dat ze één vloeiende kromme beschrijven met de suggestie van een piek bij $x = 0,1$ à $0,2$.

In *afbeelding 4* staat ook schematisch aangeduid hoe de resultaten van deze vijf experimenten samen kunnen worden geïnter-

preteerd. Als het proton uit precies drie quarks zou bestaan (twee 'up' en één 'down') en die zouden ieder precies één derde van de impuls van het proton hebben, dan zou een scherpe piek bij $x = 1/3$ te zien moeten zijn. De geschetste klokvormige verdeling heeft zijn maximum bij $x \approx 0,15$ ('de helft' van $1/3$). Dat klopt met de eerdere uitspraak dat de (drie) quarks samen slechts de helft van de impuls van het proton bezitten (zie boven). Dat we geen scherpe piek zien, maar een brede verdeling, komt door de willekeurige bewegingen (en 'botsingen') die de quarks maken waardoor een uitgesmeerde impulsverdeling ontstaat.

Maar hoe staat het met de rest? De sterk oplopende staart (naar zéér kleine waarden van x , de quarkimpuls — let op de x -as is logaritmisches!) wordt toegeschreven aan 'zeequarks'. Wat zijn zeequarks?

Deze quarks die altijd in paren (quark — antiquark) ontstaan zijn een gevolg van de eigenschap van de sterke (kleur-)kracht dat deze toe neemt met de afstand (zie boven) en van de equivalentie van energie en massa ($E = mc^2$). De kracht tussen twee quarks (bijvoorbeeld een up en een down in het proton) kan voorgesteld worden door een elastiekje: hoe verder het elastiekje wordt uitgerekt (de afstand tussen de twee quarks wordt vergroot) hoe groter de aantrekkende kracht totdat het elastiekje breekt. In dat geval is er voldoende energie (E) beschikbaar om twee quarkmassa's (die van een quark en het bijbehorende antiquark met even grote massa's) te laten ontstaan. ($E=mc^2$). Er zijn dan vier in plaats van de oorspronkelijke twee quarks; dus up en down én up en anti-up of down en anti-down. Omdat de meeste energie bij de breuk van het elastiekje in de quarkmassa's gaat zitten is de bewegingsenergie (en dus de impuls) van de nieuwe quarks — de zeequarks— gering. Anders gezegd deze quarks hebben een waarde kleine x . En dat is precies wat we zien in *afbeelding 4*.

Het breken van elastiekjes is niet de enige bron van zeequarks. Deze 'zachte' quarks kunnen ook op een andere manier ontstaan: de quantummechanica laat toe dat energie kan worden

geleend voor kortstondig levende quark-antiquark-paren. Dat heeft te maken met de onzekerheidsrelatie. Kortom, kwalitatief is goed te begrijpen dat er bij kleine waarden van x veel quarks worden gezien in de metingen die tot op dit moment nog steeds in Hamburg gebeuren. Het was enige jaren geleden wél een grote verrassing dat het er zoveel zijn.

Leeg of vol?

De atomaire ruimte is relatief leeg. Weliswaar kan een elektron zich 'overall in het atoom bevinden', maar het is er slechts één in het hele waterstofatoom. Bij de atoomkern heeft het Pauli-principe voor fermionen de merkwaardige consequentie dat protonen en neutronen vrij ten opzichte van elkaar kunnen bewegen. Binnen een proton leken eerst drie quarks voldoende om een proton te maken. Deze quarks, als ze inderdaad elementair — en dus ondeelbaar — zijn, moeten puntvormig (zonder afmeting) zijn. Het proton zou dus ook vrijwel leeg kunnen zijn. De brekende elastiekjes — de gluonen — samen met de energie-massarelatie van Einstein en de onzekerheidsrelatie van Heisenberg gooien roet in het eten: als we goed kijken, zoals bij DESY in Hamburg, zien we een 'overvol' proton!

Het 'waar' van het menselijke brein

De cognitieve neurowetenschap van de ruimte

Albert Postma

Inleiding

'Goede taxichauffeur heeft grotere hersenen'. Begin dit jaar bereikte dit opmerkelijke bericht de media. Preciezer gesteld handelde het zich hier om onderzoek aan het University College London waarin een relatie tussen het volume van een specifieke hersenstructuur — de hippocampus — en ruimtelijke oriëntatie vaardigheden werd aangetoond (Maguire et al., 2000). Het beroep taxichauffeur vereist in Londen een grote bedrevenheid in navigatie- en ruimtelijke oriëntatievermogens. Blijkbaar is het hippocampale circuit hier belangrijk voor. Taxichauffeurs bezitten een grotere hippocampus dan vergelijkbare leeftijdsgenoten met een ander beroep. Omdat er tussen de taxichauffeurs nog een verfijndere relatie werd vastgesteld tussen ervaringsjaren en hersenvolume, lijkt het er meer op dat de hippocampus gemoduleerd wordt door de dagelijkse ervaringen en activiteiten, dan dat een grote hippocampus een a-priori reden is geweest om taxichauffeur te worden.

Dit voorbeeld roept twee vragen op. Wat zijn precies onze ruimtelijke oriëntatievermogens? En hoe kunnen we vaststellen waar in ons brein deze vermogens zich bevinden? De verwerking van ruimtelijke informatie is cruciaal voor een organisme's dagelijks functioneren en overleven. Door te bepalen waar

dingen zijn, inclusief de eigen positie, en door deze informatie in de tijd beschikbaar te houden in het geheugen, kunnen we doelgerichte handelingen uitvoeren. We kunnen zo bijvoorbeeld voorwerpen aanwijzen of vastpakken en ons zelf er naar toe verplaatsen. We kunnen de ruimtelijke lay-out van onze omgeving herinneren, onthouden waar belangrijke items zijn en de route van de ene locatie naar de andere leren. Ruimtelijke cognitie is de verzamelnaam voor deze mentale vaardigheden. In deze verhandeling probeer ik een korte introductie te geven op het wetenschappelijke onderzoeksgebied dat zich met deze vragen bezighoudt. De cognitieve neurowetenschap van de ruimte is een interdisciplinair terrein waarin psychologen, biologen, medici, fysici en computerwetenschappers elkaar treffen.

Mentale constructie van de ruimte: ruimtelijke representaties

Elke seconde bombarderen talloze sensorische prikkels ons brein. Licht valt in verschillende golflengtes op ons netvlies. Geluid van diverse sterktes en toonhoogtes prikkelt het trommelvlies. Tastprikkel ontstaan wanneer we actief objecten vastpakken en bevoelen. Daarnaast krijgen we ook proprioceptive signalen over waar onze ledematen zich bevinden en naar toe bewegen. In principe gebruiken we al deze informatie om een voorstelling van de ruimte te vormen. Veel van wat in deze voorstellingen gevat is, is niet direct zo aanwezig in de sensorische informatie, maar moet er uit afgeleid worden. Met andere woorden, ons brein ordent actief de binnenkomende informatie in een ruimtelijke representatie. Empiristen, als de filosoof Berkeley in de achttiende eeuw, meenden dat we dit ordenende principe leerden door een veelheid aan ervaringen waarmee we opgroeiden. Kant, enige decennia later daarentegen, ging uit van een aangeboren ruimtegevoel. We nemen de 'ruimte' waar omdat onze geest ertoe is uitgerust binnenkomende prikkels op een dergelijke manier te ordenen. We zouden zo zelfs een euclidisch ruimtelijk beeld uit onze inter-

actie met de wereld bouwen, hoewel de fysieke werkelijkheid zelf niet euclidisch is (zie ook verhaal Vincent Icke in deze bundel). Euclidische voorstellingen vormen evenwel simpele, effectieve voorstellingen die tot efficiënt gedrag leiden en zo de overlevingskansen van een organisme vergroten (O'Keefe, 1993).

Blijkbaar creëren we een mentale representatie van de omringende ruimte. Deze heeft twee opvallende kwaliteiten. Hij heeft een picturaal karakter en hij beschrijft de ruimtelijke relaties in analoge, metrische termen. Probeer bijvoorbeeld de inrichting van je slaapkamer voor je geest te halen. Bij de meesten zal dit een mentale foto oproepen van een aantal objecten: bed, stoel, wastafel. De spatiële kenmerken van deze foto betreffen onder andere de afstanden tussen deze objecten. Doorgaans zijn deze analoog aan de ordening van de werkelijke slaapkamer: in onze geest lijkt de stoel twee keer zover van het bed als de wastafel te staan, precies zoals dit ook in het echt zo is.

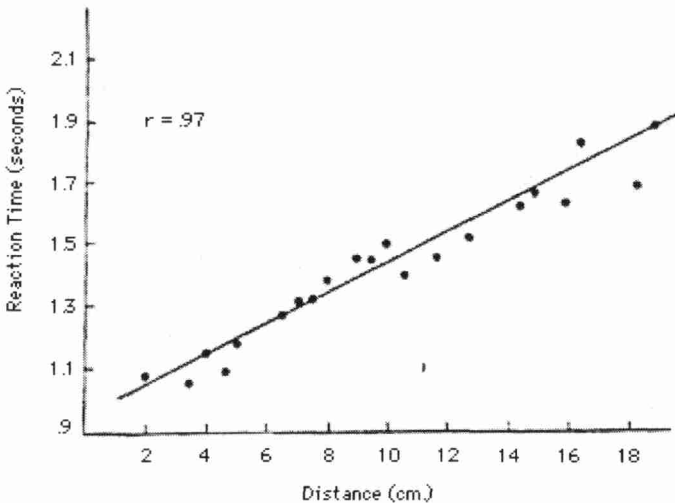
De psycholoog Kosslyn deed in de jaren zeventig enkele vernuftige experimenten naar deze eigenschappen van onze ruimtelijke representaties. Hij liet proefpersonen de kaart van een fictief eiland leren (zie *afbeelding 1*), en vroeg ze vervolgens mentaal van het ene voorwerp naar het andere te lopen.



Afbeelding 1

Kosslyns eiland. Uit *Kosslyn et al.* (1978).

Zoals *afbeelding 2* laat zien is er een vrijwel perfecte relatie tussen afstand en mentale wandeltijd. In deze mentale wandeling doorlopen dus wij een ruimtelijke representatie waarin afstand bijna identiek is weergegeven aan fysieke afstand.



Afbeelding 2

Relatie tussen mentale looptijd en werkelijke fysieke afstand.
Uit *Kosslyn et al.* (1978).

Nu zou men natuurlijk kunnen tegenwerpen dat bovenstaande gegevens puur gebaseerd zijn op faalbare introspecties. De proefpersoon die een dergelijke taak voorgelegd krijgt, doet langer over de mentale wandeling van de put naar het gras dan naar de boom omdat hij of zij eenvoudigweg 'weet' dat die afstand meer tijd zal vergen. Om deze alternatieve verklaring uit te sluiten zijn studies met de zogenaamde 'priming' techniek nuttig (McNamara, 1991). Taak is om eerst weer de spatiële lay-

out goed te leren, waarna vervolgens voorwerpen individueel getoond worden. Proefpersonen dienen over de voorwerpen zo snel mogelijk te beslissen of ze al dan niet in de geleerde lay-out zaten. Echter voor elk 'doel' voorwerp wordt een ander voorwerp getoond — de 'prime' — waar niks mee gedaan hoeft te worden. Nu blijkt dat reactietijden op de 'doel' objecten beïnvloed kunnen worden door de 'prime'. Reacties zijn sneller indien vlak daarvoor een ander voorwerp getoond wordt dat dichtbij geplaatst is dan wanneer het verder aflight. De boom zal de put sterker faciliteren dan het gras. Omdat niks met de 'prime' gedaan hoeft te worden, speelt enige onbedoelde invloed van verwachtingen van de proefpersoon hier geen rol. De 'priming' data ondersteunen zo de gedachte dat in onze voorstellingen van de ruimte afstand een rol speelt. Er is echter meer aan de hand. Indien ik een streep trek tussen de boom en de put in, verandert mijn mentale organisatie. Voorwerpen uit gescheiden regio's beïnvloeden elkaar dan minder dan items uit dezelfde regio's, ook al liggen eerstgenoemde voorwerpen dichterbij elkaar. Hoewel onze voorstellingen van de ruimte analoge karakteristieken herbergen, worden ze ook beïnvloed en vertekend door organisatorische principes als kunstmatige en subjectieve grenzen. Met andere woorden, psychologische afstand is niet altijd fysieke afstand.

Soorten ruimtelijke representaties: egocentrische versus allocentrische referentiekaders

Het voorgaande suggereert dat we voorstellingen van onze omgeving maken die naast metrische karakteristieken ook non-metrische kenmerken bevat. Deze laatste uiten zich in de vorm van vertekeningen in het geheugen welke ontstaan door (subjectieve) grenzen en afscheidingen. Voorstellingen van de ruimte worden wel aangeduid met de term 'cognitieve kaart': een soort plaatjes-achtige afbeelding die we met ons geestesoog kunnen inspecteren. Zijn 'cognitieve kaarten' de enige manier waarop we de ruimte mentaal presenteren? Intrigerend onder-

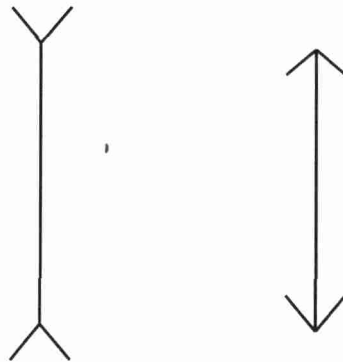
zoek door Milner en Goodale (1995) laat zien van niet. De uitgangspunten van hun onderzoek lag in eerder werk dat aantoonde dat in het brein van primaten speciale neuroanatomische circuits zijn te onderscheiden voor herkenning van 'wat' iets is versus waarneming van 'waar' zich een voorwerp bevindt. Een stoornis in het 'wat' circuit zal leiden tot problemen in identificatie van objecten terwijl een defect in de 'waar' route inaccurate plaatsbepaling veroorzaakt.

Het 'wat - waar' onderscheid lijkt een mooie, simpele voorstelling van zaken. Het ene neuroanatomische circuit verzorgt vorm en object herkenning, terwijl het andere posities berekent. Verderop in het brein zou deze informatie geïntegreerd moeten worden. Deze gedachte gaat echter aan het gegeven voorbij dat er eigenlijk voortdurend een wisselwerking tussen spatiële en objectinformatie nodig is. Bij het herkennen van complexe voorwerpen is het immers van groot belang de intrinsieke spatiële relaties waar te nemen. Milner en Goodale (1995) hebben daarom ook beargumenteerd dat een absolute scheiding in de perceptie van 'wat' en 'waar' informatie te simpel is. Zij stellen dat de evolutie van ons brein gestuurd is door hoe de waargenomen (visuele) informatie gebruikt moet worden. Het 'wat' kanaal zou tot doel hebben een perceptuele en cognitieve representatie van de stabiele kenmerken van visuele objecten te bouwen. Hoewel vooral nodig voor objectherkenning, bevat deze representatie ook (stabiele) spatiële kenmerken. Het 'waar' kanaal is juist gericht op visueel gestuurde motoracties. Speciaal komt dit neer op spatiële handelingen als grijpen van of reiken naar een voorwerp. Het is primair belangrijk het voorwerp te lokaliseren. Echter ook wordt daarbij de vorm van het voorwerp geanalyseerd voor zover die relevant is voor de actie (bijvoorbeeld de hand wordt gevormd door de grootte van het item). Goodale en anderen (1991) beschrijven een neurologische patiënt die, hoewel ze niets kon zeggen over de grootte, vorm of oriëntatie van objecten, ze desalniettemin wel kon vastpakken of aanwijzen. Dit suggereert een duidelijke disso-

ciatie, niet zo zeer tussen objectidentificatie (wat) en lokalisatie (waar), maar meer tussen cognitieve en bewuste waarneming van visuele stimuli en sensomotorische, bijna onbewuste appreciatie van dezelfde stimuli.

Het juist beschreven onderscheid wordt ook wel gekoppeld aan het verschil tussen allocentrische en egocentrische spatiële referentiekaders (cf. Postma, Sterken, De Vries & De Haan, 2000). Allocentrische representaties zijn stabiele, absolute coderingen van spatiële relaties gebaseerd op verhoudingen tussen objecten onderling of ten opzichte van min of meer absolute referenties (bijvoorbeeld het meubilair in een kamer). Versimpeld zou je het gelijk kunnen stellen met de eerder genoemde 'cognitieve kaarten'. In egocentrische referentie wordt de locatie van een item gerelateerd aan de waarnemer. Het is begrijpelijk dat egocentrische referenties juist belangrijk zijn voor spatiomotorische acties. Enkele recente, experimentele studies illustreren het verschil tussen allo- en egocentrische representaties.

Afbeelding 3 vormt een bekende visuele illusie. Indien we een cognitief (allocentrisch) oordeel over de grootte van beide lijnen moeten geven zullen we geneigd zijn de linker groter in te schatten (abusievelijk). Als we echter naar de uiteinden van de lijnen moeten wijzen, nadat die kort zijn aangeboden, is onze inschattingsfout veel kleiner (cf. Rossetti, 1996). Blijkbaar kunnen we niet goed waarnemen en bewust beoordelen wat we wel correct kunnen vastpakken.



Afbeelding 3
Muller-Lyer illusie

Naast patiënten die wel kunnen grijpen wat ze niet kunnen beschrijven, ondersteunt ook het omgekeerde patroon Milner en Goodales theorie: namelijk patiënten die niet kunnen vastpakken wat ze wel kunnen beschrijven (Milner et al., 1999). Een interessant geval van een patiënt met problemen in de egocentrische lokalisatie is beschreven door Blouin et al. (1993). Speciaal vermeldenswaardig is dat deze patiënt input van het proprioceptieve systeem miste. Voor ruimtelijke motorische

activiteit is de combinatie van visuele met proprioceptive signalen over de positie van de effectoren (dat wil zeggen ledematen) en de lichaamsreferentie onontbeerlijk.

Ruimte en modaliteit

Hoewel het zien de belangrijkste informatiebron over de ons omringende ruimte is, is het natuurlijk niet de enige. Weliswaar minder nauwkeurig, kunnen we ook tast, gehoor en zoals juist genoemd, proprioceptie gebruiken om ruimtelijke functies aan te sturen. De vraag rijst hoe informatie vanuit verschillende modaliteiten onze ruimtelijke representaties beïnvloedt en ook hoe de integratie plaatsvindt. Een bekend voorbeeld van een alledaagse situatie waarin we te maken hebben met de wisselwerking tussen verschillende zintuigen is wanneer we een geluidsbron mislokalisieren, zodat deze samenvalt met het corresponderende beeld op een televisie (de 'ventroloquist illusie'). Waar zintuigen allemaal eigen unieke kwaliteiten bezitten, is locatie het aspect dat gemeenschappelijk is. Recent onderzoek heeft zich met name gericht op de oriëntatie van de aandacht in de ruimte door verschillende sensorische prikkels (Schmitt, Postma, & De Haan, 2000). Als we onze aandacht vestigen op een bepaalde locatie in de omringende ruimte zullen we prikkels vanaf die locatie beter verwerken. Men kan dit aantonen door een waarschuwingssignaal op een bepaalde locatie aan te bieden (zogenaamde 'cue') welke gevolgd wordt door een doelstimulus, al dan niet op die locatie. Reacties zijn in het algemeen sneller indien de cue een juiste voorspelling geeft over de doellokatie. Wat nu als een visuele cue de aandacht van de waarnemer heroriënteert, terwijl het doel een toon is? Ook dan volgt het voordeel van de correcte cue. Dit suggereert dat er een sterke uitwisseling van informatie tussen modaliteiten plaatsvindt. Het zou kunnen dat de aandacht gestuurd wordt op een gemeenschappelijk modaliteits-onspecifiek niveau. Wat blijkt evenwel is dat men tot op zekere hoogte de aandacht kan verdelen over een mogelijke visuele prikkel aan de linkerkant en

een auditief signaal rechts. Het is dus waarschijnlijker dat er aparte systemen voor visuele, auditieve, en ook tactiele aandacht bestaan, die evenwel sterk verbonden zijn (Spence & Driver, 1996). De kritische centra voor het richten van de aandacht in de ruimte bevinden zich onder meer in de parietaal kwab van de hersenschors, een gebied waar de informatie uit de verschillende zintuigen samenkomt.

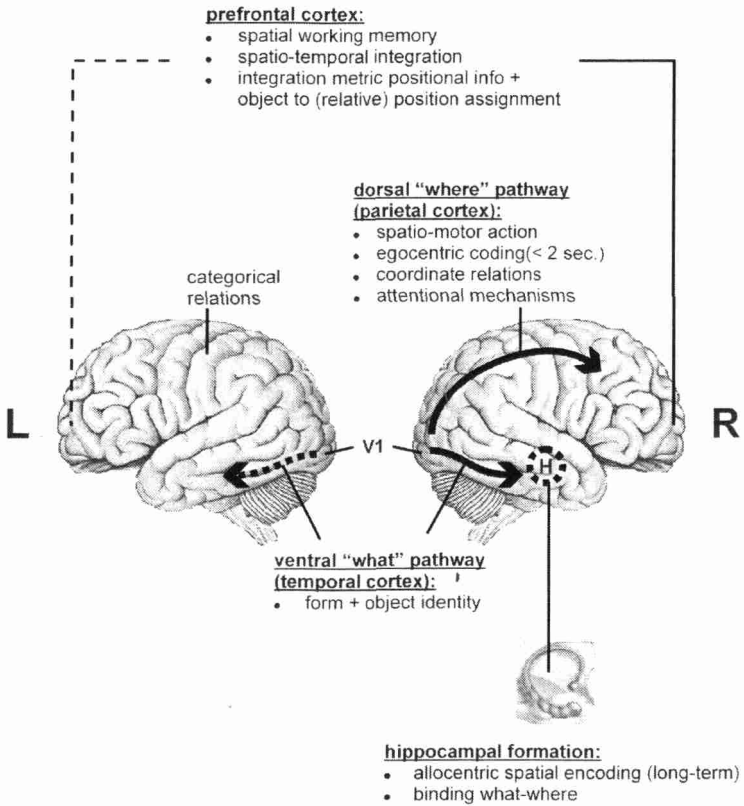
Waar was wat? Ruimtelijk geheugen

Informatie over de spatiële kenmerken van onze omgeving is essentieel voor de waarneming, de aandacht en motorische handelingen. Uiterst belangrijk is ook het opslaan van deze informatie voor langere tijdsperioden in het geheugen. Neuroanatomisch is een van de meest kritische structuren voor ruimtelijk geheugen de hippocampus. Het taxichauffeurvoorbeeld waarmee ik dit betoog begon is maar een van de vele studies die de rol van de hippocampus in de ruimtelijke cognitie aantoonst. Waarom is deze hersenstructuur zo belangrijk? De hippocampus is een neuronanatomische structuur die tal van in- en uitgaande connecties met andere hersengebieden heeft. Als zodanig is het uiterst geschikt voor 'mapping' van de diverse informatie-elementen. Het brengt verschillende kenmerken van omgeving bij elkaar. Een van de functies van dit 'bij elkaar houden' is het herinneren van waar iets is. O'Keefe en Nadel (1978) vonden bijvoorbeeld dat in de hippocampus van de rat zenuwcellen zitten die specifiek op locaties reageren wanneer het dier zich verplaatst door de omgeving. Ook onderzoek bij mensen onderschrijft deze bevinding. Smith en Milner (1989) lieten zien dat patiënten met rechter hippocampale defecten erg slecht waren in het herinneren van de locaties van een verzameling eerder getoonde voorwerpen. Interessant genoeg vertoonden patiënten met linker hippocampale defecten dit probleem niet. Blijkbaar is er functionele specialisatie in onze hersenhelften.

Links of rechts

Een bekende, simpele voorstelling van zaken is dat de linker helft van het menselijk brein zich met taalverwerking bezig houdt terwijl de rechter hersenhelft belangrijk is voor niet-verbale (ruimtelijke) processen. *Afbeelding 4* maakt duidelijk dat het merendeel van de ruimtelijke cognitieve functies zich inderdaad in de rechter hersenhelft lijkt te bevinden. Zo zijn stoornissen op ruimtelijke taken vooral prominent na letsel aan de rechterkant van ons brein. Neuro-imaging studies en vergelijkend dieronderzoek ondersteunen deze gedachte verder. Het gaat evenwel te ver te stellen dat de linker hemisfeer er helemaal niet toe doet. Kosslyn (1987, 1994) beargumenteert dat de waarnemer met twee typen ruimtelijke relaties werkt: coördinate en categorische. De eerste betreffen precieze, metrische codering van posities. Je kunt bijvoorbeeld vaststellen dat je koffiekop zich precies twintig cm van je af bevindt. De tweede is meer een relatieve plaatsbepaling. Het kopje bevindt zich voor of achter het boek, of links of rechts van de computermonitor. Waar de rechter hersenhelft gespecialiseerd is in coördinate relaties, zou de linker beter zijn in categorische (non-metrische). Een reden hiervoor is dat de linker hemisfeer in het algemeen beter is in (verbale) categorische relaties. Kosslyn heeft dit proberen aan te tonen met behulp van zogenaamde 'visual half field' technieken. Je flitst een stimulus kort in het linker of rechter visuele veld. Proefpersonen moeten een categorische dan wel een coördinate beslissing over deze stimulus nemen. Indien de stimulus zich in het linker visuele veld bevindt, bereikt deze eerder de rechter hersenhelft. Het omgekeerde geldt voor prikkels in het rechter visuele veld. Men kan aldus bepalen of informatie die eerst door de linker hemisfeer ontvangen wordt tot snellere reacties voor een categorische beslissing leidt, terwijl het omgekeerde moet gelden voor coördinate beslissingen.

Het 'waar' van het menselijke brein
De cognitieve neurowetenschap van de ruimte



Afbeelding 4

Ruimtelijke functies van het brein. Uit *Postma* (2000).

Methoden van neurocognitief onderzoek

De wetenschappelijke studie van het menselijke brein is zeer sterk in opmars de laatste jaren. De neurocognitieve wetenschap richt zich op het in kaart brengen van de organisatie van mentale functies in relatie tot hersenmechanismen. Het instrumentarium hiertoe is sterk ontwikkeld. De studie van neurologische patiënten — waarvan enkele voorbeelden gegeven zijn in dit betoog — is lang de enige manier geweest iets te zeggen over de link tussen hersenen en gedrag. De moderne fMRI- en PETscan-technieken vormen een belangrijke verbreding van deze methode.



Afbeelding 5

Voorbeeld van de transcraniale magnetische stimulatietechniek, een van de meest recente 'neuro-imaging' technieken (zie Kessels, d'Alfonso, Postma & De Haan, 2000).

Conclusie: waar is het 'waar' van het menselijk brein?

Voorgaand betoog vormt een onvolledig en zeer versimpeld overzicht van de neuroanatomische basis van spatiële functies. Zelfs indien we deze beperkingen in acht nemen, valt het op dat er niet slechts één enkel circuit in de hersenen met de ruimte bezig is. Een groot aantal structuren — zowel corticaal als subcorticaal — analyseren de ruimtelijke kenmerken van onze omgeving en sturen zo de waarneming, motoriek, aandacht, of herinnering. Er is blijkbaar niet een enkel 'waar', maar meerdere. Voor een vaardigheid die zo belangrijk is voor ons dagelijks functioneren en overleven als ruimtelijke cognitie is dit maar goed ook.

Literatuur

Blouin, J., C. Bard, N. Teasdale, J. Paillard, M. Fleury, R. Forget en Y. Lamarre, (1993). 'Reference Systems for Coding Spatial Information in Normal Subjects and a Deafferented Patient'. *Experimental Brain Research*, 93. p. 324-331.

Goodale, M.A., A.D. Milner, L.S. Jacobson, en D.P. Carey. (1991). 'A Neurological Distinction Between Perceiving Objects and Grasping Them'. *Nature*, 349. p. 154-156.

Kessels, R.P.C., A.A.L. d'Alfonso, A. Postma en E.H.F. de Haan (2000). 'Spatial Working Memory Performance after High-frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation of the Left and Right Parietal Cortex in Humans'. *Neuroscience Letters*, 287. p. 68-70.

Kosslyn, S.M. (1987). 'Seeing and Imagining in the Cerebral Hemispheres: A Computational Approach'. *Psychological Review*, 94. p. 148-175.

Kosslyn, S.M. *Image and Brain*. The MIT Press, Cambridge, MA 1994.

Kosslyn, S.M., T.M. Ball en B.J. Reiser. (1978). 'Visual Images Preserve Metric Spatial Information: Evidence from Studies of Image Scanning'. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4. p. 47-60.

O'Keefe, J. en L. Nadel. *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford University Press, Oxford 1978.

McNamara, T.P. (1991). 'Memory's View of Space'. *The Psychology of Learning and Motivation*, 27. p. 147-186.

Maguire, E.A., D.G. Gadian, I.S. Johnsrude, C.D. Good, J. Ashburner, R.S. Frackowiak en C.D. Frith (2000). 'Navigation-Related Structural Change in the Hippocampi of Taxi Drivers'. *Proceedings National Academy of Science USA*, 97(8). p. 4398-403.

Milner, A.D. en M.A. Goodale (1995). 'Disorders of Spatial Perception and the Visual Control of Action'. In *The Casual Brain in Action*. Oxford Science Publications, Oxford. p. 87-119.

Milner, A.D., Y. Paulignan, H.C. Dijkerman, F. Michel en M. Jeannerod (1999). 'A Paradoxical Improvement of Misreaching in Optical Ataxia: New Evidence for Separate Neural Systems for Visual Localization'. *Proceedings of the Royal Society London*, 266. p. 2225-2229.

Postma, A. (2000). *Spatial Cognition: Development, Underlying Representations, and Neural Basis*. NWO Pionier Grant Program.

Postma, A., Y. Sterken, L. de Vries en E.H.F. de Haan (2000). 'Spatial Localization in Patients with Unilateral Posterior Left or Right Hemisphere Lesions'. *Experimental Brain Research*, 134. p. 220-227.

Rossetti, Y. (1996). 'Implicit Perception in Action: Short-lived Motor Representations of Space'. In P.G. Grossenbacher (Ed.) *Finding Consciousness in the Brain. A Neurocognitive Approach*. J. Benjamins Publishing Company, Amsterdam.

Schmitt, M.J.M, A. Postma en E. de Haan. (2000) 'Interactions between Exogenous Auditory and Visual Spatial Attention'. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 53. p. 105-130.

Smith, M.L., en B. Milner (1989). 'Right Hippocampal Impairment in the Recall of Spatial Location: Encoding Deficit or Rapid Forgetting?' *Neuropsychologia*, 27(1). p. 71-81.

Spence, C.J. en J. Driver (1996). 'Audio-visual Links in Endogenous Covert Spatial Attention'. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22. p. 1005-1030.

Ruimte in de architectuur: de grot, de hut, de tent en de leegte

Rob Dettingmeijer

Wie opmerkt hoe vaak architecten en critici spreken over ruimte en architectuur zal het verbazen hoe nieuw het met elkaar in verband brengen van deze twee geenszins eenduidige begrippen is. Had vóór het einde van de negentiende eeuw vrijwel niemand begrepen wat architectuur en ruimte als begrippen met elkaar te maken konden hebben, in het midden van de twintigste eeuw beschouwen de meeste architecten, critici en zelfs historici ruimte als het wezenlijkste begrip bij het spreken over architectuur.

Het meest gebruikte overzichtswerk na de Tweede Wereldoorlog, Nikolaus Pevsners *An Outline of European Architecture*, stelt dat esthetische sensaties door architectuur op drie wijzen kunnen worden opgewekt:

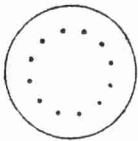
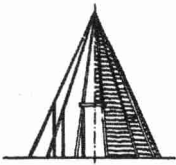
- proporties en ornamenten, maar dat zijn volgens Pevsner schilderkunstige motieven;
- het esthetisch geheel van het object, maar dat is volgens hem sculpturaal;
- het ondergaan van ruimtelijke sensaties, met name bij het interieur. Het maken van dergelijke ruimten is volgens hem het wezen van de architectuur.

Deze opvatting wordt in de jaren vijftig nog extremer verwoord door Bruno Zevi in zijn boek *Architecture as Space, How to Look at Architecture*. Het boek is nadrukkelijk bedoeld om de leek die wel schilderkunst en beeldhouwkunst weet te waarderen en er

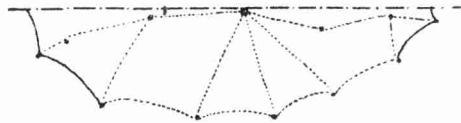
aandacht en geld voor over heeft, ook tot de moderne architectuur te bekeren. Hij kent in aparte hoofdstukken iedere westerse stijlperiode zelfs een eigen ruimtebegrip toe. Wat 'ruimte' voor architecten nu precies inhoudt, blijft in dit boek meestal uiterst onduidelijk. Het kan gaan over het natuurkundige, soms over het filosofische en soms over het sociaal-wetenschappelijke begrip, waarbij deze begrippen dan ook nog een historische ontwikkeling doormaken. Tel daarbij op dat met name binnen de sociale wetenschappen en filosofie, afhankelijk van de verschillende scholen of richtingen in dezelfde periode, sterk verschillende betekenissen gebruikt worden. De vraag dringt zich dan op waarom in zo'n korte tijd de term ruimte zo populair in de architectuur werd.

Ruimte als zelfstandige categorie laat staan als een concrete substantie, "Et comme, de cela seul qu'un corps est étendu en longueur, largeur et profondeur, nous avons raison de conclure qu'il est une substance" (citaat naar Vincent Icke in dit boekje), zoals Descartes al in de zeventiende eeuw voorstelde, is heel lang ondenkbaar in de architectuurtheorie. Wel hadden architecten en theoretici sinds de achttiende eeuw op een steeds abstractere wijze gepraat over volume of massa in de architectuur en de 'leegte/void' of soms zelfs de 'ruimte/space' maar de begrippen konden nog niet los van elkaar gedacht worden. Veel belangrijker dan deze abstracties bleef, wat al sinds de Romeinse tijd als het wezen van de architectuur werd beschouwd: het maken van onderkomens. Bij het zoeken van beschutting onderscheidt de Romeinse architect en theoreticus Vitruvius het schuilen in grotten, dat leidt tot het stapelen van stenen als imitatie van die grotten, en het schuilen onder bomen, dat leidt tot samenbinden van takken en later timmeren van de eerste hutten, als oorsprongen van de architectuur. De nadruk valt in de latere eeuwen dan steeds meer op de mythische eerste 'primitieve hutten' waar de architectonische ordening door middel van zuilen van zou zijn afgeleid. In de negentiende eeuw wordt een pluriformer beeld dominant. Verschillende culturen

zouden verschillende oorsprongen van architectuur kennen. Daarbij gaat het naast 'de grot' en 'de hut' meestal om 'de tent'. De 'primitieve hut' als behorend bij de 'landbouwcultuur van de Romaanse en Germaanse volkeren' blijft men wel als de basis van de westerse architectuur beschouwen (zie *afbeeldingen 1 en 2*)



La hutte du sauvage.



La tente du nomade.

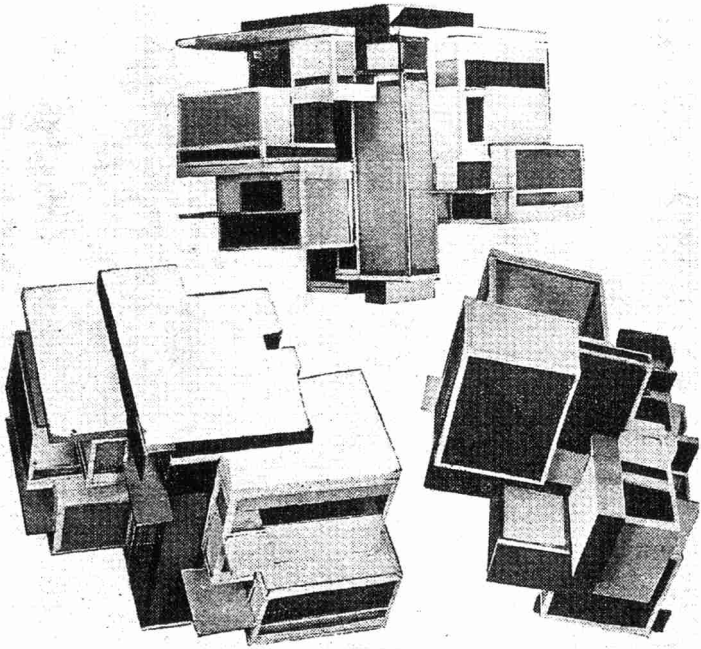
Afbeeldingen 1 en 2.

De primitieve hut en de tent van de nomade volgens Le Corbusier. *Almanach 1925.*

Het is pas in 1860 dat Gottfried Semper in *Der Stil* die ruimte als een wezenlijke en zelfstandige term in de architectuur introduceert. Architectuur begint als de eerste mensen schermen maken om beschutting te zoeken en een gebied afgrenzen van de hen omringende totale ruimte. Nu is het eenvoudiger dit te denken in de Duitse dan in de Engelse of Franse taal, want 'Raum' heeft zowel de betekenis van de gehele ons omringende ruimte als van een 'interieur'. Hoe kort en schijnbaar terloops die opmerking van Semper ook is, het keert het denken tot dan toe over architectuur feitelijk om. Niet langer zijn de maten en voorwerpen, zoals de zuilenordering, bepalend voor de architectuur, maar de wijze waarop ruimte wordt gescheiden en gekoppeld. Het is opvallend dat te zelfder tijd in het Duitse taalgebied zowel in de algemene filosofie als in de esthetica uitgebreid aandacht wordt besteed aan de begrippen ruimte en ruimtebeleving. Camillo Sitte stelt al in 1889 in zijn boek *Der Städtebau nach seinen künstlerischen Grundsätzen* dat de stedenbouw 'Raumkunst' is. In de kunstgeschiedenis probeert Alois Riegl in zijn *Spätromische Kunstindustrie* opvattingen over ruimte te lezen in gemaakte voorwerpen. Paul Frankl probeert in *Die Entwicklungsphasen der neueren Baukunst* (Leipzig 1914) voor het eerst aan te tonen dat iedere beschavingsperiode zijn eigen kenmerkende vorm van ruimtebeleving heeft. Voor de architectuur is het Berlage die zowel de consequenties van Semper, zijn opvatting, als die van de Duitse filosofie en esthetica bredere verspreiding geeft. In 1905 spreekt hij in *Gedanken über Stil in der Baukunst* al zijn overtuiging uit dat architectuur vanuit de binnenruimte gedacht en gemaakt moet worden. In 1908 in zijn *Grundlagen und Entwicklung der Architektur* stelt hij zelfs dat 'Raum bilden' het wezen van de bouwkunst is.

Toch was daar in de architectuur zelf nog weinig van te zien. Het architectonisch ontwerp werd nog steeds voornamelijk tot stand gebracht via plattegrond, doorsnede en opstand (gevel). Ten hoogste werd het belang van de plattegrond ten opzichte van de gevel in het ontwerpen in de loop van de negentiende

en het begin van de twintigste eeuw steeds belangrijker. Een totaal andere voorstelling en een totaal andere opvatting van de relatie tussen ruimte en architectuur treffen we aan in de modellen en studies voor drie huizen van Theo van Doesburg en Cornelis van Eesteren, die zij in 1923 voor een expositie in de Galerie de l'Effort moderne in Parijs maakten. (zie *afbeelding 3*).



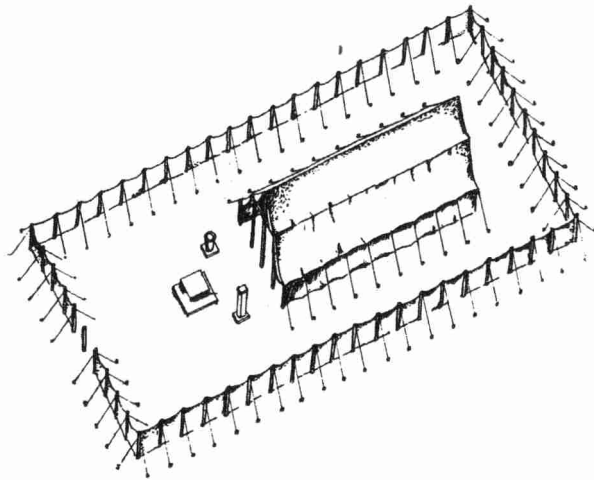
Afbeelding 3.

Theo van Doesburg, Cornelis van Eesteren. Architectonische modellen getoond op de Exposition Galerie de l'Effort moderne 1923.

In deze 'architectuur van De Stijl' en in het een jaar later gepubliceerde manifest *Vers une construction collective* streven ze naar een open architectuur, waarbij door de 'vier dimensies: lengte, breedte, hoogte en tijd' de 'functionele cellen' vanuit de kern naar alle kanten de ruimte in geslingerd lijken en zelfs 'de zwaartekrachten van de natuur' lijken te weerstreven. In deze en in latere publicaties verwijst Van Doesburg vaak naar Einsteins relativiteitstheorie, maar het gaat daarbij ten hoogste om een vage inspiratie en legitimatie. Door in hun compositie bewust af te zien van een ideaal standpunt en ideale route door de gebouwen, maar bewust uit te nodigen alleen maar door willekeurige rondgang en penetratie te beleven, dachten Van Doesburg en Van Eesteren de architectuur in overeenstemming gebracht te hebben met het karakter van de eigen tijd. Het vereist nog steeds meer onderzoek om de werkelijke invloed van dit manifest vast te stellen. In de meeste literatuur ligt vooral de nadruk op de 'breuk' in De Stijl rond die tijd, waarbij de tweedimensionale evenwicht zoekende Mondriaan wordt gecontrasteerd met de drie en zelfs vier dimensies zoekende dynamiek van Van Doesburg. Wel is gewezen op het belang van de wijze van presentatie van de Parijse modellen, met name de abstract ruimtelijke voorstellingen door axonometrische projecties. Maar de toepassing van dit assenstelsel toont natuurlijk juist het onbegrip van de revolutie in het beeld van de ruimte en tijd in de wetenschap.

Een dergelijke extreme nadruk op dynamische ruimte was in die tijd uitzonderlijk. Leerlingen van Adolf Loos spraken wel van het 'Raumplan' als kenmerkend voor zijn architectuur, maar het gaat hier feitelijk nog om het begrip ruimte zoals Berlage dat gebruikte. De ontwerpen van Loos zijn weliswaar van binnen naar buiten, maar nog geheel vanuit het besloten interieur gedacht. Voor verschillende functies maakte hij verschillende ruimten met verschillende afmetingen niet alleen in lengte en breedte maar ook in hoogte. Deze ruimten werden door het componeren van lange zichtlijnen op een complexe

manier gekoppeld. Het exterieur werd uiteindelijk slechts beschouwd als omsluiting van die binnenruimte. Ramen functioneerden alleen voor de belichting van het interieur en naar buiten gluren vond Loos zelfs onbeschaafd. Zelfs Le Corbusier heeft het in de jaren twintig, in de bundeling van eerdere artikelen, *'Vers une architecture'* nog veel meer over volumens dan over ruimten. De plattegrond is volgens hem conform Durands *Précis* uit 1802-1805 nog steeds de kern van de architectonische compositie. Verder is het spel van licht en schaduw, muur en ruimte van gelijk belang. Onder 'espace' verstaat Le Corbusier eerder een archetypisch inperken en zingeven van een deel van de oneindige en vijandige ruimte. Hij heeft het over de 'eerste mens die de eerste tent' opzet en zijn gebied afrastert. Door orde tegenover de wanorde van de natuur te stellen zijn volgens deze moderne architect zo ook de belangrijkste stappen naar de tempelbouw al gezet (zie afbeelding 4).



TEMPLE PRIMITIF

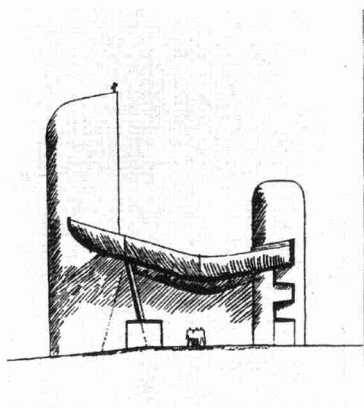
Afbeelding 4.

Temple Primitif, volgens Le Corbusier in *Vers une Architecture* 2nd ed. 1924.

Verder is volgens Le Corbusier, geheel in de Vitruviaanse traditie, ieder bouwen allereerst een onderdak brengen en daarna pas contact met de omringende ruimte maken.

Natuurlijk heeft Le Corbusier later met name via de propaganda van het 'Plan libre' heel duidelijk de vrijheid van ruimtelijke indeling binnen, tussen en op een constructief raster van de gewapend betonconstructie aangetoond. Maar bij nadere beschouwing blijken ook daarbij sculpturale elementen minstens zo belangrijk als de 'tussenruimte'. Ook de buitenruimte wordt vrijwel altijd ingekaderd.

Het is Sigfried Giedion die in de oorlog in de Verenigde Staten met *Time, Space, Architecture, the Birth of a New Tradition* (1941) de idee van de ruimte als wezen van de architectuur en Frankl's opvatting van een wisselend ruimtebegrip voor elkaar opvolgende beschavingsperioden ook ingang in het Engelse taalgebied doet vinden. Behalve ingenieur en gepromoveerd kunsthistoricus was Giedion een goede vriend van Le Corbusier en secretaris van de CIAM (Congrès Internationaux de l'Architecture Moderne), zodat zijn verhaal rechtstreeks instrumenteel voor de moderne beweging is. Het boek begint dan ook met de perspectivische ruimte van de Renaissance om via de dynamisch theatrale ruimte van de Barok noodzakelijkerwijs uit te komen op het eigentijdse ruimte-tijd begrip van de toenmalige hedendaagse architectuur en stedenbouw. Het boek moest daarna regelmatig aangevuld en herschreven worden en het breidde zich uit tot meer dan het dubbele van het oorspronkelijke volume om het eigen gelijk te kunnen blijven funderen in de geschiedenis. Na de Tweede Wereldoorlog gaat Giedion in zijn *Mellon Lectures* in Yale in 1952 op zoek naar de 'Eternal Present'. Daarbij benadrukt hij het belang van de sculpturale elementen in de architectuur net als zijn vriend en bondgenoot Le Corbusier. Het meest opvallend is dit bij Le Corbusier bij zijn sacrale werken, zoals de bekende *Notre Dame du Haut* nabij Ronchamp (zie afbeelding 5).



des volumes
courbes
régles par des génératrices
rectilignes.

Afbeelding 5.

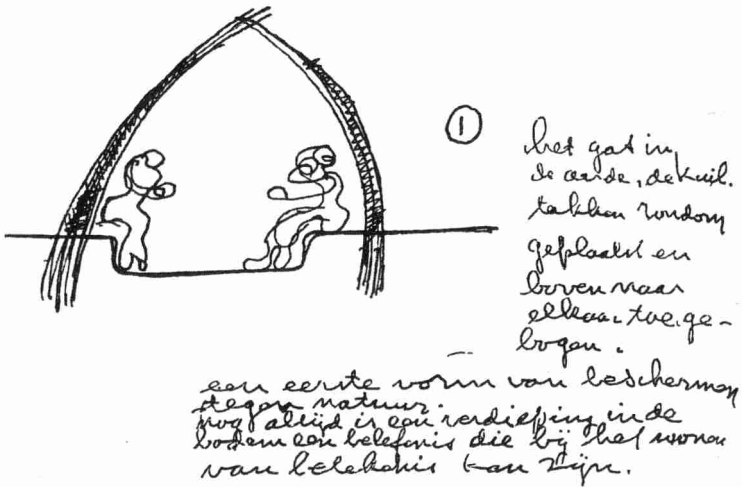
Notre Dame du Haut te Ronchamp. Tekst en schets Le Corbusier ca. 1953.

Hier wordt de relatie binnen- en buitenruimte uiterst complex. Er is een in zichzelf gekeerd teken in de totale ruimte gezet. Binnen wordt doelbewust de suggestie van de eerste rituele ruimte, de grot, gezocht. Giedion denkt dat zijn vriend daarmee definitief tot een historisch nieuwe ruimteopvatting is gekomen. Het ruimtebegrip in de architectuur moet niet zozeer meer in overeenstemming komen met de relativiteitstheorieën maar moet de twee grote 'eeuwige' ruimteopvattingen tot een synthese brengen. De overwelling en het samenvoegen van grote stenen, de stereotomie is de ene traditie die onder meer de Romeinse architectuur bepaalt. De andere is de traditie van het timmeren en de omzetting daarvan in steun en last zoals dat een hoogtepunt bij de Grieken krijgt, de tektoniek. Daarmee

knoopt Giedion impliciet dus weer aan bij de negentiende-eeuwse Franse en Duitse theorie en de onderscheiden oorsprongen van de grot en de hut.

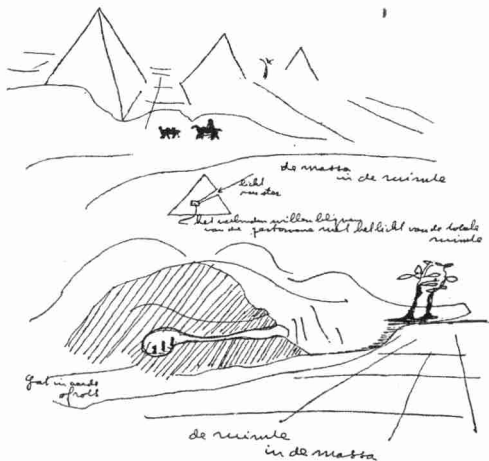
Een extreem ander uiterste zien we bij Mies van der Rohe. Vanaf zijn eerste glazen torens die hij op De Stijl-expositie in 1923 in Parijs toonde, tot aan zijn laatste ontwerpen, lijkt hij gefascineerd door het thema van de transparantie. Het contact met de oneindige ruimte en de volledige doordringbaarheid van het interieur is voor hem en veel van zijn leerlingen zelfs een morele kwestie geworden. Dit komt het fraaist tot uiting in de langdurige aarzeling tot bouwen van het weekendhuis voor Edith Farnsworth (1946-'51). Hij bracht met haar op de locatie in vele jaren vele uren door zonder tot een definitief ontwerp te kunnen komen. Het uiteindelijke ontwerp lijkt het contact met de grond te willen vermijden en schijnt onder de bomen en in het landschap op te lossen. Hier lijkt het onderkomen nog minder dan bij de allereenvoudigste tent tussen de mens en de omringende ruimte te staan. De vraag is alleen wie die doorlopende zichtbaarheid en dat voortdurend contact met de grote ongedeelde ruimte aankan.

Het zoeken naar antwoorden op die vraag bepaalt bijvoorbeeld een groot deel van het werk van Jacob Bakema, beslist niet de meest fijnbesnaarde van de jongeren die in opstand kwam tegen de generatie van Le Corbusier en Mies van der Rohe. In zijn razend populaire televisieoptredens in 1969 was dat goed te zien. Zijn verhaal over het wezen van de architectuur *Van stoel tot stad, een verhaal over mensen en ruimte* begint met een hut als uitholling in de grond en eenvoudige overdekking (zie *afbeelding 6*) maar zo snel mogelijk presenteert hij een tweede 'primitieve hut': "De woning op palen was ook altijd een mogelijkheid om in de natuur te zijn. Hier dus ruimte gevormd in de totale ruimte." (zie *afbeelding 7*).



Afbeelding 6.

De primitieve hut volgens Jacob Bakema 1964.



Afbeelding 7.

Pyramides als massa in de ruimte; de grot als ruimte in de massa. Bakema 1964.

De oude meesters van de moderne architectuur, Le Corbusier, Gropius en vooral Mies van der Rohe, gingen de centrale plaats van het scheppen van ruimte in de loop van hun leven extra benadrukken. De generatie na hen riep steeds vaker onder aanvoering van Aldo van Eyck: "Forms and places are much more important than spaces". Over hoe die 'forms and places' er uit moesten gaan zien, bleek geen overeenstemming meer te verkrijgen. Het lukt dan ook niet een werkelijk alternatief te vinden voor de uiterlijke vormen van de oude moderne architectuur die bij steeds meer mensen steeds meer weerstand oproept. Alleen in Nederland weten onder anderen Bakema, Aldo van Eyck en de jongere Herman Hertzberger in het blad *Forum* (1959-1963) het debat te domineren. Als Aldo van Eyck en Hertzberger het over 'ruimte' hebben dan spreken ze over ruimte als sociaal fenomeen. Er moet een humanere architectuur komen die een humanere samenleving zou kunnen ondersteunen of zelfs bevorderen. Daarbij moet rekening gehouden worden met de psychische behoefte van de mens om zich zowel te laten zien in de openbare ruimte als zich terug te trekken op privé-terrein. Hertzberger noemt dat sinds 1984 in woord en geschrift 'ruimte maken, ruimte laten.'

Op wat grotere afstand van de praktijk probeert Christian Norberg Schulz behalve de sociale wetenschappen ook de filosofie en de geschiedenis weer in zijn theorie te betrekken. Hij weet op een geheel eigen wijze en eigenwijze manier Piagets theorie over ruimtelijke beleving, Gestaltpsychologie en Heideggeriaans verlangen naar vaste en betekenisvolle plaatsen tot een eigenzinnig geheel te maken. Het leidt tot een postuleren van ruimtebegrip dat in verschillende cultuurperioden sterk verschilt: *de existentiële ruimte*. Zowel de meer theoretische werken als een historisch overzichtswerk hebben in de jaren zeventig en ook nog ver in de jaren tachtig van de vorige eeuw zeer veel invloed gehad en hebben dat in steeds verder gereduceerde vorm nog steeds. Begrippen als 'plaats of plek en pad' en 'genius loci' zijn niet meer uit de architectuurdiscussie weg te

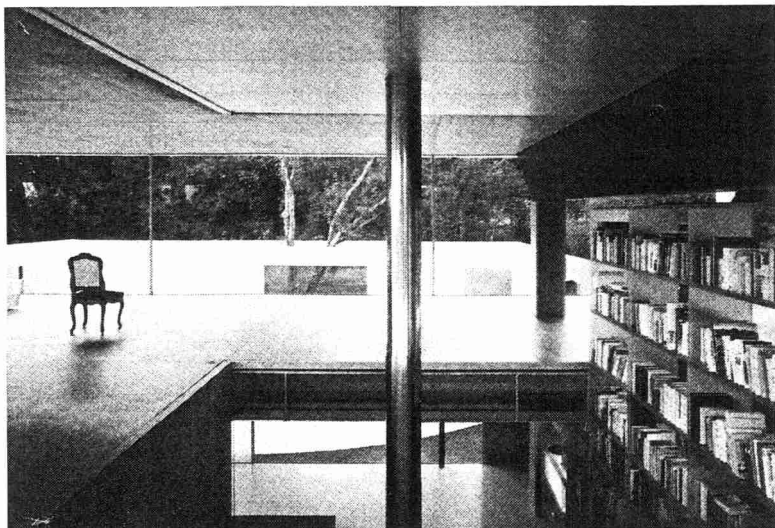
denken. Misschien nog invloedrijker zijn de publicaties van Robert Venturi en Denise Scott Brown, die de basis hebben gelegd voor de postmoderne theorie die met zoveel succes door Charles Jencks in steeds nieuwere versies en voorbeelden naar voren zou worden gebracht. Venturi c.s. hebben vooral invloed gehad door een aantal zeer kernachtige antimoderne uitspraken. Het bekendst is hoe ze op het credo van Mies van der Rohe, 'less is more' antwoorden 'less is a bore'. In dit verband is de uitspraak uit 1972 in *Learning from Las Vegas* 'Perhaps the most tyrannical element in our architecture is space' relevant. Uiteindelijk leidde het er toe dat zowel in de ontwerpen als in de kritieken de (voor)gevel weer belangrijker werd dan de plattegrond. Het doel van moderne architecten om in de ontwerpen een complexe niet-hiërarchische relatie tussen binnen en buiten te maken was van de agenda verdwenen. De discussie over ruimte werd steeds meer verplaatst naar het verloren gaan van de openbare ruimte, dus ook weer voornamelijk het exterieur van gebouwen.

Nederland was vroeg in verzet tegen de uitwassen van de moderne architectuur en stedenbouw en via de wet van de remmende voorsprong heeft de postmoderne architectuur hier weinig voet aan de grond gekregen. Toch is de façade die laat zien wat men wil zijn maar niet toont wat er werkelijk achter gebeurt, zelfs in Nederland vanaf de jaren tachtig steeds vaker toegepast. Een mooi voorbeeld van een gebouw dat buiten teken wil zijn en binnenin een onvermoede zelfs grotachtige ruimte kent is het *Minnaertgebouw* van Neutelings en Riedijk (1993-'98) op De Uithof in Utrecht. Het gebouw wil met een uiterst complex spel afscheid nemen van alle geloofsartikelen van de 'oude moderne architectuur'. Dit is echt weer architectuur als object, als eigen wereld. Hier lijkt nog een serieuze, ten hoogste licht ironische en speelse, poging gedaan te zijn betekenis te verlenen en zelfs een eigen identiteit te maken. Dat was mogelijk door een tegendraadse interpretatie van het programma die de opdrachtgever en de gebruikers hadden

geformuleerd. In het gebouw, waar oorspronkelijk deze lezing gegeven werd, het *Educatorium* (1995-'97), ook op De Uithof, van Rem Koolhaas en Christophe Cornubert, leek zo'n poging bij voorbaat tot mislukken gedoemd. De opdracht betrof een letterlijk identiteitsloos gebouw te maken waar studenten massaal tentamens moeten maken, studenten en andere 'klienten' massaal luisteren naar sprekers en genieten van audiovisuele shows en massaal gaan eten en drinken. Het enige dat Koolhaas en zijn OMA (Office of Metropolitan Architecture) konden doen, was een verzameling van ruimtelijke sensaties scheppen, die zeker niet alleen oogstrelend en gerustmakend bedoeld zijn. Welbehagen en onbehagen worden bewust in snelle afwisseling opgeroepen, zoals in veel, zo niet al het werk van OMA.

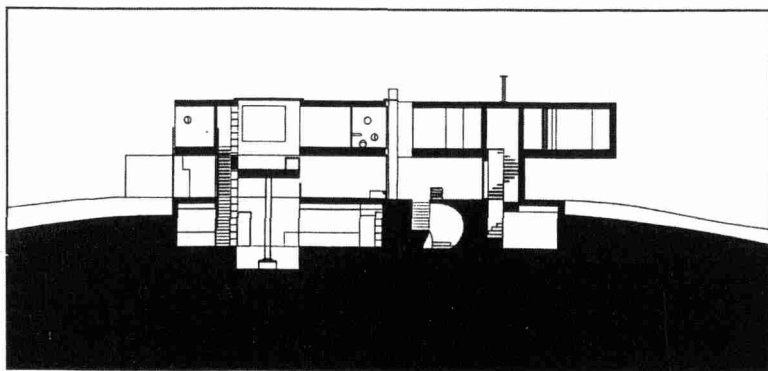
Waar de architectuur van de twintigste eeuw naar helderheid leek te zoeken is nu diffuusheid het streven. De illusie van het thuisvoelen lijkt door zeer veel architecten opgegeven. Koolhaas geeft dat in 1998 in zijn *S, M, L, XL* scherp aan: "According to Derrida we cannot be Whole; according to Baudrillard we cannot be Real; according to Virilio we cannot be There. Exiled to the Virtual World: plot for a horror movie." Niet voor niets heeft zelfs de belangrijkste theoreticus van de voormalige postmodernisten, Anthony Vidler, een boek over *'Architecture and the Uncanny'* met begrippen als 'dislocating space' en 'unhomoely' geschreven en niet voor niets spelen ontwerpen en uitspraken van Koolhaas een belangrijke rol in dit boek. Volgens Koolhaas zelf heeft de ontremde en oncontroleerbare verstedelijking kennelijk geen architecten meer nodig en kan architectuur niet of nauwelijks meer een plaatsje veroveren in de wereld van steeds heviger impulsen en kunstmatiger emoties. Het is dan ook tekenend dat de internationale toparchitecten elkaar spreken op conferenties die in het teken van de willekeur staan (ANYhow; ANYtime; ANYwhere). Architectuur als gebouwd object als specifieke en naar permanentie strevende ruimtelijke ordening lijkt voorbij.

Enerzijds is een gebouw nog niet opgeleverd of de beelden zijn al geheel los van de context in de glossy magazines over de hele wereld gegaan. Anderzijds is door de verregaande automatisering en digitalisering van het ontwerpproces de bouw eerder een willekeurig stollingsmoment uit een denkbaar vrijwel on-eindige reeks. Zulke reeksen zijn ook op vele plaatsen al als virtuele realiteit te bewonderen, maar zelfs hier hebben de architecten niet meer het monopolie. Alle vormen en materialen staan de ontwerpers vrijwel ogenblikkelijk ter beschikking en dus is er de angst voor de panische leegte en vormloosheid op de achtergrond aanwezig. Dat is misschien ook wel een verklaring voor de cultstatus van toparchitecten als Rem Koolhaas. Het lukt hen toch iedere keer weer — en vaak nog beter dan kunst, mode, film, muziek en videoclip en -spelen — om met hun optreden en soms zelfs met hun gebouwen onze aandacht vast te houden. Ondanks of misschien zelfs wel gestimuleerd door zijn in theorie beleden geloof in het einde van de traditie van de Europese avant-gardes lukt het Koolhaas uit de brokstukken ervan een eigentijdse en fascinerende compositie te maken, die zijn eigen ongelijk althans voor iemand in zijn positie en in een aantal gevallen bewijst.



Afbeelding 8.

De gapende leegte in de Villa bij Bordeaux ontworpen door Rem Koolhaas, c.s. (Foto Archis 1999).



Langsdoorsnede / longitudinal section.

Afbeelding 9.

Doorsnede met links van het midden het liftplatform en rechts de grotachtige toegang voor de 'valide bezoekers'

Daarbij is het ook opvallend dat in zijn publicaties Koolhaas pas echt geboeid raakt wanneer de schaal als 'Large' of 'Extra Large' omschreven kan worden, maar zijn invloed op architecten vaak juist verloopt via prachtige foto's van gebouwen, zoals een reeks villa's die 'Small' of ten hoogste 'Medium' genoemd kunnen worden. Zo zijn er laaiend enthousiaste kritieken verschenen over een villa op een heuvel boven de rivier tegenover Bordeaux. In de eigenzinnige stapeling van moeilijk te combineren verdiepingen lezen sommige critici een stapeling van de archetypen van de architectuur. Half in de heuvel ingegraven komt men binnen in een grotachtige ruimte, de verdiepingen daarop zijn tektonisch van karakter en zouden kunnen verwijzen naar de hut of de tempel en de bovenste verdieping is deels open en flexibel en lijkt uit membranen te bestaan en zou naar 'de tent' kunnen verwijzen. Misschien nog wel boeiender aan dit gebouw is het aanvankelijke onvermogen van Koolhaas en zijn medewerkers om tot een voor henzelf en opdrachtgever aanvaardbaar ontwerp te komen. Dat kwam niet door de 'genius loci' van dit prachtige bouwterrein. Het kwam door de volledige vrijheid. Er waren geen aparte wensen van de opdrachtgever en er was ook geen sprake van financiële beperkingen. De opdracht kwam pas in een stroomversnelling door invaliditeit van de opdrachtgever. Na een verkeersongeluk kon hij zich nauwelijks meer bewegen en moest zich in een rolstoel verplaatsen. Kern van het huis werd toen letterlijk leegte. Op alle vloeren kan men in een gapend gat van anderhalf bij een meter vallen, terwijl men soms ook tot aan de hemel door het gebouw heen kan kijken. Alleen het liftplateau van een invalide, dat ook zijn werkkamer/bureau vormt, kan de gapende leegte vullen en kan vloer en plafond voltooien. Door deze ingreep zijn alle 'valide mensen' invalide gemaakt en kan alleen de 'invalide' normaal functioneren (zie *afbeeldingen 8 en 9*). Ook hier is 'time' wezenlijk en is de architectuur in de kern dynamisch. De gapende leegte, 'the void', zou een betere term dan 'space' zijn als thema voor deze architectuur, die niet de belofte

voor een nieuwe stroming wil inhouden. Het succes komt juist door het unieke verhaal en de unieke compositie.

Of er ooit ruimte voor architectuur zal komen om bij te dragen aan het meer permanent vullen van de fundamentele leegte en zinloosheid van het huidige bestaan van de overgrote meerderheid van de mensheid is de vraag. De mens vlucht in steeds sneller van vorm en inhoud wisselende ruimten en steeds vaker blijkt architectuur niet anders dan mode en design en een tijdelijk middel om een tijdelijke identiteit aan te nemen. We zijn nomaden geworden die misschien zelfs geen tent meer nodig hebben en weten dat zelfs de sterrenhemel een illusie, een tijdelijke projectie van een alweer veranderde ruimte en een collage van verleden tijden, is.

Literatuur

Forty, Adrian. *Words and Buildings. A Vocabulary of Modern Architecture*. Thames & Hudson, London 2000. Chapter 'Space'. p. 256-275.

Giedion, Sigfried. *Time, Space, Architecture, the Growth of a New Tradition*. Cambridge Mass. 1941. Herz. drukken in Duits en Engels nog leverbaar.

Heynen, Hilde; André Loekx; Lieven De Cauter; Karina Van Herck (red.) *Dat is architectuur. Sleutelteksten uit de twintigste eeuw*. Rotterdam, 010, 2001. 'De ontdekking van de ruimte'. p. 782 – 789.

Norberg Schulz, Christian. *Existence, Space, Time, Architecture*. Praeger, London/New York 1971.

Risselada, Max (red.) *Raumplan versus Plan Libre*. Delftse Universitaire Pers, Delft 1987.

Roth, Leland M. *Understanding Architecture. Its Elements, History, and Meaning*. Harper, New York 1992, e.l. Chapter "'Delight": Space in Architecture'.

Ven, Cornelis van der. *Space in Architecture. The Evolution of a New Idea in the Theory and History of the Modern Movement*. Van Gorcum, Assen 1978.

De virtuele ruimte

Computergames: interface van de eenentwintigste eeuw¹

Joost Raessens

Inleiding

Momenteel — aan het begin van de eenentwintigste eeuw — leven we in toenemende mate in een digitale cultuur, een cultuur waarin we wat betreft onze behoefte aan informatie, communicatie en amusement steeds meer aangewezen (zullen) zijn op virtuele ruimten zoals die in 'de digitale, zogenaamde 'nieuwe' media vorm krijgen. Verwijzend naar computergames definieert Michael Heim de virtuele ruimte als een ruimte "that is real in effect but not in fact" (1993, 109). Het is met andere woorden een ruimte die niet feitelijk is maar digitaal geproduceerd en die effecten heeft vergelijkbaar met die van de fysische ruimte waarin we ons normaal gesproken bevinden.

Het zijn met name interface- en interaction-designers die deze virtuele ruimte vormgeven. In zijn analyse van computergames als *Doom* (Id, 1993) en *Quake* (Id, 1996) stelt Steven Johnson dat "interface design probably comes closest to architecture" (1997, 72) omdat ruimten ontworpen worden waar de gebruiker-

¹ Deze bijdrage is een bewerking van drie lezingen gehouden in het kader van Studium Generale: 'Virtueel reizen. Van panorama tot virtual reality' (SG-KUN, 1997), 'Videogames: interface van de 21e eeuw' (SG-UU, 1999) en 'De virtuele ruimte' (SG-UU, 2000).

speler doorheen moet navigeren om de gestelde doelen te realiseren. Hierbij laten vormgevers zich inspireren door ontwikkelingen op het gebied van computergames: "De *kids* van nu zullen een groot deel van hun volwassen leven in een 3D-omgeving doorbrengen, om te werken, te vergaderen, te leren, uit te gaan of te spelen. Dat hebben zij in niet geringe mate te danken — of te wijten — aan *Doom*".²

Elke interface is te beschouwen als een medium omdat het mediaert tussen de toeschouwer-gebruiker en de informatie die via dat medium in een specifieke vormgeving wordt aangeboden: "The interface serves as a kind of translator, mediating between the two parties, making one sensible to the other" (Johnson, 1997, 14). Vanuit het perspectief van het gezichtsvermogen (de blik) bespreek ik drie kenmerken van de computergame-interface, kenmerken die respectievelijk in de negentiende, twintigste en eenentwintigste eeuw (verder) tot ontwikkeling zijn gekomen. Allereerst zorgt een interface per definitie voor een *virtualisering* van de blik omdat onze blik niet de werkelijkheid maar beelden van de werkelijkheid waarneemt.³ De gebruikelijke visuele informatie wordt hier vervangen door informatie weergegeven in de vorm van beelden, denk bijvoorbeeld aan het statische beeld van het panorama in de negentiende eeuw. Met de komst van de film vond er vervolgens een mobilisering van de blik plaats. De *virtuele* beelden zijn dan niet meer vast, zoals in het panorama, maar volop in beweging. Ten slotte vindt er met de komst van verschillende vormen van VR (*virtual reality*, waaronder de computergame) een — wat je zou

². Zie *VPRO-gids* nr. 5, 30 januari t/m 5 februari 1999.

³. Ik onderscheid dan ook twee bepalingen van 'virtualiteit' en 'virtuele ruimte', een beperkte en een ruime. De beperkte verwijst naar het domein van het digitale (cf. Heim), de ruime — in deze bijdrage door mij gecursiveerd — verwijst naar een definitie van Anne Friedberg: "The *virtual gaze* is not a direct perception but a *received* perception mediated through representation" (1993, 2).

kunnen noemen — 'interactivisering' van de blik plaats. Met de *virtuele*, mobiele beelden kunnen we dan in interactie treden.

19e eeuw: panorama	20e eeuw: film	21e eeuw: computergame
+ <i>virtualiteit</i>	<i>virtualiteit</i>	virtualiteit
	+ mobiliteit	mobiliteit
		+ interactiviteit

Voordat ik aan de hand van de computergame — voor veel mensen de eerste kennismaking met de virtuele ruimte — een sprong in de eenentwintigste eeuw maak, ga ik bij wijze van aanloop twee stappen terug in de tijd. Ik zet in een kort historisch-vergelijkend perspectief de virtuele ruimte van de computergame af tegen de ruimten van twee andere onderdompelende media, te weten het panorama als interface van de negentiende eeuw en de film als interface van de twintigste eeuw.⁴

⁴ Lev Manovich (1998, 27-29) reconstrueert deze geschiedenis als volgt: van het klassieke scherm (statisch beeld van schilderij), via het dynamische scherm (bewegend beeld van film, televisie en video) naar de verdwijning van het scherm (VR) en van het enkelvoudige scherm (window interface). Omdat ik in deze bijdrage de onderdompeling centraal stel, ga ik van het panorama (statisch beeld van onderdompelend schilderij), via het dynamische scherm van de film (meer onderdompelend dan televisie en video) naar het interactieve scherm van de computergame (in meer of mindere mate onderdompelende vorm van VR). Voor een uitvoerige bespreking van de relatie tussen film en computergames, zie Raessens 2001a. Deze reconstructie betekent overigens niet dat de geschiedenis zich langs een enkelvoudige lijn voltrekt, maar dat er "meerdere rivaliserende zintuiglijkheidsregimes" (Kockelkoren, 2001, 27) naast elkaar kunnen bestaan die afwisselend dominant zijn.

1. Interface van de negentiende eeuw: het panorama

Het panorama is een cilindervormig schilderij dat de toeschouwer een impressie wil geven van de werkelijkheid, een impressie die gebaseerd is op de wil te ontkennen een schilderij te zijn. Dit realiseert het panorama door middel van een aantal kunstgrepen, onder andere door de boven- en onderkant van het schilderij en het glazen dak waardoor het daglicht binnenvalt aan het oog te onttrekken en door het *faux terrain* dat zorgt voor een vloeiende overgang van het platform, waarop de toeschouwer zich bevindt, naar de voorstelling op het doek.

Het panorama werd uitgevonden op het einde van de achttiende eeuw, kende zijn bloeitijd in de negentiende eeuw en stelde de toeschouwer in staat fysieke of landschappelijke ruimten van het heden of verleden te exploreren.⁵ Het Panorama Mesdag in Den Haag bijvoorbeeld, met het 1680 m² grote doek dat werd geschilderd door een team onder leiding van Hendrik Willem Mesdag, opende in 1881 en geeft een beeld van het negentiende-eeuwse Scheveningen. Omdat er in de loop van de negentiende eeuw honderden panorama's geschilderd zijn wordt het panorama met recht het eerste visuele massamedium genoemd. In zekere zin kan het panorama zelfs een vroeg voorbeeld van onderdompelende VR genoemd worden: "In het Panorama ga je naar binnen om naar buiten te kijken. Daar, in die ruimte waar het daglicht schijnt zonder dat je kunt zien waar het vandaan komt, ontwaar je een nieuwe, andere werkelijkheid. Daarmee is een panorama een vroeg voorbeeld van virtual reality" (Van Eekelen, 1996, 183).

⁵. De Ierse schilder Robert Barker (1739-1806) patenteerde in 1787 zijn vondst: het 'panorama' ofwel 'alzicht'. "Panorama's brachten bij uitstek de dromen voor de stadsmens, die graag het gevoel wilde hebben midden in de veldslag te staan, een reis te maken naar onbekende verten of getuige te zijn van een bijbelscène" (Van Eekelen, 1996, 11).

Maar hoe overweldigend de realiteitsimpressie van het panorama ook is, het blijft uiteindelijk een statische impressie. De beweging, zo kenmerkend voor de werkelijkheid, is op het doek namelijk tot stilstand gekomen. In de loop van de negentiende eeuw verbleekte dan ook langzamerhand de sensatie van het panorama.⁶ En zoals het einde van de achttiende eeuw het panorama aankondigde, zo kondigde het einde van de negentiende eeuw de opvolger aan van het panorama: de film. Deze overgang van panorama naar film is te beschouwen als de komst van "a mobilized 'virtual' gaze" (Friedberg, 1993, 2) en te verduidelijken met een verwijzing naar het *Manifest van het futurisme* verschenen in 1909. Filippo Tomaso Marinetti zet hierin de "peinzende onbeweeglijkheid" (ik voeg toe: van het panorama) tegenover de "koortsachtige slapeloosheid" (ik voeg toe: van de film) (Marinetti, 1909, 67). De realiteitsimpressie van de film bleek veel beter dan die van het panorama aan te sluiten bij het chaotische, gefragmenteerde karakter van de moderne tijd. Of zoals Walter Benjamin het formuleerde: "Toen kwam de film, die deze kerkerwereld met het dynamiet van tienden van seconden heeft opgeblazen" (Benjamin, 1955, 34). Met de komst

⁶. "De exploitatiemaatschappij van Mesdags schepping (...) was vijf jaar na de opening ook op dat punt [van faillissement, JR] aangeland" (Van Eekelen, 1996, 6). Momenteel zien we het idee van het panorama weer terugkeren bij het zogenaamde 'virtual reality panorama', zie <http://www.virtualvision.nl/panorama.html>: "De ervaring van een Virtual Reality panorama is het beste te omschrijven als een 'Panorama Mesdag' op de computer. De gebruiker 'staat' op een vaste locatie in een virtuele ruimte en kan vervolgens zelf navigeren in het VR panorama; 360 graden rondkijken, inzoomen en uitzoomen. De besturing van het panorama gebeurt met de muis of het toetsenbord; de gebruiker heeft dus zelf de complete controle over hetgeen dat hij wil bekijken."

van onder andere geluid, kleur, wide-screen, Imax en 3-D werd deze realiteitsimpresie verder versterkt (Wollen, 1993).⁷

2. Interface van de twintigste eeuw: de film

Wanneer we de filmgeschiedenis beschouwen vanuit het perspectief van de exploratie van de ruimten die voor de twintigste en eenentwintigste-eeuwse mens van belang zijn geweest, zijn en zullen zijn, kunnen we drie vormen van *virtuele* ruimte onderscheiden. Niet alleen fysische ruimten, zoals we gezien hebben bij het panorama, ook geestelijke en virtuele ruimten worden in de film gerepresenteerd.⁸ Zo poogt bijvoorbeeld de digitale film, het corpus van films dat met behulp van digitale technologie gemaakt is en/of deze digitale technologie als centrale thematiek van de film presenteert, de fysische, geestelijke en virtuele ruimte zo optimaal mogelijk aanwezig te stellen.

fysische ruimte		<i>The Idiots</i> (Von Trier, 1998)
Geestelijke ruimte		<i>Naar de klote!</i> (Kerkhof, 1996)
virtuele ruimte(n)	enkelvoudig	<i>The Lawnmower Man</i> (Leonard, 1992)
	parallel	<i>The Matrix</i> (Wachowski, 1999), <i>eXistenZ</i> (Cronenberg, 1999) en <i>Avalon</i> (Oshii, 2002)

⁷. Aan het begin van de jaren vijftig werd wide-screen als volgt aangeprezen: "You won't be gazing at a movie screen — you'll find yourself swept right into the picture, surrounded by sight and sound". Erkki Huhtamo spreekt in dit verband verder over "the quest for immersion" (1995, 160).

⁸. Met betrekking tot de beeldende kunsten onderscheidt ook Jos de Mul (1994) de exploratie van deze drie ruimten, te weten de fysische (46), de geestelijke of innerlijke (47) en de virtuele ruimte (48).

2.1 Fysische ruimte

De exploratie van de fysische ruimte zien we bijvoorbeeld in vroege reisfilms waarin, in meer of minder positieve zin, beelden getoond worden van verre, vreemde landen. Zo wordt in de Amerikaanse antireisfilm *The European Rest Cure* (Porter, 1904) niet alleen een beeld geschetst van een Europese *grand tour*, ook wordt deze *virtuele*, cinematografische reis als minder gevaarlijk en heilzamer voorgesteld dan het daadwerkelijke bezoek.⁹ Behalve dat de film een beeld gaf van onbekende ver-ten, maakte ze ook de ruimten die normaalgesproken alleen toegankelijk zijn met de telescoop en de microscoop voor de filmtoeschouwer voorstelbaar. Niet alleen zien we in de film een verbeelding van verre planeten (*Le voyage dans la lune*, Méliès, 1902; *Contact*, Zemeckis, 1997), ook de inwendigheid van het menselijke lichaam wordt gerepresenteerd (*Fantastic Voyage*, Fleischer, 1966). De vraag dringt zich op in hoeverre de film hiermee, overeenkomstig de fotografie, "het ideale 'wapen' vormt in de strijd van de moderniteit om de gehele werkelijkheid te veroveren. De fotografie maakt de gehele werkelijkheid, van het microscopisch kleine tot het telescopisch grote, zichtbaar, legt haar vast en maakt haar hanteerbaar" (De Mul, 1995, 18).¹⁰

In het werk van de regisseurs Lars von Trier (*The Idiots*, 1998) en Thomas Vinterberg (*Festen*, 1998) wordt gestreefd naar het op zo authentiek mogelijke wijze in beeld brengen van de fysische

⁹. Zie Friedberg, 1993, 97-100. Overeenkomstig de analyse van Friedberg zou je de exploratie van de ruimten in het panorama, de film en de computergame kunnen beschouwen als een vorm van *virtueel* toerisme: "YES! I want to travel the world from the comfort of my own home" (idem, 250).

¹⁰. Overigens kan de film, net als de computergame, zich ook als opdracht stellen "de door de computertechnologie ontsloten virtuele werkelijkheid zichtbaar te maken" (De Mul, 1995, 19), zie verder 2.3.

werkelijkheid, de werkelijkheid zoals die om ons heen bestaat. In het door deze regisseurs uitgegeven manifest *Dogma 95* wordt dit streven verwoord.¹¹ Zij verzetten zich tegen de stroom van technologische films waarin de werkelijkheid als het ware achter de 'special effects' verdwijnt. In hun films proberen Von Trier en Vinterberg daarentegen deze werkelijkheid te laten zien, daarbij gebruikmakend van filmconventies die bij de toeschouwer een realiteitseffect teweegbrengen. Hiervoor hebben ze zich in 'De eed van zuiverheid' verplicht een tiental regels te respecteren, zoals het filmen op locatie, het afwijzen van kunstmatige belichting, van optische effecten en van het toevoegen van decors en rekwisieten, en het gebruik van een handheld digitale videocamera die het mogelijk maakt om op haast documentaire wijze deze fysische werkelijkheid vast te leggen.¹²

2.2 Geestelijke ruimte

De ontsluiting van de geestelijke, innerlijke ruimte van de mens is te beschouwen als de volgende fase. Volgens de Franse filosoof Gilles Deleuze is een belangrijk kenmerk van de film haar gerichtheid op subjectieve fenomenen als "geheugenverlies, hypnose, hallucinatie, geestesverwarring, de visie van sterven, en vooral nachtmerrie en droom" (1985, 75). Denk in dit verband bijvoorbeeld aan *Blue Velvet* (Lynch, 1986) waarin de toeschouwer samen met het hoofdpersonage Jeffrey Beaumont een reis onderneemt naar de innerlijke ruimte van het verlangen, zoals Orpheus de onderwereld binnenging. Lynch heeft de overgang naar en terugkeer uit deze innerlijke ruimte letterlijk verbeeld door Beaumont aan het begin van de film een oor in close-up te laten binnengaan om pas op het einde van de film

¹¹ Zie <http://www.filmkrant.nl/av/org/filmkran/archief/fk192/dogma.html>.

¹² Denk trouwens ook aan het succes van *The Blair Witch Project* (Myrick, 1999), wiens documentaire kracht voor een belangrijk deel gebaseerd is op de op 16 mm en High-8 video gedraaide beelden.

via een camerabeweging Beaumonts oor in close-up weer te verlaten.¹³

Net zoals de Dogma 95-regisseurs maakt Ian Kerkhof uitvoerig gebruik van de beweeglijkheid van de digitale videocamera, maar dan met een heel ander doel. Niet de fysische werkelijkheid moet worden vastgelegd, maar de psychische, geestelijke of innerlijke werkelijkheid zoals die zich in specifieke situaties aan de filmpersonages voordoet. Denk aan de ervaring van pillen en housemuziek (*Naar de klote!*, 1996) en seks en geweld (*Shabondama Elegy*, 1999). Om deze psychische ervaring te verbeelden worden, behalve de beweeglijke digitale videocamera, ook allerlei optische effecten ingezet die in het Dogma 95-manifest juist verboden waren.

2.3 Virtuele ruimte

In veel hedendaagse Hollywood-films wordt gepoogd de zogenaamde virtuele werkelijkheid, cyberspace ofwel door de computer gegenereerde ruimten, te verbeelden en te exploreren. Denk aan een film als *The Lawnmower Man* (Leonard, 1992) die opent met de volgende tekst: "Rond het jaar 2000 zal de techniek Virtuele Realiteit wijdverbreid zijn. Hiermee kunnen door computers geschapen kunstmatige werelden worden betreden die even onbegrensd zijn als de verbeelding zelf. De bedenkers voorzien miljoenen positieve toepassingen — terwijl anderen vrezen voor een nieuwe vorm van gedachtebeheersing...".¹⁴ De gebruikers van het VR-systeem in deze film worden ondergedompeld in een virtuele wereld waarin ze zich kunnen

13. Voor een uitvoerige bespreking van *Blue Velvet* vanuit het perspectief van de Franse psychoanalyticus Félix Guattari, zie Raessens, 1998, 107-114 en 2001b, 123-132.

14. Voor een bespreking van deze film, zie Heim, 1993, 143-146.

verplaatsen en waarmee ze in interactie kunnen treden om zo transformaties te bewerkstelligen.¹⁵

De specificiteit van de virtuele ruimte zoals die in deze films gerepresenteerd wordt, is te karakteriseren als de derde en laatste fase van de ontwikkeling van de relatie tussen beeld en werkelijkheid zoals geschetst door Jean Baudrillard. Baudrillard onderscheidt in deze relatie drie fasen. In de eerste fase representeert een medium de werkelijkheid: "eerst is er een werkelijkheid en daarna komt de informatie over die werkelijkheid. Het medium werkt dan letterlijk als medium, als transcriptie van de werkelijkheid". De tweede fase is "een tussenvorm die ook door Benjamin beschreven wordt, waarin de dingen niet éerst geproduceerd en daarna gereproduceerd worden, maar waar de dingen onmiddellijk met het oog op de reproductie worden gemaakt". In de derde en laatste fase "verdwijnt iedere verwijzing naar de werkelijkheid. In dat geval zijn de media geen reproductiemiddel van de werkelijkheid meer, maar een verdwijningvorm van de werkelijkheid" (Lutz, 1983-1984, 9).

Een nieuwe ontwikkeling wordt ingezet met films als *The Thirteenth Floor* (Rusnak, 1999), *The Matrix* (Wachowski, 1999), *eXistenZ* (Cronenberg, 1999) en *Avalon* (Oshii, 2001).¹⁶ In deze films wordt niet een 'meer aan werkelijkheid' gerealiseerd — te weten een optimale weergave van respectievelijk de fysische, geestelijke en virtuele werkelijkheid — maar worden 'meerdere, parallelle werkelijkheden' gerepresenteerd. De ruimte zoals die door de personages in eerste instantie als werkelijk ervaren wordt, blijkt slechts een van de mogelijke ruimten. Daarbij

¹⁵ Voor een uitwerking van deze kenmerken van VR, zie Heim, 1993, 109-128: 'The Essence of VR' en Murray, 1997, 95-182: 'The Aesthetics of the Medium'. Voor de verbeeldingen van virtual reality in recente sciencefiction-films, zie Smelik, 1999.

¹⁶ Voor een uitvoerige bespreking van *The Matrix* en *eXistenZ*, zie Raessens 2001b, 252-262 en 2001c.

dringt zich de vraag op of het nog mogelijk is om te beslissen welke de 'echte' is.

eXistenZ is in de gelijknamige film de naam van een 'role playing game' ontworpen door Allegra Geller. Om de virtuele ruimte van dit spel binnen te gaan hoeft de speler zich niet met sensoren en een helm uit te rusten om de impressie op te wekken in een andere wereld te vertoeven. Haar spelcomputer is biologisch van aard, je sluit de console niet aan op TV maar logt deze direct in in je biopoort, een gat in je ruggengraat. Via een soort navelstreng ben je dan verbonden met deze gamepod (spelcocon) die prikkels uitzendt die je zenuwstelsel zodanig beïnvloeden dat je overgaat in de realiteit van het spel. Kenmerkend voor dit spel is dat er zowel meerdere spelers tegelijk ingelogd zijn in een specifieke wereld als dat er ruimte is voor allerlei onverwachte interacties en situaties, met andere woorden een spel dat zich grotendeels aanpast aan jouw eigen handelingen, een droom voor elke gamer.

Het bijzondere van deze film is dat zij opgebouwd is uit meerdere levels waarvan de status (schijn of werkelijkheid) niet of nauwelijks te bepalen is, noch door de personages, noch door de toeschouwers. Het eerste level, lange tijd de 'werkelijkheid' binnen de film, begint met een seminar waar eXistenZ getest wordt. Even later zijn spelontwerper Geller en haar lijfwacht Ted Pikul op de vlucht voor een stelletje fanatieke anti-eXistenZialisten die door middel van een fatwa 5 miljoen dollar op het hoofd van Geller gezet hebben, zogenaamde realisten die een einde willen maken aan de wijze waarop het spel de werkelijkheid geweld aandoet. Vanuit dit level loggen Geller en Pikul regelmatig in op twee andere levels, te weten D'Arcy Naders spellenparadijs en een fabriek voor de productie van gamepods, een level waar zich ook het Chinese restaurant bevindt. Op het einde van de film blijkt verrassenderwijze het eerste level niet de werkelijkheid, maar een gamelevel te zijn binnen het spel transCendenZ, ontworpen door Yevgeny Nourish.

Terug in de werkelijkheid van het seminar waar transCendenZ uitgeprobeerd wordt, ontpoppen Geller en Pikul zich uiteindelijk als realisten die, terwijl zij Nourish vermoorden, uitroepen: "Moet de beste spelontwerper niet worden gestraft voor het genadeloos vervormen van de realiteit?" Echter ook de status van dit werkelijkheidsniveau wordt op het einde van de film weer ondermijnd wanneer de Chinese man die door Geller en Pikul vermoord dreigt te worden zich afvraagt: "Vertel me eerlijk... Zijn we nog in het spel?"

3. Interface van de eenentwintigste eeuw: de computer-game

Met betrekking tot de computergame kunnen we drie verschillende vormen van VR onderscheiden die, met name dankzij de interactiviteit, in meer of mindere mate de ervaring van het scherm laten verdwijnen: desktop-VR, online-VR en onderdompelende VR (De Valck, 1998). Onder desktop-VR verstaan we de computergames die individueel (singleplayer) of met meerderen (multiplayer) gespeeld worden achter de PC of voor de TV, terwijl online-VR een gezamenlijk spelen mogelijk maakt via LAN's (Local Area Networks) of via het Internet. Deze online-mogelijkheid zien we momenteel niet alleen bij computergames als *Unreal Tournament* (GT Interactive, 1999) en *Quake 3 Arena* (Id, 1999), maar ook in MUDs als *Ultima Online* (Electronic Arts, 1997) en *TrekMuse* (1990). De meest overtuigende vorm van onderdompelende VR ten slotte zien we bijvoorbeeld gerealiseerd in de magic carpet ride van *Aladdin* in Walt Disney World (Murray, 1997, 49-50) en in de CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) waar via projectie van bewegende beelden driedimensionale virtuele werelden, waaronder die van *Tomb Raider* (Eidos, 1996) en *Quake*, kunnen worden gesimuleerd.

Deze vormen van VR kunnen in algemene zin omschreven worden als "a three-dimensional, computer generated, simulated

environment that is rendered in real time according to the behaviour of the user" (Loeffler en Anderson, 1994, xi). De VR-ervaring heeft drie belangrijke kenmerken. Allereerst de onderdompeling. Ondergedompeld in een VR-omgeving voelt de gebruiker zich opgenomen in een andere realiteit. Deze onderdompeling is niet specifiek voor VR, we zien haar tenslotte ook terug bij het panorama en de film. Wel specifiek zijn de navigatie en de interactie (Wolf, 2001, 51): de speler van computergames als *Doom* en *Quake* kan zich in de rol van personage niet alleen zelfstandig voortbewegen in de virtuele ruimte, maar ook met deze virtuele ruimte in interactie treden, dit wil zeggen invloed uitoefenen op de objecten die zich bevinden in deze ruimte. Van belang is het om twee vormen van interactie te onderscheiden: explorerende en constructieve interactiviteit. In de explorerende vorm kan de speler slechts kiezen uit de spelmogelijkheden die door de maker van het spel ontworpen zijn, terwijl in de constructieve vorm elementen gewijzigd, verwijderd of toegevoegd kunnen worden. Daar waar de exploratie zowel bij een cd-rom als het WWW mogelijk is, is de constructie alleen bij deze laatste mogelijk. Bij het al eerder genoemde spel *TrekMuse* kan de gamer vanuit bepaalde uitgangspunten de *Star Trek*-verhalen mede vormgeven (Murray, 1997, 86 en Murray en Jenkins, 1999, 52-56), terwijl hij in spellen als *Doom* en *Quake* eigen spellevels kan creëren. Computergames zijn dan ook exemplarisch voor media die we in meer (constructie) of mindere (exploratie) mate 'participerend' kunnen noemen.

panorama, film en computergame	onderdompeling	
computergame	navigatie	
	interactie	exploratie
		constructie

Back to reality...

Wanneer je deze historische reconstructie van het panorama, de film en de computergame bekijkt, zie je de wijze waarop de realiteitsimpresie van de vormgegeven ruimten veranderd is: van de *virtuele* ruimte van de negentiende eeuw (panorama), via de *virtuele én mobiele* ruimte van de twintigste eeuw (film) zijn we gegaan naar de *virtuele, mobiele én interactieve* ruimte van de eenentwintigste eeuw (computergame). Deze geschiedenis staat grotendeels in het teken van de 'transparante onmiddellijkheid', een door Bolter en Grusin (1999) gehanteerde term waarmee zij verwijzen naar het streven van media hun aanwezigheid zoveel mogelijk te ontkennen. Dat hieraan op het gebied van de computergame veel belang gehecht wordt, zien we op exemplarische wijze terug op de verpakking en gebruiksaanwijzing van *Myst* (Brøderbund, 1993): "Experience a first-person point of view with no distracting controls or windows" en "The entire game was designed with little or no extraneous distractions on the screen to interfere with your feeling of being in another world".

Naast deze 'transparante onmiddellijkheid' kunnen we echter ook de 'hypermedialiteit' onderscheiden, een term van Bolter en Grusin waarmee de fascinatie voor de media zelf tot uitdrukking gebracht wordt. Dat digitale media van deze fascinatie getuigen en toch een specifieke realiteitsimpresie realiseren, is gelegen in onze hedendaagse verhouding tot digitale technologie: "Technology is gradually becoming a second nature, a territory both external and internalized, and an object of desire. There is no need to make it transparent any longer, simply because it is not felt to be in contradiction to the 'authenticity' of the experience" (Bolter en Grusin, 1999, 42 en Huhtamo, 1995, 171). We zien deze ontwikkeling bijvoorbeeld terug in computergames waarin de 'controls or windows' gewoon zichtbaar in beeld zijn en niet (langer) als afleidend ervaren worden en in de combinatie van gesimuleerde webcam-opnamen, persoonlijke

e-mails en telefonische berichten van de interactieve websoap *Online Caroline*.¹⁷[17]

De voorlopig laatste stap wordt gezet in games als de *Nokia Game* - een hypermediale 'all media experience' — waarin niet langer de virtuele ruimte maar een balans tussen de virtuele én fysieke ruimte centraal staat die Michael Heim als volgt verwoordde: "We must balance the idealist's enthusiasm for computerized life with the need to ground ourselves more deeply in the felt earth affirmed by the realist as our primary reality. This uneasy balance I call 'virtual realism'" (Heim, 1998, 43). Zoals in *The Game* (Fincher, 1997) "zal het spel [*Nokia Game*, JR] je omringen en verschijnen en verdwijnen game clues overall om je heen".¹⁸[18] Niet langer is hier het streven om de virtuele ruimte 'realistisch' ('virtual reality') maar om de fysieke, reële ruimte 'virtueel' te maken, te transformeren in een spelsituatie ('real virtuality'). Een belangrijke ontwikkeling van de (computer)game zou dus paradoxalerwijs wel eens gekarakteriseerd kunnen worden als een 'verdwijningsvorm' van de virtuele ruimte en een terugkeer van de werkelijkheid.

¹⁷ Zie <http://www.onlinecaroline.com>.

¹⁸ Zie <http://www.nokiagame.com/> (officiële website) en <http://www.nokia-game.com/> (fan-website). Zoals we gezien hebben is deze verdwijning van grenzen het centrale thema van *eXistenZ*. Wanneer Geller en Pikul even teruggekeerd zijn naar het eerste level, voeren zij het volgende gesprek: Geller: "Hoe voelt het, je echte leven?" Pikul: "Heel onwerkelijk. Ik weet niet zeker of de plek waar we nu zijn wel werkelijk is. Het lijkt wel een spel. En jij, jij begint op een spelpersonage te lijken".

Literatuur

Benjamin, W. *Het kunstwerk in het tijdperk van zijn technische reproduceerbaarheid* (1955). Nijmegen 1985.

Bolter, J. en R. Grusin. *Remediation. Understanding New Media*. Cambridge/Massachusetts/London 1999.

Deleuze, G. *Cinéma 2 – L'image-temps*. Paris 1985.

Eekelen, Y. van. *Magisch Panorama. Panorama Mesdag, een belevenis in ruimte en tijd*. Zwolle 1996.

Friedberg, A. *Window Shopping: Cinema and the Postmodern*. Berkeley 1993.

Heim, M. *The Metaphysics of Virtual Reality*. New York 1993.

Heim, M. *Virtual Realism*. New York 1998.

Huhtamo, E. 'Encapsulated Bodies in Motion: Simulators and the Quest for Total Immersion'. In: Penny, S. (red.) *Critical Issues in Electronic Media*. New York 1995.

Johnson, S. *Interface Culture. How New Technology Transforms the Way We Create and Communicate*. San Francisco 1997.

Kockelkoren, P. *Techniek: Kunst, Kermis & Theater*, Universiteit Twente 2001.

Loeffler, C.E. en T. Anderson. *The Virtual Reality Casebook*. New York 1994.

Lutz, I. 'Jean Baudrillard, een gesprek'. In: *Skrien* nr. 132-133, 1983-1984.

Manovich, L. 'Towards an Archaeology of the Computer Screen'. In: Elsaesser, T. en K. Hoffmann (red.) *Cinema Futures: Cain, Abel or Cable? The Screen Arts in the Digital Age*. Amsterdam 1998.

Marinetti, F. 'Manifest van het futurisme' (1909). In: Drikkoningen, F. en J. Fontijn (red.) *Historische avantgarde*. Amsterdam 1986.

Mul, J. de. 'De draadloze verbeelding: een virtuele blik in de toekomst van de beeldende kunsten'. In: Zijdeveld, A. (red.) *Kleine geschiedenis van de toekomst*. Kampen 1994 (<http://www.eur.nl/fw/hyper/home.html>).

Mul, J. de. 'Naar een modale fotografie'. In: *FotoNet* nr. 3, 1995.

Mul, J. de (red.) *Filosofie in cyberspace. Reflecties op de informatie- en communicatietechnologie*. Kampen 2002.

Murray, J. *Hamlet on the Holodeck. The Future of Narrative in Cyberspace*, New York 1997.

Murray, J. en H. Jenkins. 'Before the Holodeck: Translating *Star Trek* into Digital Media'. In: Smith, G. (red.) *On a Silver Platter. CD-ROMs and the Promises of a New Technology*. New York 1999.

Raessens, J. 'Filmregisseurs als artsen van de cultuur. Guattari over film en de productie van subjectiviteit'. In: Oosterling, H. en S. Thissen. (red.). *Chaos ex machina. Het ecosofisch werk van Félix Guattari op de kaart gezet*. Centrum voor Filosofie & Kunst (<http://www.eur.nl/fw/cfk/>). Rotterdam 1998.

Raessens, J. 'Cinema and beyond. Film en het proces van digitalisering'. In: *E-View. Journal on Theatre, Film, Television and Digital media* nr. 1, 2001a (<http://comcom.kub.nl/e-view/>) en in Mul, J. de (red.) Kampen 2002.

Raessens, J. *Filosofie en film. Viv@e la différence: Deleuze en de cinematografische moderniteit*. Budel 2001b.

Raessens, J. 'Dit is de toekomst, Pikul'. Van digitale film naar computergames. In: Molendijk, P. en H. Oosterling (red.) *Inter/Akta 3, Hedendaagse Verbeelding. Beeldcultuur en intermedialiteit*. Rotterdam 2001c.

Smelik, A. 'Space out. Verbeeldingen van virtual reality in recente sciencefiction-films'. In: *E-View. Journal on Theatre, Film, Television and Digital media* nr. 2, 1999 (<http://comcom.kub.nl/e-view/>).

Joost Raessens

Valck, M. de. *Playing in Virtual Reality. Scenarios for the Future* (doctoraalscriptie Film- en televisiewetenschap). Utrecht 1998.

Wolf, M. (red.) 'Space in the Video Game'. In: *The Medium of the Video Game*. Austin 2001.

Wollen, T. 'The Bigger the Better: From Cinemascope to IMAX'. In: Hayward, P. en T. Wollen (red.) *Future Visions. New Technologies of The Screen*. London 1993.

De muzikale ruimte

Rudolf Rasch

We zijn het ons doorgaans niet bewust, maar alle muziek die wij horen, is om gehoord te kunnen worden afhankelijk van de ruimte om ons heen. Het gaat daarbij niet om de virtuele, noch om de kosmologische of subatomaire ruimte, maar om de met lucht gevulde ruimten tussen vier muren, een vloer en een plafond, waarin muziek klinkt, of over de eveneens met lucht gevulde ruimte waardoorheen wij ons buitenshuis begeven.

Muziek is — overigens net als spraak — geluid dat op een bepaalde manier is gestructureerd; geluid bestaat uit trillingen, zodat ook muziek uit trillingen bestaat. Laten we voorlopig maar uitgaan van luchtrillingen. Deze trillingen worden door de lucht in de ruimte om ons heen naar onze oren getransporteerd. Om de bedoelde muziek als zodanig te kunnen horen, is het nodig dat tijdens dit transport de structuur van het gebodene behouden blijft, dit ondanks het gegeven dat de ruimte waardoor het geluid reist een geweldige invloed heeft op het getransporteerde artikel.

Er zijn dus bij de muzikale communicatieketen drie elementen in het spel: (1) de productie van muzikaal geluid, (2) het transport ervan en (3) de ontvangst. Hoe variabel, dat wil zeggen, hoe beïnvloedbaar of manipuleerbaar zijn deze elementen om een optimaal samenspel te verkrijgen? Aan de ontvangtzijde,

dat wil zeggen, onze oren, valt niet veel te veranderen: ze zijn zoals ze zijn (al is het zeker niet onzinnig om te speculeren over *waarom* ze zijn zoals ze zijn). De ruimten waarin het transport plaatsvindt, zijn deels wel, deels niet geconstrueerd met het specifieke doel om muziek en/of spraak te laten horen en daarom deels wel, deels niet optimaal of zelfs niet suboptimaal aangepast aan de communicatie van spraak en/of muziek. Die specifieke aanpassing is wel aanwezig waar het gaat om ruimten die doelbewust als concertzalen zijn gebouwd, dan wel als theater- of operazalen of als zalen voor het gesproken woord. Maar vaker dan in die concertzalen zal muziek daarbuiten geklonken hebben, respectievelijk nog klinken. De eigenschappen van concertzalen, en de middelen waarmee zij een muzikale ruimte scheppen, zullen nog aan bod komen. In binnen- en buitenruimten kan via elektronische installaties overigens nog heel wat aan het klinkende geluid worden gesleuteld.

Veruit de meeste manipulatie is mogelijk aan de productiezijde van de muziek: men kan niet alleen zacht of luid musiceren, men kan instrumenten nemen die een zacht ofwel juist een hard geluid produceren, men kan alleen musiceren of men kan met een kleinere of grotere groep mensen tegelijk musiceren. En men kan heel veel verschillende soorten muziek maken, die op steeds andere manieren interacteren met de omgevende ruimte. Sinds een kleine eeuw kan het geproduceerde muzikale geluid met behulp van elektronica tot bijkans elk gewenst volume worden versterkt.

Laten we beginnen om eens te kijken naar het minst variabele element: ons gehoor. Om geluiden, en in het bijzonder muziek, op een prettige en bevredigende manier te kunnen waarnemen, moet allereerst worden voldaan aan de eis dat de luidheid min of meer op een *comfortabel luisterniveau* ligt. Wat is dat, een comfortabel luisterniveau? Het is het geluiddrukkniveau (dat wil zeggen, de fysische sterkte van het geluid) van muziek waarbij

we enerzijds de muziek zonder enige moeite kunnen horen en anderzijds niet als te nadrukkelijk of storend aanwezig ervaren.

De sterkte van geluiden kan het gemakkelijkste worden weergegeven met de logaritmische maat die de naam deciBell of dB heeft meegekregen. De technische en wiskundige afleiding van deze maat hoeft hier niet aan de orde te komen. Het volstaat te zeggen dat de geluiden die wij in onze omgeving tegenkomen doorgaans een sterkte hebben tussen 20 dB en 100 dB. 20 dB is uiterst zacht, 100 dB het gebulder van een vliegtuig of een popgroep op topsterkte. Comfortabel conversatiegeluid bevindt zich ergens rond de 60 dB. Wil men een gesprek op gedempte toon voeren, dan moet men terug naar 50 dB of minder. Voor muziek mogen de niveaus wat hoger liggen, afhankelijk van de muziek en afhankelijk van de mate waarin men in het geluid wil opgaan. Voor klassieke muziek is 60 tot 70 dB plezierig, voor popmuziek zijn het wellicht hogere waarden.

Laten we ons nu op het geluid zelf richten en zien hoe deze niveaus tot stand zouden kunnen komen. Er zijn twee fundamenteel verschillende manieren waarop door geluidbronnen geluidvelden worden opgebouwd.¹

Het vrije veld

De eerste manier treedt op wanneer het door de bron geproduceerde geluid op geen enkele wijze wordt belemmerd, of in ieder geval in het geheel niet wordt teruggekaatst. De conditie

¹ In deze bijdrage is de onder akoestici vigerende gewoonte overgenomen om alle samenstellingen met het woord 'geluid-' zonder verbindings-s aan het tweede lid te verbinden, los van het gegeven of de *Woordenlijst van de Nederlandse taal* of Van Dale die zo geven: geluidbron (en niet: geluidsbron), geluidveld (en niet: geluidsveld), enz. Dit om de onbeslisbare discussie over wel of geen verbindings-s niet te hoeven voeren.

hiervoor noemt men het *vrije veld* en hiervan spreekt men wanneer geluid inderdaad vrij kan wegstromen of wanneer geluid, als het op een object of een oppervlak valt, totaal wordt geabsorbeerd. Het geluid verspreidt zich dus, zolang het niet wordt geabsorbeerd, over een steeds uitdijende bol. Weinig rekenwerk is nodig om tot de slotsom te komen dat de oppervlakte van die bol evenredig toeneemt met het kwadraat van de straal. Dat betekent bij voorbeeld dat bij verdubbeling van de straal de oppervlakte van de bol verviervoudigt. Welke consequenties heeft dat voor de hoorbaarheid van geluiden in vrije veldcondities?

Wanneer het geluid zich verspreidt over een steeds in oppervlakte toenemende bol, wordt de energie van het geluid evenzeer verspreid. De straal van de bol vertaalt zich in een luistersituatie in de afstand van de luisteraar tot de geluidbron. De rekenwijze die achter de dB schuil gaat, leert ons nu dat een verdubbeling van de afstand tot de geluidbron gepaard gaat met een vermindering van 6 dB wat betreft het waargenomen geluidniveau. Wordt de afstand weer verdubbeld, dan gaat er weer 6 dB af, enzovoort.

Vrije-velddcondities zijn typerend voor de communicatie met behulp van geluid in de open lucht. Het geluid stroomt vrij weg van de bron of valt op volledig absorberende oppervlakken zoals publiek en begroeiing. Alleen als er muren of andere weerkaatsende objecten in het geluidveld staan, treedt weerkaatsing op en wordt het vrije-velddkarakter geweld aangedaan.

De regel van 6 dB afname van het geluidniveau bij verdubbeling van de afstand tot de bron heeft flinke consequenties voor de productie van geluid, inclusief die van muzikaal geluid. Wil men bijvoorbeeld iemand op twintig meter van de bron nog een geluidniveau van 60 dB aanbieden, dan moet dat 66 dB zijn op tien meter, 72 dB op 5 meter, 78 op 2,5 meter, enzovoort. Er moet flink wat herrie worden gemaakt. En, als die persoon op

moet flink wat herrie worden gemaakt. En, als die persoon op 20 meter zijn 60 dB krijgt, zal iemand op 40 meter nog altijd 54 dB ontvangen, op 80 meter 48 dB, enzovoort. Met andere woorden: om publiek op enkele tientallen meters afstand goed te bereiken, moet men geluid produceren dat op diverse honderden meters nog steeds goed hoorbaar is, zij het niet direct luid.

Muziekinstrumenten voor buiten zijn dan ook, van de vroegste geschiedenis tot heden, luide instrumenten, bij voorbeeld koperen blaasinstrumenten als de trompet, de trombone en de hoorn en houten blaasinstrumenten met enkel of dubbelriet: hobo's en schalmeien, saxofoons, klarinetten, en dergelijke. Deze instrumenten kunnen op korte meetafstand niveaus van rond de 80 dB produceren en zijn dus binnen een straal van diverse tientallen meters goed te horen.

Het besloten veld

Heel vaak echter klinkt muziek niet in vrije veldcondities, maar in die van het *besloten veld*, bijvoorbeeld in kamers, zalen en andere begrensde ruimten. De begrenzingen die deze ruimten het geluid opleggen, zorgen ervoor dat het geluidveld op een essentieel andere wijze wordt opgebouwd.

Geluid dat in een besloten ruimte wordt geproduceerd, zal in eerste instantie vrij van de bron wegvloeien, net als in het vrije veld. Maar na een luttel tijdsbestek zal de geluidgolf één van de wanden of andere grensoppervlakken raken en worden teruggekaatst. Al spoedig zal de gehele 'geluidbol' zijn teruggekaatst en zijn veranderd in geluidfronten die nu in andere richtingen door dezelfde ruimte reizen. Als de geluidbron continu geluid produceert, zullen de teruggekaatste fronten voortdurend heenreizende fronten doorkruisen. Na enige tijd zal er een wirwar van geluidfronten in alle richtingen door de besloten ruimte op- en neer reizen. Het zal duidelijk zijn dat de simpele

pele regel van 6 dB verzwakking bij verdubbeling van de afstand tot de geluidbron niet meer zal opgaan. Maar hoe moeten we zo'n besloten geluidveld nu wel benaderen?

Alleen in een hypothetisch geval zijn grensoppervlakken van ruimten volledig weerkaatsend of reflecterend. In dat geval blijft al het geproduceerde geluid in dezelfde ruimte en wordt het niveau van het klinkende geluid steeds hoger. In energiematen gerekend, zal de sterkte lineair of evenredig met de tijd toenemen. Door het logaritmische karakter van de dB-maat zal de toename in dB niet evenredig met de tijd zijn, maar eerder steeds geringer worden. Een verdubbeling van de geluidenergie betekent een toename van 3 dB en voor zo'n verdubbeling is gedurende het proces steeds meer tijd nodig. Maar in principe loopt de toename oneindig door en zal elk niveau na een bepaald tijdsverloop kunnen worden bereikt.

De bovengeschetste situatie is echter hypothetisch. In werkelijkheid is elk grensoppervlak ten minste enigszins absorberend. Steeds als geluid wordt gereflecteerd verdwijnt er ten minste enige energie, zodat uiteindelijk, na kortere of langere tijd, het geluid wegsterft. Dat proces van wegsterven is aanschouwelijk te maken met twee kernbegrippen, namelijk enerzijds het begrip *weerkaatsing* of *reflectie* zelf, anderzijds het begrip *gemiddelde vrije weglengte*.

De reflectie zelf is het moment waarop geluid energie kwijtraakt. De hoeveelheid verdwijnende geluidenergie wordt aangegeven door de absorptiecoëfficiënt α , die gedefinieerd is als de fractie weggenomen geluidenergie. Een absorptiecoëfficiënt $\alpha=0,50$ betekent dat de helft van de geluidenergie wordt weggenomen en dat het niveau van het geluid daalt met 3 dB. Werkelijke ruimten hebben doorgaans geen uniforme absorptie over alle grensvlakken gerekend. Sommige vlakken zullen meer, andere minder absorberen.

Na weerkaatsing reist het geluid weer door de ruimte, in principe ongehinderd. Nu zou het interessant zijn om te weten hoe vaak het geluid tegen de wanden botst waar het zijn energie kwijtraakt, wat bijvoorbeeld te kwantificeren is aan de hand van het aantal weerkaatsingen per seconde. Het zal duidelijk zijn dat het voor een werkelijk bestaande ruimte onmogelijk is om voor een compleet geluidveld alle weerkaatsingen te bepalen. Maar met wat statistisch denken is het heel wel mogelijk om wat schattingen te maken. Die schattingen betreffen dan de zogenaamde vrije weglengte van het geluid, dat wil zeggen de lengte van de weg die het geluid aflegt tussen twee weerkaatsingen.

Neem bijvoorbeeld een kubus of een blokvormige ruimte in het algemeen. Veel geluidswegen zullen lopen tussen tegenoverliggende wanden en zullen daarom gemiddelden laten zien van lengten die wat groter zijn dan de kortste afstand tussen die wanden. De allergrootste weglengte is die tussen twee tegenoverliggende hoeken maar die is uitzonderlijk. Zeer kleine weglengten bestaan tussen twee weerkaatsingen die beide in de buurt van dezelfde rand of hoek liggen. Het is nu een wiskundig-statistisch probleem om voor een ruimte met bepaalde afmetingen de *gemiddelde vrije weglengte* te bepalen, de gemiddelde lengte van alle geluidswegen die in een ruimte tussen twee weerkaatsingen mogelijk zijn. Voor geometrisch goed bepaalde vormen is deze gemiddelde vrije weglengte (L) exact te bepalen, voor reële ruimten is doorgaans via vuistregels een verantwoorde schatting te maken. Voor deze schatting neemt men doorgaans de eenvoudige breuk

$$L = 4V / S,$$

waarin V het volume (in m^3) en S het oppervlak, dat wil zeggen de som van de oppervlakken van de verschillende grensoppervlakken (in m^2). De formule leert ons dat de gemiddelde vrije

weglengte in eerste schatting gelijk is aan viermaal het quotiënt van volume en grensoppervlakte.

Beide gegevens tezamen — het gemiddelde verlies *bij* weerkaatsing en de gemiddelde tijd *tussen* twee weerkaatsingen — maken de schatting mogelijk van één enkele parameter die als geen andere zo simpel, namelijk in één gemakkelijk te doorgronden en te duiden getal, de reactie van een ruimte op het geluid erin weergeeft. Die ene parameter is de *nagalmtijd* die kan worden geschat met een vuistregel, net zo eenvoudig als die voor de gemiddelde vrije weglengte, namelijk:

$$T = V / 6A,$$

waarin T de nagalmtijd (in seconden) is en A de zogenaamde 'oppervlakte open venster', gedefinieerd als het product van grensoppervlak en gemiddelde absorptie (in m²). De formule zegt dat de nagalmtijd in een ruimte in seconden is gelijk aan het volume gedeeld door zesmaal de hoeveelheid absorptie van de ruimte. De aldus gevonden nagalmtijd pretendeert de tijd weer te geven waarin het geluid in een ruimte na uitschakelen van de bron 60 dB zwakker wordt. Deze 60 dB is niet toevallig gekozen: het is ongeveer het verschil tussen het niveau van een duidelijk waarneembaar krachtig geluid en dat een wegstervend geluid. Kortom, de nagalmtijd geeft de tijd weer die nodig is om een geluid te laten wegsterven.

In de praktijk blijkt de nagalmtijd in de ruimten waar wij ons gewoonlijk begeven te variëren van minder dan een halve seconde (een huiskamer) tot zo'n 5 seconden of misschien wel wat meer (een gotische kerk). Ruimten met een korte nagalmtijd worden droog genoemd, die met een lange nagalmtijd hol of galmend.

Nagalm

De nagalmtijd zelf is een meetgrootheid, geen fysisch fenomeen. Het fysische fenomeen dat ermee samenhangt is de *nagalm zelf*, waaraan we nu enige woorden moeten besteden. Als geluid in een ruimte klinkt, bereikt het op verschillende manieren, of liever, langs verschillende wegen, het oor van de luisteraar. De kortste weg tussen bron en luisteraar is de rechte lijn die deze twee verbindt. Het geluid dat op deze weg zijn bestemming vindt, noemen we het *directe geluid*. Ander geluid bereikt via één, twee, drie of meer weerkaatsingen tegen wanden, plafond, enzovoort het luisterend oor en dit geluid wordt *indirect geluid* genoemd. Hoewel we het ons nagenoeg nooit realiseren — zoals er zeer veel in de waarneming van geluiden, inclusief die van muziek en spraak is wat volkomen ongemerkt, want normaal, aan ons voorbijgaat —, verschillen direct en indirect geluid essentieel van elkaar in verschillende opzichten. Het directe geluid arriveert het eerst; het hoeft immers maar de kortste weg af te leggen. Indirect geluid komt later aan, maar dat is niet het enige verschil. Het indirecte geluid kunnen we ons denken te bestaan uit een groot aantal *geluidstralen*, dat elk via een andere weg is gekomen, en dus ook allemaal op een ander tijdstip aankomt (ze leggen immers allemaal een weg af van andere lengte nadat ze tegelijk de geluidbron vaarwel hebben gezegd). Ze komen ook uit alle richtingen en zijn dus *dif-fuus* in tegenstelling tot de gerichtheid van het directe geluid. De geluidenergie die in het indirecte geluid zit, is in z'n totaal doorgaans veel groter dan in het directe geluid. Volgens de statistische benadering van geluid in ruimten is indirect geluid gelijk verdeeld over de hele ruimte, en dus overal sterk, ongeacht de afstand tot de bron, maar in de praktijk blijkt deze aanname lang niet altijd te kloppen. Het indirecte geluid bijeen genomen noemen we *nagalm*. Zoals we al hebben vastgesteld, komt het bij de luisteraar aan tussen zo ongeveer een halve tot enkele seconden na het directe geluid.

De aanwezigheid van indirect geluid heeft vérgaande consequenties voor de waarneming van geluid, hetzij spraak hetzij muziek. Het betekent dat als verschillende geluiden elkaar aan de bron opvolgen (bijvoorbeeld de opeenvolgende spraakklanken in een redevoering of de opeenvolgende noten in een muziekstuk) — laten we ze A, B, C, enzovoort noemen —, het directe geluid van één element tegelijk aankomt met het indirecte geluid van zijn voorganger. De nagalm van A kan over het directe geluid van B vallen, de nagalm van B over het directe geluid van C, enzovoort. Opeenvolgende elementen worden op deze manier overlappende elementen en dat zou wel eens de verstaanbaarheid of de waarneembaarheid van de afzonderlijke elementen niet ten goede kunnen komen.

Het zal duidelijk zijn dat de overlapping in de waarneming van twee aan de bron gescheiden en opvolgende geluiden afhangt van twee factoren. In de eerste plaats is de sterkte en vooral de duur van de nagalm (welke grootheden altijd samengaan) van belang en in de tweede plaats de snelheid van opeenvolging van de opeenvolgende elementen van het geluid. Indien lettergrepen van spraak langzaam na elkaar worden uitgesproken, zal de nagalm van de ene al weggestorven zijn voor het directe geluid van zijn opvolger. Als er in muziek snelle noten na elkaar komen, is de kans groot dat de volgende noot in tijd samenvalt met de nagalm van de eerste en daardoor niet goed kan worden waargenomen.

Kortom, om spraak en muziek goed te kunnen waarnemen mag de nagalm niet zodanig zijn dat die de waarneming van het erop volgende element serieus gaat storen. In de praktijk betekent dit dat er een bovengrens is aan de toegestane nagalmtijd in het geval van een bepaald soort communicatie met behulp van geluid. Zo verloopt de spraakcommunicatie het beste met nagalmtijden kleiner dan 1 seconde. Kamermuziek mag iets meer hebben, zo tot 1,7, 1,8 seconden. Bij orkestmuziek mag de nagalmtijd oplopen tot over de 2 seconden, bij orgelmuziek en

gregoriaans is misschien een nagalmtijd van 3 seconden nog niet storend.

De zojuist gegeven voorbeeldjes van maximaal mogelijk nagalmtijden — de optimale nagalmtijd ligt daar meestal iets onder — laten ten minste twee interessante verbanden zien. In de eerste plaats geven ze een indicatie dat een uitvoering met een groter aantal betrokkenen het doorgaans stelt met een grotere nagalmtijd, in de tweede plaats dat muziek die geschreven wordt voor echt grote ruimten (kerken) een veel grotere nagalmtijd tolereert. Kennelijk is er een verband tussen de grootte van een ruimte en de nagalmtijd daarvan enerzijds en het gebruik van die ruimte anderszins.

Allereerst is er een intrinsieke relatie tussen de grootte van een ruimte en zijn nagalmtijd. In de formule van de nagalmtijd staat het volume van de ruimte in de teller, de oppervlakte in de noemer. Omdat het volume toeneemt met de derde macht van de straal en de oppervlakte met het kwadraat, neemt het quotiënt evenredig toe (of af) met de straal. Met andere woorden, als men een bepaalde ruimte lineair vergroot of verkleint met een bepaalde factor, dan neemt de nagalmtijd toe of af met diezelfde factor. Deze vaststelling is logisch wanneer men zich realiseert dat de gemiddelde vrije weglengte eveneens evenredig toeneemt met een lineaire schalingsfactor van de ruimte.

Bij verder gelijke eigenschappen heeft een zaal dus een langere nagalmtijd naarmate de zaal groter is. Er is nog een tweede effect van zaalvergroting, en dat is dat bij gelijke geluidproductie de gemiddelde geluidenergie per volume-eenheid in de ruimte minder wordt. Voor deze grootheid wordt de volgende formule gehanteerd:

$$E = NT / 13,8V,$$

waarin E de energiedichtheid (in Watt/m³) en N het vermogen van de bron (in Watt). Deze formule kan met gebruikmaking van de relatie $T/V=1/6A$ gemakkelijk worden omgezet in:

$$E = N / 82A.$$

Uit deze formule blijkt dat bij verder gelijkblijvende omstandigheden de energiedichtheid omgekeerd evenredig is aan de oppervlakte. Verdubbelt men bijvoorbeeld de lengteafmetingen, dan verviervoudigt de oppervlakte, waarbij de energiedichtheid vermindert tot een vierde, ofwel 6 dB lager, een behoorlijke hoeveelheid (alsof men tweemaal zo ver van de bron af staat, wat natuurlijk gemiddeld ook het geval is).

Uitvoerenden en toehoorders

De laatste formule laat een zeer interessante consequentie zien. Als er een optimale waarde van de energiedichtheid van geluid bestaat, dan moet die samengaan met een vaste verhouding tussen N , het bronvermogen, en A , een oppervlaktemaat van de ruimte. Als de oppervlakte met een bepaalde factor toeneemt, moet ook N met diezelfde factor toenemen en andersom. Als we nu zowel het bronvermogen als de oppervlakte vertalen naar de menselijke deelname in het communicatieproces, dan ontstaat een buitengewoon elegante relatie, en wel vrijwel de simpelste die er is. Menselijke geluidbronnen — sprekers, musici — kunnen wel enigszins variëren in de voortgebrachte geluidenergie, maar veel meer dan enkele dBs is meestal niet mogelijk — behoudens na speciale training, zoals toneelspelers en operazangers die ondergaan. Als men de energiedichtheid van het geluid in de ruimte wil verhogen, dan moet men al gauw grijpen naar een vergroting van het aantal executanten, en aangenomen dat alle executanten gemiddeld ongeveer dezelfde hoeveelheid geluidenergie produceren, zal hier gelden dat de

energiedichtheid globaal evenredig is aan het aantal executanten.

De oppervlakte laat zich op soortgelijke wijze vertalen naar de mens. Bij vergroting of verkleining van een ruimte nemen alle grensoppervlakken in gelijke mate toe of af. Onder die grensoppervlakken bevindt zich ook de toeschouwersruimte of liever het toeschouwersoppervlak. En aangezien een toeschouwer of luisteraar gemiddeld een constante hoeveelheid oppervlak in beslag neemt, ongeveer $0,8 \text{ m}^2$, zal er dus ook een evenredigheid bestaan tussen de oppervlakte van een zaal en het aantal toeschouwers, ofwel de publiekscapaciteit.

Deze evenredigheden tezamen genomen leiden tot de vaststelling dat er voor een bepaalde energiedichtheid een evenredigheid vereist is tussen het aantal executanten en het aantal toehoorders. Kortom, vervangt men een zaal met honderd zitplaatsen door een soortgelijke zaal met tweehonderd zitplaatsen, dan zal een zelfde resultaat in de geluidcommunicatie worden bereikt wanneer ook het aantal musici globaal verdubbeld wordt.

Gemiddelde gegevens met betrekking tot verschillende soorten muziekzalen bevestigen deze relatie. Laten we met elkaar vergelijken een huiskamer van 200 m^3 met een nagalmtijd van 0.75 seconde, een kleine muziekzaal van 2000 m^3 met een nagalmtijd van 1.5 seconde en een grote muziekzaal van 20.000 m^3 met een nagalmtijd van 2.5 seconde. Als we de absolute waarde van de energiedichtheid even vergeten, en uitsluitend kijken naar de relatieve grootte van het quotiënt NT/V of N/A , waarbij we N kwantificeren als het aantal spelers, dan ontstaat een constante waarde van NT/V als we voor de huiskamer van vier executanten uitgaan, voor de kleine muziekzaal van dertien en voor de grote muziekzaal van tachtig. Deze getallen doen het aardig voor een huiskamerensemble, een kamerorkest en een symfonieorkest. Het aantal toehoorders is evenredig aan het aantal

executanten en kan dan globaal op 25 maal het aantal executanten worden gesteld. Voor het symfonieorkest komen we dan op tweeduizend, voor het kamerorkest op ruim driehonderd. Het corresponderende getal voor het huisconcert, honderd, is echter misschien wat aan de hoge kant.

Specifieke situaties zorgen voor afwijkingen van de gestelde zeer globale relaties. Een operahuis heeft doorgaans, net als een volwassen concertzaal, een capaciteit in de orde van grootte van tweeduizend bezoekers. Maar het volume is gemiddeld de helft van wat wij voor de concertzaal hebben opgegeven, namelijk 10.000 m³. Hierdoor is de nagalmtijd beduidend lager dan in een concertzaal, eerder in de buurt van de 1.5 seconde, hetgeen natuurlijk niet zonder bedoeling is: zo kan de tekst veel beter overkomen. Kerken variëren enorm in grootte, maar voor een kathedraal kan men 50.000 tot 100.000 m³ rekenen. Deze hebben doorgaans een langere nagalmtijd dan men op grond van schaling vanuit een concertzaal zou verwachten, namelijk evenredig aan het volume in plaats van aan de wortel daaruit. Dit heeft zeker te maken met de ruime aanwezigheid van sterk reflecterende oppervlakken.

De gegeven beschouwingen maken duidelijk dat er zeer bepaalde relaties bestaan tussen de verschillende elementen die tezamen een muzikale communicatieketen vormen: de muziek, het aantal executanten, het gemiddelde geluidniveau, de nagalmtijd en de grootte van het publiek. In de gemiddelde situatie staan deze 'grootheden' in bepaalde verhoudingen tot elkaar, die natuurlijk over een bepaalde bandbreedte variëren maar niet willekeurig te kiezen zijn. Men mag aannemen dat die gemiddelde waarden niet ver van de optimale waarden liggen en via het historisch proces van trial-and-error tot stand zijn gekomen.

In feite staat het aantal toehoorders centraal in de verschillende relaties. Als we dit aantal N noemen, dan is het grondoppervlak

van de zaal ook ongeveer N m². Uitgaande van een kubusvormige ruimte is er een ribbe $R=\sqrt[3]{N}$, waarvan zowel het totale grensooppervlak $6R^2$ en het volume R^3 kunnen worden afgeleid. De vloer met publiek kan men als volledig absorberend stellen, de overige grensvlakken absorberen voor een klein deel. Hieruit volgt een absorptieoppervlak van $3R^2$ of $4R^2$, hetgeen weer leidt tot een verhouding van V/A gelijk aan $R/3$ of $R/4$. Vult men dit in in de formule voor de nagalmtijd, dan ontstaat een verband in de orde van grootte van

$$T = R / 20, \text{ of}$$

$$T = \sqrt[3]{N} / 20.$$

Deze relatie impliceert een nagalmtijd van 0,5 seconde voor een zaal van honderd toehoorders, een nagalmtijd van 1 seconde voor een zaal voor vierhonderd toehoorders, een nagalmtijd van 2 seconden voor een zaal voor 1600 toehoorders en een nagalmtijd van 3 seconden voor een zaal van 3600 bezoekers. Deze waarden komen in orde van grootte overeen met die van bestaande zalen. Als men nu constateert dat een groot symfonieorkest tachtig spelers heeft en dat de bijbehorende concertzaal tweeduizend plaatsen heeft, dan komt men op een verhouding van een speler op 25 toehoorders. Teruggerekend is dat zestien spelers voor de zaal met vierhonderd plaatsen. Dit zijn op zich aardige schattingen, maar het moge duidelijk zijn dat de praktijk afwijkingen naar boven en naar onderen laat zien tot zeker 25%. Het gaat hier om orde-van-grootte-schattingen, niets meer en niets minder.

Grote en kleine muzikale ruimten

Ik heb zojuist niet de zaal met 3600 zitplaatsen teruggerekend naar een orkestgrootte. Men zou uitkomen op een orkest van 144 spelers en dat bestaat niet — uitzonderlijke gevallen niet meegerekend. Er is hier namelijk een limiterende factor in het

geding. Als we naar de geschiedenis van de bouw van concertzalen kijken, dan zien we een begin in de tweede helft van de zeventiende eeuw en een doorgaande ontwikkeling tot het begin van de twintigste eeuw. De eerste zalen zijn niet zo groot, evenmin als de ensembles. Gedurende de geschiedenis groeien de ensembles en de zalen, totdat rond 1900 zalen van rond de 20.000 m³ normaal zijn. Een bekend voorbeeld is het Amsterdamse Concertgebouw, met 2200 zitplaatsen en een nagalmtijd boven de 2 seconden. Gedurende de twintigste eeuw worden de zalen maar nauwelijks groter, tenminste zolang niet met de ondersteuning van elektronische versterking wordt gewerkt. De limiterende factor lijkt hier de orkestgrootte te zijn. Om een zaal groter dan 20.000 m² te bespelen, moet het orkest groter dan tachtig man/vrouw worden. Hierdoor kunnen de afstanden tussen de uiterste spelers in het orkest tien meter of meer worden en dit bemoeilijkt de synchronisatie. Immers, het geluid heeft zo'n 30 milliseconden nodig om die tien meter af te leggen en dat is al veel. Wordt dat tijdsverloop nog groter, dan ontstaan er onherroepelijk synchronisatieproblemen tussen de musici. Het kan zijn dat bovendien organisatorische en financiële aspecten aan deze beperking hebben bijgedragen, maar ik moet toch aannemen dat de fysische factor beslissend is geweest. Orkesten kunnen niet veel boven de tachtig personen uitgroeien en daarmee is de bovengrens aan de grootte van een muziekzaal gesteld.

Op twee manieren lijken deze limieten te kunnen worden overschreden. In de eerste plaats in het geval van de uitvoering van werken voor groot koor en groot orkest. Echter, de gemiddelde koorstem is veel zachter dan het gemiddelde orkestinstrument zodat de toename van het geluidniveau door het koor beperkt is. Een koor van tachtig man/vrouw plus een orkest van tachtig sterk komt misschien overeen met een orkest met honderd spelers of iets dergelijks. Maar het is natuurlijk niet toevallig dat deze werken ook nogal eens in kerken worden uitgevoerd.

Een andere manier om de groottelimiet te overschrijden is het toepassen van ondersteuning met behulp van een geluidinstallatie. Met deze hulpmiddelen kan men het orkest op de gewone grootte houden en toch de zaal vergroten. In een aantal grotere zalen, met name in de Verenigde Staten, zijn deze hulpmiddelen inderdaad toegepast. Een nog grotere onafhankelijkheid van de zaalgrootte ontstaat wanneer de optredenden systematisch van versterking van hun muziek gebruik maken, zoals in veel vormen van pop, jazz en lichte muziek.

Volgens de gegeven richtlijnen zou een enkele speler zich moeten beperken tot zeer kleine zalen, eerder van huiskamer formaat. Immers, bij één speler horen 25 luisteraars, die een oppervlakte van 25m² en een ruimte van 125m³ impliceren. Hier is vermoedelijk een onderschatting in het spel. Maar in het geval van één spreker lijkt het toch niet zo'n slechte gissing. Iedereen die onverwacht en onge oefend in een zaal met mensen moet spreken, spreekt aanvankelijk te zacht. In de huiskamer van 25 m² is zijn/haar volume voldoende, maar in een klaslokaal of voordrachtszaal moet men zijn/haar stem verheffen om verstaanbaar te blijven. Een zaal van 50 m² vraagt een verdubbeling van de geluidenergie, ofwel 3 dB erbij, een zaal van 100 m² een verviervoudiging, ofwel 6 dB erbij. Deze waarden zijn slechts na oefening of training vol te houden.

Grotere aantallen toehoorders impliceren grotere zalen en grotere ensembles, grotere zalen grotere nagalmtijden. Een grote nagalmtijd maakt muzikaal detail minder gemakkelijk en bevordert het gebruik van grote melodische lijnen. En inderdaad is dit een rode draad die door de muziekhistorische ontwikkeling van de negentiende en twintigste eeuw heenloopt. De twintigste-eeuwse kunstmuziek laat een terugkeer naar het detail zien en dat leidt onmiddellijk tot het gebruik van kleinere ensembles en de oriëntatie op kleinere zalen. De grootste zalen van het klassieke muziekbedrijf zijn nog altijd op het laatnegentiende-eeuwse repertoire gericht.

Conclusie

De grootte van de ruimte waarin muziek klinkt, is dus in dit alles een belangrijke, zo niet beslissende factor, een factor die zich natuurlijk vooral indirect laat voelen, en wel door de tijd die het geluid nodig heeft om in een ruimte van bron tot luisteraar of van wand tot wand te reizen. Deze tijdsbestekken zijn uiteraard weer afhankelijk van de snelheid van het geluid. Hoewel die snelheid wat varieert met de temperatuur en andere kenmerken van de atmosfeer, is die toch globaal constant, zo'n 320 m/sec. In de eerder gegeven formules, berekeningen en schattingen is daarvan uitgegaan. Daar kon de onzichtbare voortplanting van het onzichtbare geluid worden vervangen door zichtbare en tastbare afstanden. Met andere woorden: zoals in de kosmologie het de snelheid van het licht is die aan alles een limiet stelt, zo kan men stellen dat de muzikale ruimte wordt bepaald door de snelheid waarmee het muzikaal geluid zich een weg baant van speler naar luisteraar.

Literatuur

Beranek, Leo L. *Music, Acoustics, and Architecture*. Wiley, New York 1962.

Beranek, Leo L. *Concerts and Opera Halls: How They Sound*. Acoustical Society of America, Woodbury NY 1996.

Meyer, Jürgen. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis: Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten*. Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt am Main 1972. In het Engels beschikbaar onder de titel *Acoustics and the Performance of Music*. Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt am Main 1978.

Rasch, Rudolf en Reinier Plomp. 'The Listener and the Acoustic Environment'. In Diana Deutsch (red.) *The Psychology of Music*. Academic Press, New York 1982. p. 135-147.

Rossing, Thomas D. *The Science of Musical Sound*. Addison-Wesley, Reading MA 1982.

Schroeder, Manfred R. 'Concert Halls: From Magic to Number Theory'. In Diana Deutsch (red.) *The Psychology of Music, Second Edition*. Academic Press, San Diego 1999. p. 25-46.

Taylor, Charles. *The Sounds of Music*. BBC, Londen 1976.

De kromming van tijd en ruimte*

Vincent Icke

They were the best of times, they were the worst of times. Aldus beschrijft Charles Dickens een tijd die nu twee eeuwen achter ons ligt. Ook nu zouden we iets dergelijks over déze tijd kunnen zeggen. Niet over de omstandigheden in de maatschappij, wel over die in de theoretische natuurkunde. *They are the the best of times*, want de diepte van ons begrip van ruimte en tijd was nog nooit zo groot. *They are the worst of times*, want de diepte van onze onwetendheid over materie, tijd en ruimte was ook nog nooit zo groot.

In dit artikel komen twee dingen aan bod. Als eerste de algemene relativiteitstheorie, die de structuur van tijd en ruimte beschrijft, en de gevolgen daarvan voor ons begrip van de wereld om ons heen. Ten tweede het feit dat die prachtige theorie niet strookt met wat wij weten over onze Natuur op zeer kleine schaal: de microstructuur van ons Heelal.

We gaan terug in de tijd, naar het begin van de zeventiende eeuw, nog ver vóór Dickens. Men wist nog niet wat de regels van de klassieke mechanica waren. Nu groeien wij daarmee op, althans dat was tot voor kort het geval. Onlangs heeft de overheid, en met name bepaalde staatssecretarissen, besloten dat de klassieke mechanica niet belangrijk is voor de mensheid. Helaas.

* Redactie en verwerking van dit artikel: mevr. drs. Josien Stehouwer.

In de tijd waarover het gaat, ongeveer 1620-1630, probeerde men er achter te komen welke wetten onze Natuur besturen. Dat is niet makkelijk, omdat de wetten van de klassieke mechanica bijna nooit in zuivere vorm te zien zijn. Als u een voorwerp op tafel hebt staan en u geeft daar een duwtje tegen, dan komt dat, zodra u ophoudt met duwen, bijna meteen tot stilstand. Niet omdat dat in de regels van de mechanica als zodanig besloten ligt, maar door de wrijving tussen het voorwerp en de tafel waar u het overheen duwt.

Pas toen men naar de sterren ging kijken en naar de planeten die rondom onze Zon bewegen, kon men de mechanica in pure vorm zien, omdat de wrijving tussen een planeet en zijn omgeving verwaarloosbaar klein is. Voordat dat lukte, probeerden onder anderen Galileï en Descartes een antwoord te geven op de meest fundamentele vraag van de klassieke mechanica: *Waar Is Wat Wanneer?* Welnu. *Waar* is een positie in de ruimte? *Wanneer* is een positie in de tijd? *Wat* is een voorwerp? Over het laatste zegt Descartes: "Een voorwerp is een voorwerp zodra het *afmetingen* heeft." In artikel 16 in deel II van *Principes de la Philosophie* schrijft hij: *De cela seul qu'un corps est étendu en longueur, largeur et profondeur, nous avons raison de conclure qu'il est une substance.* Hier wreekt zich het hierboven gewraakte beleid van de overheid. Over de klassieke mechanica leren wij nauwelijks nog iets; de Franse taal verstaan wij al helemaal niet meer. Descartes zegt hier: uit het feit alleen al dat iets afmetingen heeft, kunnen wij besluiten dat het een substantie betreft, dat het tastbaar is. Een typisch filosofische opvatting. Maar daarnaast komt er echte natuurkunde bij. Descartes gaat verder en zegt: *nous devons conclure de même de l'espace qu'on suppose vide.* Wij moeten dezelfde slotsom trekken over de ruimte, *waaraan men wel zegt dat zij ledig is.*

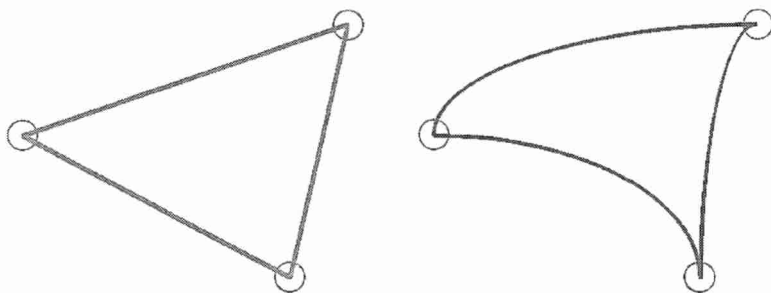
In die tijd, waarin het newtoniaanse wereldbeeld begon door te breken, dacht men dat ruimte een soort onzichtbaar tekenpapier is waarop Onze Lieve Heer ons Heelal had geschetst. Maar Descartes zegt dat de ruimte natuurkundige eigenschappen heeft, waarvan sommige overeenkomen met de natuur-

kundige eigenschappen van de materie. Materie heeft uitgebreidheid: hier is een baksteen, die neemt een zekere hoeveelheid ruimte in, ik neem de baksteen weg, de hoeveelheid ruimte is er nog. Als ruimte dezelfde meetkundige eigenschappen heeft als materie, dan moeten wij ruimte ook serieus nemen als een wezenlijk bestanddeel van ons Heelal. Dat idee verdween achter de horizon, want Descartes kon daar niet zoveel chocola van maken. Om voortreffelijke redenen ging het newtoniaanse beeld de boventoon voeren. Als je iets goed kunt uitrekenen en de sommetjes kloppen met wat de Natuur ons te zien geeft, heb je tot op dat moment de juiste theorie in handen. Driehonderd jaar later was het Albert Einstein die de vraag van Descartes, over het wezenlijke van de ruimte, nogmaals aanpakte en er een fysisch bruikbaar antwoord op gaf. Daarvoor waren natuurlijk wel eerst driehonderd jaar ontwikkeling in de wis en natuurkunde nodig geweest. Descartes kunnen we niets verwijten.

Vergelijk nu het beschrijven van de structuur van de materie en de structuur van de ruimte. Ik neem een klein stukje materie: een stukje van een appel, een stukje van een cavia, een stukje van een zoutkristal. Ik ga dat sterk vergroten: ik krijg een rangschikking van deeltjes in de ruimte. In de tussentijd, in die driehonderd jaar, was men zich bewust dat materie bestaat uit deeltjes. Scheikundigen kwamen daar voor het eerst achter, omdat zij formules ontdekten voor samengestelde stoffen, van het type H_2O . Dus niet $H_{1,8}O$ (wat net zo goed gekund had), maar $H_{twee}O$: daaruit blijkt het deeltjesgedrag van de materie. Die deeltjes rangschik je in de ruimte, en als ik de schikking van die deeltjes in de ruimte heb, dan heb ik daarmee de structuur van de materie beschreven.

Einstein deed iets soortgelijks voor de structuur van de ruimte. Daarbij is niet zozeer van belang dat je een bepaald deeltje op een bepaalde plek hebt. Belangrijk is dat je een bepaald *punt* op een bepaalde plek hebt, en, zeer belangrijk, in een bepaalde relatie met punten daaromheen. De schikking van de punten in de ruimte geeft de structuur van de ruimte aan. Om die struc-

tuur goed te kunnen beschrijven, hebben wij een meetkunde nodig, een meetkunde van onze Natuur. Dit is minder triviaal dan het trekken van rechte lijnen tussen punten.



Figuur 1

Ik heb in *figuur 1* twee soorten meetkunde geschetst: een meetkunde waarbij tussen de verschillende punten de afstand wordt gegeven door blauwe lijnen. Het voorschrift voor de afstand is altijd de kortste lijn tussen twee punten. Maar, kortste impliceert dat er een *afstandsrecept* is. Het afstandsrecept dat de lijnen op het plaatje links voortbrengt, is het ouwe, trouwe afstandsrecept van Pythagoras: het kwadraat van een afstand is de som van de kwadraten van de coördinaten.

Met mijn trouwe Macintosh schets ik nog een ander soort meetkunde, waarbij de punten zijn verbonden niet zozeer met rechte lijnen maar door kwartsectoren, een kwart stukje van ellipsen. Een tekenprogramma doet dat met groot gemak (zie rechts in de *figuur*). Ieder kan daarmee voortreffelijk meetkunde bedrijven, maar het is niet de meetkunde die men in een vlak stukje papier zal aantreffen. Dat blijkt bijvoorbeeld uit het feit dat de som van de hoeken van de Pythagorasdriehoek 180 graden is, en de som van de hoeken van de ellipssectordriehoek slechts 90 graden.

De vraag is dus opnieuw: welke is de meetkunde van onze Natuur? Daar wist Einstein voortreffelijk op te antwoorden. Maar toch, er was een probleem. Er was een heel merkwaardige eigenschap van ons Heelal aan het licht gekomen, en wel heel

letterlijk 'aan het licht': *de lichtsnelheid is voor iedereen onder alle omstandigheden dezelfde.* Veel mensen denken dat een basis-eigenschap van de relativiteitstheorie is, dat niets sneller gaat dan het licht. Maar dat is niet zo. In het laboratorium is dit niet te verifiëren. Het is mogelijk een onderzoeksvoorstel te schrijven voor een zeer grote hoeveelheid geld waarin wordt beweerd dat, als iemand maar flink z'n best doet, hij vast wel sneller kan gaan dan het licht. Maar in het laboratorium is iets heel anders gemeten. Dat gebeurde in 1887 door Michelson en Morley in de stad Cleveland (Ohio): hoe je het ook wendt of keert, de snelheid van het licht is voor iedereen onder alle omstandigheden dezelfde. De lichtsnelheid is *invariant*.

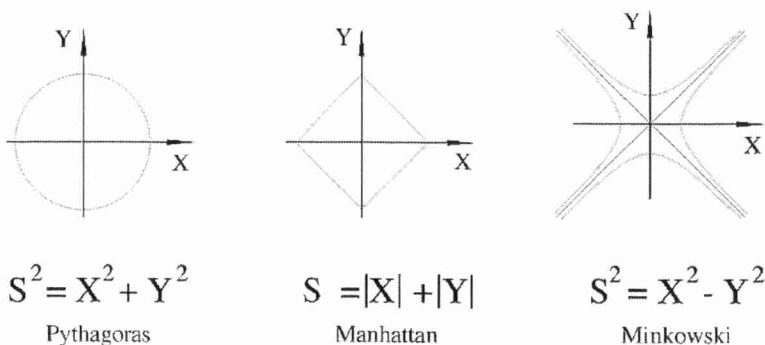
Dit feit is hoogst merkwaardig. In de eerste plaats, omdat een snelheid een afstand is gedeeld door een tijd: meter per seconde, kilometer per uur. En natuurlijk, als een quotiënt constant blijft, moeten teller en noemer met elkaar samenspannen. Hetgeen betekent dat afstanden in de ruimte en intervallen in de tijd *iets met elkaar te maken moeten hebben*. Ruimte en tijd, met andere woorden, kun je met dezelfde maatstaf meten, namelijk de seconde. De afstand van het spreekgestoelte tot het midden van de zaal is ongeveer een honderdmiljoenste seconde. De afstand van hier tot de Maan is 1,2 seconden; de afstand van hier tot de Zon is ruim acht minuten. Als u, in plaats van bij deze duistere lezing, lekker buiten in het zonnetje een wandeling had gemaakt, had u in oud licht gelopen, want dat was al acht minuten geleden vertrokken. De dichtstbijzijnde ster (na de Zon) staat 4,3 jaar bij ons vandaan. Als u de Andromedanevel ziet, één van de sterrenstelsels bij ons in de buurt, dan ziet u die zoals zij twee miljoen jaar geleden was.

Het bijzondere hiervan is, dat dit een zeer vreemd afstandsrecept geeft. Ik moet namelijk afstanden meten niet alleen in ruimte, maar ook in tijd. Zoals Einstein en Minkowski ontdekten, betekent dit dat het afstandsrecept in ons Heelal een vreemde mengeling is van afstanden in tijd en in ruimte. Een voorbeeld. Een afstandsrecept dat ieder wel kent, is dat van Pythagoras. Het kwadraat van een afstand is de som van de

kwadraten van de coördinaten: x-coördinaat, y-coördinaat, en z. Die afstand is de wortel uit de som van de kwadraten, $x^2+y^2+z^2$. Pythagoras, weet u nog?

Een ander afstandsrecept verzinnen is heel goed mogelijk. Ik kan nemen: de som van de absolute waarden van de coördinaten. Ik kan het plusteken vervangen door een minteken: $x^2+y^2-z^2$. Ook dat is een afstandsrecept. Zo zijn er talloze. Een wiskundige staat voor niets en de vraag is natuurlijk niet hoeveel afstandsrecepten er zijn. De vraag is: *hoe doet de Natuur het?* Die vraag zou Descartes blij gemaakt hebben, want het komt erop neer dat we vragen: *wat is de structuur van de ruimte?* (of, preciezer gezegd, de structuur van ruimte en tijd, maar dat zou d'aloude René hogelijk hebben verbaasd).

Als de meetkunde van ons Heelal zich op een bepaalde manier gedraagt, heeft dat dramatische consequenties. Voor de voorgaande drie afstandsrecepten heb ik getekend wat de vorm van een cirkel is (zie *figuur 2*).



Figuur 2

Een cirkel is de verzameling van alle punten met een constante afstand tot een gegeven punt. De eerste cirkel (links) volgt Pythagoras. In het midden staat een cirkel getekend volgens het recept waarin een afstand gelijk is aan de som van de absolute waarden van de coördinaten. Dit noem ik het Manhattanrecept.

In Amerika zijn de steden geordend in horizontale en in verticale banen: *streets* en *avenues*. Van het ene punt in de stad naar het andere lopen, dat kan, maar niet zoals je een wekje oversteeckt, want dat kan alleen met Pythagoras. Het beton houdt je tegen. De wandelaar moet eerst een stukje langs een *street*, dan een hoek om en daarna een stuk langs een *avenue* lopen. De som van die twee afstanden is de totaal afgelegde afstand. In dat geval krijgt zo'n 'cirkel' de vorm van een vierkant op zijn punt. Derde mogelijkheid (rechts): als we nu kijken naar een soort pythagorasachtig recept, waar *een minteken* staat, dan is de 'cirkel' een hyperboloïde. Dat wil zeggen: op die lijn liggen punten die volgens deze maatstaf allemaal even dichtbij het nulpunt zijn. En zo zouden wij door kunnen gaan met nog gekkere cirkels.

De vraag is dus: hoe lapt onze Natuur het? Wat is het afstandsrecept dat onze Natuur in tijd en in ruimte heeft verzonnen? Het is het *derde* afstandsrecept dat ik geschetst heb. Misschien wel het gekste van de drie, waarbij je de som hebt van het kwadraat van de tijdsafstand en daar de som van de kwadraten van de ruimtelijke afstanden van afgetrokken. Als ik in *figuur 2* het mintekén door een plus zou vervangen, stond er gewoon de Pythagorasafstand. In het ruimtelijke gedeelte waar Descartes het over had, breedte-diepte-hoogte, geldt het gewone Pythagorasrecept. Maar in tijd en ruimte *gezamenlijk* is het een stuk ingewikkelder.

De meetkunde van ons Heelal is aanzienlijk lastiger dan je zou denken. En ook minder intuïtief vanzelfsprekend. De intuïtie die wij meekrijgen in de Pythagorasruimte waarin wij zijn geboren, waarin wij fietsen, waarin wij wandelen, dient helemaal tot niets als we ons verplaatsen naar een wereld van het Minkowskirecept: een kwadraat en daar dan de andere kwadraten van afgetrokken.

Tot mijn spijt is daar niets aan te doen. Het enige is er mee te leren werken. De algebraïsche vorm ervan is overigens behoorlijk lastig. Ik laat dit verder terzijde.

Tastbare gevolgen van kromming

Hoe leuk Descartes dit ook zou hebben gevonden, hij zou er niet tevreden mee geweest zijn. Ongetwijfeld zou hij hebben geëist dat we er een of meer meetbare eigenschappen van de Natuur mee zouden verklaren. Dat kan; met behulp van een analogie kunnen wij een beeld schetsen van de manier waarop de structuur van tijd en ruimte in ons dagelijks leven voorkomt. Stel, ik wil in een duinlandschap van het ene punt naar het andere komen. De enige eis die ik aan mijn pad stel, is dat het de *kortste weg* is tussen begin- en eindpunt. Kijk nog eens naar *figuur 1*. Het enige voorschrift voor afstanden is, dat een afstand de kortste weg zal zijn tussen twee punten, en wel *de kortste voor een gegeven afstandsrecept*. Ik ga nu in het duinlandschap tussen twee punten de kortste weg volgen. Laat een zeemeeuw hoog boven dat duin vliegen en naar beneden kijken. De meeuw ziet mij een ingewikkeld gekromd pad afleggen, van begin- naar eindpunt. Hé, denkt die meeuw, op de meeuwenschool heb ik geleerd: een voorwerp waarop geen kracht werkt, beweegt in rechte lijn met constante snelheid. Maar Vincent slingert daar wat rond, dus er werkt een kracht op hem! Intussen struin ik door het zand, mij van geen krachten bewust; het enige wat ik doe, is de kortste weg volgen over een gekromd oppervlak.

Als een voorwerp in zijn beweging van een rechte lijn afwijkt, of als het iets sneller of langzamer gaat — als het, met andere woorden, een *versnelling* ondervindt — is de conclusie dat er een kracht in het spel is. De zeemeeuw, geschoold in de klassieke mechanica, besluit dat er een bepaalde kracht op mij werkt: dwars- of tegenwind, magnetische turbulentie, wie zal het zeggen? Er moet een wisselwerking zijn, er moet een kracht zijn die aan mij trekt.

De meeuw vliegt nog steeds boven het duinlandschap en kijkt opnieuw naar beneden. Hij ziet mijn kat honderd meter achter mij aanlopen, precies zoals zijn baas: volg de kortste weg (dat is niet bepaald des kats, maar daar gaat het nu niet om). Wat ziet de meeuw? Hij ziet dat de kat *exact dezelfde weg* volgt. En dat is heel merkwaardig (zeker voor een kat). Als er bijvoorbeeld

wind van rechts zou zijn en wind van links, waarom hebben deze op mens en kat exact dezelfde invloed? Je zou beslist verwachten dat beide verschillende paden volgen. Maar de paden zijn *precies hetzelfde*.

En daarom krijgt die meeuw, als-ie tenminste Einstein heet, het idee dat de paden ontstaan door een *meetkundige eigenschap van de onderliggende ruimte*, en zo is het ook werkelijk in de wereld om ons heen. Dankzij het Einstein-Minkowski-recept voor de structuur van tijd en ruimte krijgen we gekromde banen in een gekromde ruimte. Als je de kortste weg volgt tussen twee punten in de tijdruimte, ligt daarmee het pad volledig vast! De vorm van het pad heeft niets te maken met een kracht, maar met de meetkundige eigenschappen van de onderliggende ruimte.

Stel, ik leg in ruimte en tijd een netwerk van coördinaten aan (x , y , z , t). Daarbij stel ik de regel: gebruik dat gekke derde afstandsrecept uit *figuur 2*, en bepaal daarmee de kortste weg. Dan is die weg het pad dat een voorwerp volgt als er geen kracht op werkt. Het volledige voorschrift, wiskundig opgeschreven, heet de *Einsteinvergelijking*. Dat is een joekel van een algebraïsche uitdrukking, maar het betekent niets anders dan: volg de kortste weg. Als de onderliggende ruimte een structuur heeft waarin het netwerk van coördinaten niet zo mooi rechthoekig is, is de vorm van het pad gekromd. Kortom, *gekromde ruimte geeft gekromde banen*.

In werkelijkheid is het erg ingewikkeld om dit allemaal uit te rekenen. Je moet bijvoorbeeld nog bewijzen dat het er niet toe doet hoe je je meetlat definieert. Dat wil zeggen, je moet bewijzen dat de kromming van de ruimte een *inwendige eigenschap van de ruimte zelf* is, en niet een overbodig bijproduct van de manier waarop je je metingen verricht. Dat dilemma waren landmeters al veel eerder tegengekomen. Toen Einstein langskwam, was het probleem door wiskundigen, zoals Gauss en Riemann, al volledig opgelost. Einstein gebruikte dit mathematische gereedschap dankbaar; het lag klaar.

Wij identificeren gekromde banen die we in de ruimte waarnemen met wat we vroeger voor zwaartekracht aanzagen. Waarom doen we dat, wat is er zo bijzonder aan die zwaartekracht? Hoe kunnen wij Descartes door een proefneming overtuigen dat dit niet maar een spelletje is?

De versnelling die we ondervinden ten gevolge van de zwaartekracht, hangt niet af van de massa van het bewegende voorwerp. Een klein kogeltje of een grote, zware kogel, allebei kan ik ze loslaten en als ik de weerstand van de lucht niet meetel, dan komen ze allebei op precies hetzelfde ogenblik op de grond neer. De versnelling die ze ondervinden is in beide gevallen exact hetzelfde. Als je een kracht wilt ontwerpen die dat doet, dan moet je hele bijzondere dingen verzinnen. Newton heeft dat gedaan. Hij veronderstelde dat de weerstand tegen een versnelling, die ik ondervind wanneer ik bijvoorbeeld een schop geef tegen een massief voorwerp, precies hetzelfde is als het gewicht van het voorwerp. Met andere woorden, *gewicht* en *massa* zijn precies hetzelfde. Waarom zou dat zo zijn? Het is volmaakt uit de duim gezogen en op het eerste gezicht kunstmatig. Toen Newton dit omstreeks 1660 voorstelde, heeft hij het zwaar te verduren gehad. Nu is dat anders, want *zwaartekracht is een ouderwetse term voor de gevolgen van de structuur van tijd en ruimte*. Zwaartekracht bestaat helemaal niet. De structuur van tijd en ruimte bestaat echter wel.

Als wij de planeten rondom de Zon zien gaan, zien we de gevolgen van de structuur van tijd en van ruimte. Wat wij zwaartekracht noemen, is een uiting van de kromming van ruimte en tijd. Dat is wat wij Descartes zouden hebben geantwoord als hij om tastbare feiten had gevraagd. Met behulp van het afstandsrecept van Einstein en Minkowski is die kromming uit te rekenen, en zo krijgen we de baanbewegingen die we om ons heen zien. Natuurlijk *zeggen* wij nog steeds 'zwaartekracht', anders is het zo'n mondvul. Een sterrenkundige spreekt ook rustig over 'zonsondergang', terwijl dat astronomisch gezien grote onzin is. Dat is allemaal niet erg, zolang we maar weten wat er bedoeld wordt.

De banen van planeten in het zonnestelsel, de baan van een geschopte voetbal, de baan die u beschrijft als u struikelt over een bananeschil, al die banen ontstaan door de kromming van tijd en van ruimte. Als je beneden aan een trap gaat staan en je trekt een sprintje naar boven, is het bonken van je hart een maatstaf voor de kromming van tijd en ruimte. Je denkt dat dit zwaartekracht is. Wat maakt dat je op een stoel kunt blijven zitten, is niets anders dan de structuur van de wereld om ons heen, de structuur van tijd en ruimte. De ruimte is geen onzichtbaar papier waarop ons Heelal is getekend. Integendeel, ruimte is een wezenlijk bestanddeel van onze wereld en ruimte heeft wel degelijk een structuur. Als wij met een telescoop botsende sterrenstelsels waarnemen, als we de planeten rondom de Zon zien bewegen, als we opmerken dat de Maan om de Aarde gaat, als we constateren dat de Aarde is samengebald tot een bijna perfecte bol, dan zien we werkelijk maar één ding: de gevolgen van de structuur van tijd en ruimte.

Kromming en materie

Het valt onmiddellijk op dat de kromming van tijd en ruimte altijd het sterkst is daar, waar je de meeste materie hebt. Dat is merkwaardig, want in principe zou de structuur van tijd en ruimte op zichzelf kunnen bestaan. Ten dele is dat zo. Er zijn oplossingen van die Einsteinvergelijking, de afstandsrecepten van onze wereld, waarbij je een vacuümplossing hebt: een keurige kromming van de tijdrimte, zonder dat er ook maar iets in de buurt is. Maar het merkwaardige is dat die gekromde banen, waarvan ik eerder beweerde dat ze ontstaan zijn ten gevolge van een kromming, *altijd* voorkomen op de plaatsen waar veel materie is: de baan van de Maan rondom de Aarde, de baan van de Aarde rondom de Zon. Er moet een verband zijn tussen die twee, zij geven elkaar als het ware de hand. Waarschijnlijk is het zo, dat de aanwezigheid van materie (het Heelal bestaat uit deeltjes, ruimte en tijd) op een of andere niet

verder gespecificeerde manier de kromming van tijd en van ruimte 'veroorzaakt'.

Nogmaals, een kromming van tijd en ruimte en een afstands-recept zijn in feite precies hetzelfde. Een voorbeeld. Een bevriend archeoloog doet opgravingen ergens in Mesopotamië. Hij vindt een kleitablet waarop staat wat de afstand is in dagreizen per kameel tussen het ene dorp en het andere. Dat was destijds nodig om te weten of je vijgen niet rot op de markt zouden komen. De archeoloog ziet op het tablet het getal drie staan, hetgeen betekent dat het drie dagreizen per kameel is van A naar B. Stel nu dat een andere archeoloog een tweede kleitablet opgraaft waarop de afstand van B naar C in dagreizen staat aangegeven. Daarop staat het getal vier. Nog niets aan de hand. Tot het moment dat een derde archeoloog een kleitablet opgraaft dat het getal tien vermeldt: de afstand in dagreizen van A naar C! Het is aardig te proberen een driehoek te maken met twee zijden van drie en vier dagreizen en de derde van tien. Drie plus vier is zeven, is minder dan tien, dus dat kan helemaal niet. We weten inmiddels dat dit wel kan, want als ertussen A en C een bergrug ligt, is het door de kromming van het plaatselijk oppervlak heel goed mogelijk dat er een driehoek verschijnt met deze verschillende zijden.

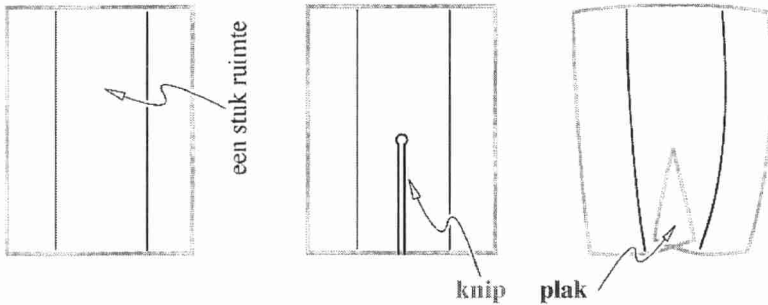
Met een tabel waarin staat wat de afstand van Utrecht naar Leiden is, de afstand van Leiden naar Wladiwostok en van Wladiwostok naar Seattle, enzovoort, kunnen we proberen hemelsbrede afstanden op onze planeet in kaart te brengen op een plat vlak. Dat lukt niet, tenzij het papier hier en daar een knipje krijgt en daarna de stukken weer aan elkaar geplakt worden. Uiteindelijk ontstaat een bol en dat is uiteraard omdat de Aarde een bol is. Zou er een afstandstabel bestaan die alle afstanden aangeeft tot vijf centimeter, dan zouden we elke molshoop op Aarde aldus in kaart kunnen brengen. Een Einsteinvergelijking is in feite, *mutatis mutandis*, een meetkundige exercitie van dergelijke soort.

Nu eerst moet een misverstand de wereld uit. Zoals nu bekend is, geeft gekromde ruimte gekromde banen. Dit betekent dat

verschillende voorwerpen in zo'n gekromde ruimte dezelfde banen volgen. Met andere woorden: alles valt op dezelfde manier. In de newtonse mechanica moet dat er met de hand in gestopt worden en dat is eigenlijk een mirakel. Als ik mijn poes en een voetbal in een bepaalde baan breng, volgen beide bij een gegeven kromming van tijd en ruimte precies hetzelfde spoor. Wanneer ik twee voorwerpen in elkaar omsluit, heeft dat een zeer opvallend gevolg. Stel, ik heb een ruimtesonde en daar stop ik mijn poes in. Ik breng die in een baan. Wat blijkt? Ze 'vallen' op precies dezelfde manier. De afstand tussen beide verandert niet in de loop van de tijd; de meeste mensen spreken dan van *gewichtloosheid*. Men mag wat mij betreft best het woord 'zwaartekracht' blijven gebruiken, ook al weten we nu dat zwaartekracht niet bestaat. Maar het vreselijke woord 'gewichtloosheid' moet geschrapd uit ieders vocabulaire. In de kromming van tijd en ruimte volgt alles dezelfde, kortste weg: de poes en de voetbal, de cavia, het ruimtestation, enzovoort. De 'gewichten', de massa's, zijn er nog steeds. Er is dus niks gewichtloos.

Ik heb daar eens een video van gezien, die ik kreeg van een collega van me, een andere sterrenkundige, uit Seattle. Hij is een tijdje astronaut geweest. Als ze zich eventjes mochten vertreden in zo'n Space Shuttle, deden ze spelletjes. Eén van die spelletjes was dat ze gekleurde chocolade snoepjes los in de ruimtecapsule hingen. Omdat het geheel beweegt ten gevolge van de kromming van tijd en ruimte, bleven de snoepjes *ten opzichte van het ruimteschip* op dezelfde plaats. Dit heeft niks met gewichtloosheid te maken. Het voertuig, de astronauten en de snoepjes volgen allemaal hetzelfde kromme pad in tijd en ruimte. Vervolgens moest de astronaut met zijn handen op z'n rug de snoepjes één voor één opeten. Verbazend lastig, want je kaatst van de ene kant van het ruimtestation naar de andere. De video liet zien dat sommigen daar heel handig in waren. De handigsten moesten dan voor straf eerst de rode, dan de blauwe en dan de gele opeten. Zou Descartes dat voldoende bewijs gevonden hebben?

Het is absoluut wezenlijk dat wij de structuur van tijd en ruimte zien als de oorsprong van gekromde banen.



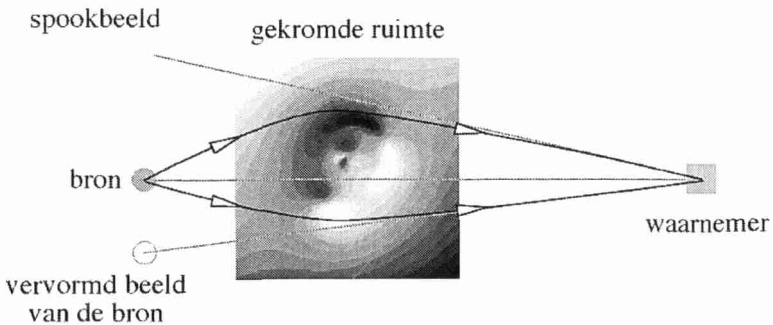
Figuur 3

In *figuur 3* is een tweedimensionale ruimte getekend met daarin twee evenwijdige lijnen. Ik pak nu een schaar en ik geef in die ruimte een knip, ik haal er een stukje uit en ik plak de boel weer aan elkaar. De banen zijn naar elkaar toe gebogen. Als je niet beter wist, zou je denken dat ter plaatse van het eindpunt van de knip misschien wel iets heel bijzonders aan de hand is, waardoor de banen gekromd worden. Eigenlijk is dit natuurkundig heel vreemd, want het veronderstelt een soort actie-op-afstand. Het ding dat het getekende spoor volgt, heeft helemaal geen weet van wat er in het eindpunt van die knip is. Het volgt gewoon lokaal zijn baan. Daar heb ik niet aangezet, ik heb alleen de ruimte verknipt, de structuur van de onderliggende ruimte veranderd. Zo krijg je andere banen. Een aantal gevolgen hiervan is bijzonder interessant.

In de eerste plaats kan iedereen zelf meten dat de kromming in tijd en ruimte steeds hetzelfde is. Je gooit verticaal een bal omhoog. Horizontaal wordt de tijd uitgezet die voorbij gegaan is en verticaal de hoogte die de bal heeft bereikt: een tijdruimtediagram. Als de bal in het begin maar een heel klein zetje krijgt, komt hij niet hoog en weer vrij snel terug. Als ik de bal heel hard omhoog gooi, gaat hij hoog de lucht in en duurt het lange tijd voordat hij weer terugkomt. Het opvallende is nu, dat de

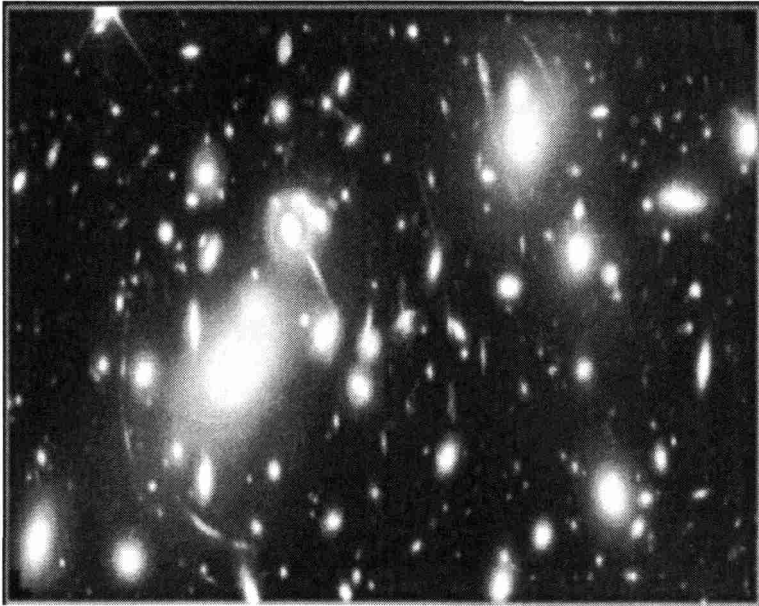
vorm van deze baan in de tijdruimte in alle gevallen precies dezelfde is. Misschien heb ik wel een extreem eenvoudig voorbeeld genomen, namelijk in één richting met een constante versnelling, maar *mutatis mutandis* geldt dit ook als je naar hogere dimensies gaat kijken. Met andere woorden, samenvattend: je hebt een afstandsrecept, je volgt de kortste weg en dat is alles wat je in feite hebt te doen.

Als het echt waar is dat alles op dezelfde manier valt, zou je ook verwachten dat het licht valt — om zo te zeggen. Dat is inderdaad het geval, al zijn de berekeningen ingewikkelder. Maar toch: ook het licht volgt, in een gekromde tijdruimte, gekromde banen. Dat noemen wij het *gravitatie-lens-effect*. We kunnen dat als volgt illustreren. Stel, er is een bron ergens in de diepte van het Heelal en een waarnemer. Daartussen zet ik een stuk gekromde tijdruimte. Dan kan het voorkomen, dat het licht dat de bron in de ene richting verlaat, uit een bepaalde richting op de waarnemer aankomt. En ook dat het licht dat de bron uit een tegenovergestelde richting verlaat, eveneens daar aankomt. De waarnemer ziet dan aan de hemel *twee* beelden van die bron in plaats van één. De bron splitst zich in twee stukjes en dat vervormde beeld krijg je te zien (zie *figuur 4*).



Figuur 4

Het opmerkelijke is, dat wij dit verschijnsel aan de hemel inderdaad waarnemen. Een van de mooiste voorbeelden van een gravitatielens is deze cluster van sterrenstelsels, Abell 2218, waarbij al die sterrenstelsels een soort langgerekte sikkeltjes vormen (zie *figuur 5*).

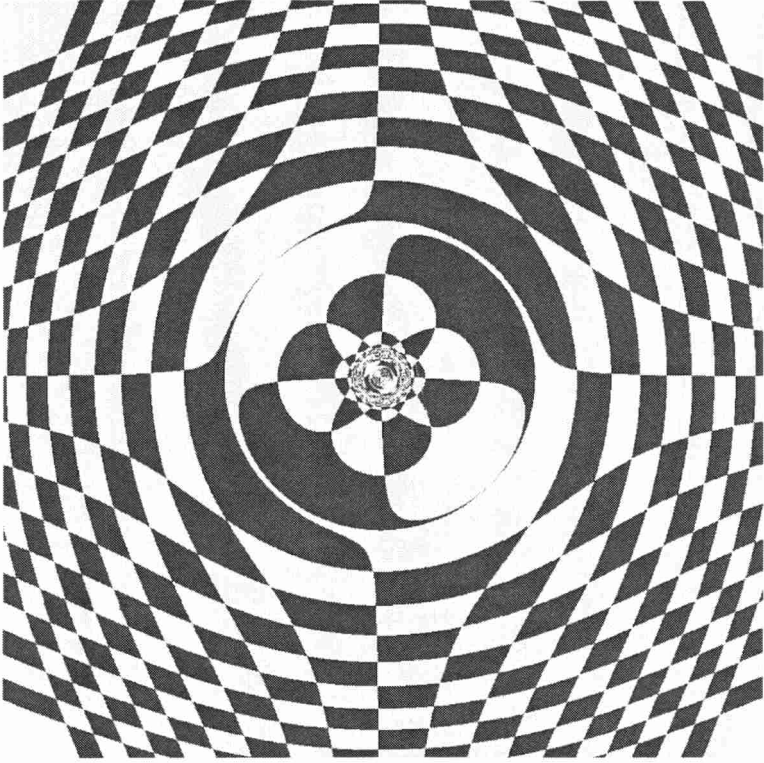


Figuur 5

Het zijn de beelden van sterrenstelsels, op zeer grote afstand in het Heelal, die vervormd worden door de voortbeweging van het licht langs de sterrenstelsels op de voorgrond. De ruimte is krom in de buurt van die witte vlekken, de grote sterrenstelsels, en de kromming van die ruimte heeft tot gevolg dat we de beelden daarachter sterk vervormd zien door het gravitatielens-effect.

De tijdruimte kan zo sterk gekromd zijn, dat hij helemaal in zichzelf ineenvouwen is. Zoiets noemen wij een *zwart gat*.

Als wij een zwart gat op veilige afstand voor een stuk kippegaas plaatsen, ontstaat door het gravitatie-lens-effect ontstaat een sterk vervormd beeld (zie *figuur 6*).



Figuur 6

En toch is er een probleem

Tot dusverre lijkt dit betoog een succesverhaal. Lijkt, want het probleem is dat wij niet weten op welke manier de aanwezigheid van materie de kromming van tijd en ruimte veroorzaakt.

De kromming van tijd en ruimte is het sterkst, waar je de meeste materie hebt. De baan van de Maan kromt zich rondom de Aarde, de baan van de Aarde om de Zon. Er moet een verband tussen tijdruimte en materie zijn, waarbij materie de kromming van tijd en van ruimte 'veroorzaakt'.

Dit betekent in natuurkundige termen, dat er een *koppeling* moet zijn tussen tijdruimte en deeltjes. Op zichzelf is dat helemaal niet zo gek; koppelingen zijn schering en inslag in de natuurkunde. Bijvoorbeeld, de koppeling tussen het elektron en het foton (lichtdeeltje) is de oorzaak van alle elektromagnetische verschijnselen in de Natuur. Maar wat zou die koppeling tussen tijdruimte en materiedeeltjes dan moeten zijn? Is er een soort 'tussendeeltje' — zoals het foton — dat die koppeling tot stand brengt? Daar zit het probleem: zoiets moet er wel zijn, maar verder weten we hierover nog helemaal niets.

Einstein heeft voor het verband tussen de aanwezigheid van materie en de kromming van tijd en ruimte een vergelijking voorgesteld. In zijn beroemde Einsteinvergelijking had hij het doelbewuste plan om de formule exact gelijk te maken aan de newtonse bewegingsvergelijkingen, althans voor bewegingen die langzaam gaan ten opzichte van de lichtsnelheid. Wij weten dat die klassieke mechanica een voortreffelijke beschrijving geeft van de wereld om ons heen, dat wil zeggen de langzame wereld. Planeten bewegen natuurkundig gezien helemaal niet snel, omdat ze een snelheid hebben die heel veel kleiner is dan de absolute snelheid van het licht.

Zoals aangegeven: er moet een koppeling zijn tussen tijdruimte en deeltjes. Die koppeling moet gedragen worden door een soort deeltje, maar dat kan alleen als de tijdruimte zelf ook een 'deeltjesstructuur' heeft. Omdat wij helemaal niet weten of die wel lijkt op de deeltjes van de materie zoals wij die nu kennen, gebruik ik opzettelijk een vage term en heb het over de *microstructuur van de tijdruimte*.

Zodra we te maken krijgen met die microstructuur, past bescheidenheid. Het begrijpen daarvan lijkt nog heel ver weg. Het ligt voor de hand om, bij het zoeken naar de micro-eigenschap-

pen van tijdruimte, te rade te gaan bij het succesverhaal uit de natuurkunde. We zijn er in de twintigste eeuw achter gekomen hoe de microstructuur van de materie werkt. Wegens het voorkomen van gehele getallen in de scheikunde (H_2O en zo), vermoedden wij vroeger dat er een deeltjesstructuur moest zijn. Ook uit de theorie van de thermodynamica (het gedrag van grote verzamelingen van deeltjes) kreeg men de indruk dat er misschien iets atoomachtigs aan de materie ten grondslag moet liggen. Daarop volgde in de twintigste eeuw de quantummechanica. Door de quantummechanica hebben wij het gedrag van de materie op microscopische schaal in formules kunnen vangen, met dramatische gevolgen (lasers, computerchips, glasvezelkabels).

Het Heelal bestaat uit deeltjes, ruimte en tijd: allemaal bouw-materiaal. Het zou een wonder zijn als materie wel een microstructuur had (atomen, elektronen, atoomkernen, protonen, quarks, enzovoorts), terwijl de tijdruimte *geen* structuur zou hebben op kleine schaal.

Wat gebeurt er als je de microstructuur van de tijdruimte probeert te beschrijven met de relativistische quantummechanica, die gebruikt wordt bij het beschrijven van elementaire deeltjes? Er gaan enorme tegenspraken ontstaan. Ik zal dit heel in het kort toelichten.

Elk deeltje in ons Heelal draagt een *lengte* met zich mee (de technische term is *Compton-lengte*). Het gaat hier niet om de afmeting van het deeltje, maar een abstract inwendig meetlatje. Dat heet meestal de 'golflengte', maar dat is eigenlijk fout. Het is een abstract 'lengte-attribuut'. Bouwen met deeltjes is iets heel anders dan bouwen met bakstenen. Je kan het lengte-attribuut van een deeltje niet veranderen door er een stuk vanaf te slaan als het niet helemaal past. Deeltjesmuren moet je bouwen uit een geheel aantal stenen. Daarom zijn er chemische elementen, en daarom combineren die in verhoudingen van gehele getallen. Er staat nooit iets als $H_{1,8}O$ of zo, maar wel H_2O . Het optreden van die gehele getallen 1, 2, 3 ... enzovoorts bemerken wij

door het optreden van 'sprongen', van *quanta*. De bijbehorende theorie heet daarom *quantummechanica*.

Een van de verbluffende gevolgen van het quantumgedrag van onze Natuur is, dat *dezelfde oorzaken niet altijd dezelfde gevolgen hebben*. Dat klinkt vreemd, maar u weet het uit eigen ervaring. Stel, u gaat 's avonds voor een vensterruit staan, u doet binnen een lamp aan, laat de gordijnen open en u kijkt naar dat venster. U ziet dan uw gezicht weerkaatst in de ruit. En *te zelfder tijd kan iemand die op straat langsloopt uw gezicht ook zien*. Als we daar even over nadenken is dat buitensporig vreemd. Want het licht dat uw gezicht verlaat, de ruit raakt, en terugkaatst naar uw oog, verlaat uw gezicht onder exact, maar dan ook exact dezelfde omstandigheden als het licht dat door die ruit heengaat en gezien kan worden door de wandelaar buiten. Dit volstrekt triviale feit, dat u duizenden keren hebt gezien, bewijst het: *dezelfde oorzaken hebben niet altijd dezelfde gevolgen*.

Je zou kunnen zeggen: misschien heeft glas kleine kanaaltjes waar een gedeelte van het licht doorheen gaat, maar nader onderzoek toont dat dit niet zo is. Het blijkt dat er een fundamentele *quantumonzekerheid* is. Het licht kaatst terug én het gaat door — dus daar staat *en*, niet: *of* het gaat door.

Een van de dramatische gevolgen daarvan is, als we dat onzekerheidsgedrag combineren met de regels van de speciale relativiteitstheorie, een soort onzekerheidsrelatie is op te stellen voor het aantal deeltjes in de ruimte. Het blijkt dat het aantal deeltjes in een wisselwerking *onbepaald* is. Met andere woorden: als ik een kubieke meter ruimte heb, is het nooit helemaal zeker dat deze perfect leeg is. Deeltjes kunnen spontaan ontstaan en vergaan in de zogenaamd lege ruimte. Descartes zei het al: *qu'on suppose vide*, de ruimte 'waarvan men wel zegt dat zij ledig is'. Het ontstaan en vergaan van deeltjes noemen wij *vacuïumfluctuaties*.

Het bovenstaande kunnen we als volgt samenvatten. Elk deeltje in ons Heelal draagt een lengte met zich mee; dat is niet de afmeting van het deeltje, maar een abstract inwendig meetlatje. *Die lengte is omgekeerd evenredig met de massa van het deeltje*. In

ons Heelal heeft elk deeltje een 'lengte-attribuut'. Maar ook de ruimte zelf heeft een lengte-attribuut; immers, we kunnen spreken over de afstand tussen twee punten. Als een karakteristieke lengte omgekeerd evenredig is met massa, *waarom weegt de ruimte dan niets?*

We kunnen uitrekenen wat de totale hoeveelheid vacuümfluctuaties is die je in een kuub ruimte zou moeten aantreffen. De vacuümfluctuaties vertegenwoordigen een zekere hoeveelheid massa (dat weten we ook uit de relativiteitstheorie: energie en massa zijn equivalent). Met andere woorden: de lege ruimte zou iets moeten wegen. Wij hebben net gezien dat de ruimte gekromd is in de nabijheid van materie. Dat zie je aan de gekromde banen van manen, planeten en sterren.

Als ik nu ga uitrekenen wat de materiedichtheid is van de vacuümfluctuaties die voorspeld worden door de regels van de quantummechanica, krijg ik een krankzinnig groot getal. De gemiddelde dichtheid van de deeltjes in het Heelal is ongeveer één proton per kubieke meter. De massadichtheid van het vacuüm is 10^{118} , een 1 met 118 nullen, maal zo groot! Dat kan helemaal niet. Er is absoluut geen enkele mogelijkheid dat dit ook maar bij benadering kan kloppen: het Heelal zou in een flits ineenstorten als er zoveel massa in zat. Met andere woorden: als we gaan kijken naar de mogelijke microstructuur van de materie en we koppelen die aan de microstructuur van tijd en ruimte, dan komen we op een tegenspraak die zo erg is als 10 tot de macht 118. Dit is de meest monumentale tegenspraak die we op dit moment hebben in de theoretische natuurkunde.

Wees blij dat er iets niet klopt

Ik wil niet de indruk wekken dat dit gigantische probleem iets is om verdrietig over te zijn. Integendeel: in de natuurkunde zijn zulke rampen altijd de voorbode van grote ontdekkingen. En ontdekkingen zullen er altijd blijven. We moeten niet arrogant worden door de successen uit het verleden, en laten wij geen geloof hechten aan kletsmajoors die beweren dat alle grote

vondsten nu wel gedaan zijn. Zeker niet. Het feit dat wij de wijsheid niet in pacht hebben, is oud nieuws. Het spoort ons aan tot verder zoeken en dieper denken. Misschien ligt het antwoord wel voor de hand, wie weet? Erwin Schrödinger, een van de aartsvaders van de quantummechanica, zei het zo: *Onze taak is niet: zien wat nog niemand gezien heeft, maar: denken wat nog niemand ooit heeft gedacht, over datgene wat iedereen kan zien.*

Uit het verhaal van de spiegelruit weten we inmiddels hoe dichtbij zulke verschijnselen kunnen liggen.

Wij moeten blijven zoeken, wij zullen blijven zoeken. Tijdens een werkbezoek aan CERN, het grote Europese onderzoeksinstituut voor deeltjesfysica in Genève, sprak ik met professor Wilson, de ontwerper van CLIC, één van de nieuwste machines om deeltjes tot hoge energie te versnellen. Ik vroeg aan hem: *Stel, je komt een dertien- of veertienjarige jongen of meisje tegen. En die vraagt: professor Wilson, geeft u mij eens een goede reden waarom ik natuurkunde zou gaan studeren. Wat zoudt u dan antwoorden?* Wilson keek mij aan en zei: *You should be so lucky, when you go home in the evening, to still have a problem to solve.*

Ik vond het een fantastische opmerking. Hoe vreselijk zou het zijn als ik op een gegeven avond thuiskom en tegen mijn vrouw zei: "Schat, de natuurkunde is af." Dat lijkt mij een ramp. Gelukkig zal dat nooit gebeuren. Ik heb altijd een probleem om op te lossen, en dat maakt mij een zeer bevoorrecht mens.

Personalia

Ger van Middelkoop studeerde wis- en natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Utrecht en promoveerde op een onderwerp bewerkt bij het toenmalige Reactor Centrum Nederland. Vanaf 1979 was hij hoogleraar natuurkunde aan de Vrije Universiteit en tevens wetenschappelijk directeur van de Sectie Kernfysica van het NIKHEF (Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-energiefysica) te Amsterdam (jaren '80) en directeur van NIKHEF van 1996 tot 2001. Sinds kort is hij met emeritaat.

Albert Postma is senior docentonderzoeker aan het Psychologisch Laboratorium, Helmholtz Instituut, Universiteit Utrecht. In het voorjaar van 2000 ontving hij van NWO een Pioniersubsidie voor zijn onderzoeksprogramma 'Spatial Cognition: Development, Underlying Representations, and Neural Basis.'

Rob Dettingmeijer doceert en onderzoekt de geschiedenis en theorie van architectuur en stedenbouw, met nadruk op de periode 1750-heden, aan de Universiteit Utrecht. (Op dit gebied publiceerde hij regelmatig in binnen- en buitenland en organiseerde hij tentoonstellingen, congressen en workshops.) Op dit ogenblik verricht hij, in samenwerking met het Nederlands Architectuurinstituut, onderzoek naar de rol van tradities in de modernisering van de architectuur en stedenbouw in de twintigste eeuw.

Joost Raessens studeerde filosofie en filmwetenschap in Nijmegen en Parijs en promoveerde in 2001 aan de Erasmus Universiteit Rotterdam op het proefschrift *Filosofie & Film. Viv®e la différence: Deleuze en de cinematografische moderniteit* en bereidt momenteel een boek voor over computergames dat in 2003 bij de MIT Press zal verschijnen. Hij is werkzaam als universitair hoofddocent bij de opleidingen Theater-, Film- en Televisiewetenschap (TFT) en Communicatie- en Informatiewetenschappen (CIW) aan de Faculteit der Letteren van de Universiteit Utrecht en is daar medecoördinator van de specialisatie Nieuwe media en Digitale cultuur. Zijn onderzoek spitst zich behalve op computergames toe op (mobiele) telecommunicatie en 'adult entertainment'.

Rudolf Rasch studeerde muziekwetenschap en psychologie aan de Universiteit van Amsterdam. Sinds 1977 is hij werkzaam als docent en onderzoeker bij de afdeling Muziekwetenschap van de Universiteit Utrecht. Zijn interesse omvat zowel de historische muziekwetenschap (met name betreffende de muziek van de zeventiende en achttiende eeuw) als de systematische muziekwetenschap (waaronder muziektheoretische en akoestische vraagstellingen).

Vincent Icke is bijzonder hoogleraar kosmologie aan de Universiteit van Amsterdam (vanwege de Stichting Bèta-Plus) en aan de Universiteit Leiden. Eén van de drie onderwerpen waar Icke op het moment onderzoek naar doet, is het ontstaan van structuur in het Heelal en de invloed van vacuümfluctuaties op de dynamica van het Heelal (de *kosmologische constante*, ofwel 'Waarom weegt de ruimte niets?').