[Wetenschap](http://zoeken.nrc.nl/?q=Wetenschap&sort=date&cat=Wetenschap)

Louter verbeeldingskracht

Wetenschappers als Charles Darwin en Albert Einstein kwamen soms tot baanbrekende inzichten met alleen gedachte-experimenten en nadenken. En zo gaat het nog altijd.

Door [Margriet van der Heijden](http://zoeken.nrc.nl/?q=%22Margriet%20van%20der%20Heijden%22&sort=date&authors=Margriet%20van%20der%20Heijden)

ZATERDAG 31 AUGUSTUS 2013

Is de wereld onbegrensd? Ja, dacht bijna 2.400 jaar geleden de Griekse wijsgeer Archytas. Stel je voor dat de wereld zomaar zou ophouden. Een mens die de ‘rand’ van de wereld had bereikt, zou dan zijn arm niet langer kunnen uitstrekken. Zo absurd is dat, stelde Archytas, dat de wereld wel oneindig moet zijn.

Dit denkbeeldige scenario van de man aan de rand van de wereld is het oudste bekende gedachte-experiment, zegt filosoof Carla Rita Palmerino. In haar oratie ‘Galilei’s adelaar en Darwins wolven’, die in maart haar hoogleraarschap aan de Open Universiteit bezegelde, noemde ze nog veel meer gedachte-experimenten die de wetenschap vooruit hebben geholpen. Denk aan Schrödingers kat die volgens quantummechanische principes dood en levend tegelijk is. Aan Parfit’s teleportatiemachine die individuen kopieert en zo het begrip persoonlijke identiteit ter discussie stelt. Of aan die adelaar van Galilei die al zwevend een steen uit zijn klauwen laat vallen en zo illustreert dat een voorwerp zijn constante horizontale beweging behoudt, ook als het valt.

Hoe zit dat tegenwoordig? Kunnen onderzoekers nog altijd tot nieuwe inzichten komen met slechts verbeelding en veel denken? Of komen moderne onderzoekers voornamelijk ‘door meten tot weten’, zoals Nobelprijswinnaar Heike Kamerlingh Onnes het in 1882 tijdens zijn oratie in Leiden formuleerde?

We vroegen het ontwikkelingspsycholoog Willem Koops (universiteitshoogleraar in Utrecht), biomedicus Hans Clevers (hoogleraar in Utrecht en president van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen), wiskundige Henk Barendregt (hoogleraar in Nijmegen en Spinozaprijswinnaar) en theoretisch fysicus Erik Verlinde (hoogleraar in Amsterdam en Spinozaprijswinnaar). En filosoof Palmerino.

**De wiskundige**

„Het is hier prachtig”, zegt wiskundige en logicus Henk Barendregt aan de telefoon vanaf het Griekse schiereiland Pelion. „Maar: wat versta je onder gedachte-experimenten?”

Hij geeft zelf antwoord. „Mag ik ze definiëren als denkbeeldige opstellingen of situaties waaraan je gaat redeneren? Dan ben ik namelijk geneigd te denken dat de hele wiskunde een gedachte-experiment is. In de wiskunde ga je immers altijd uit van gegevenheden en van een theorie over hoe die gegevenheden zich ontwikkelen, waarna je gaat redeneren wat eruit komt.”

„Misschien”, oppert Barendregt, „is de wiskunde dus zelfs wel de moeder van alle gedachte-experimenten.”

Maar dat vindt filosoof Palmerino, aan de telefoon vanuit Italië, te gemakkelijk. „Inderdaad, een gedachte-experiment geeft door strikt redeneren antwoord op een theoretische vraag. Zoals de wiskunde doet. Maar in een gedachte-experiment is bovendien sprake van een imaginair scenario en een verhaalstructuur, en dat geldt voor grote delen van de wiskunde niet.”

De wiskunde is om een andere reden belangrijk voor gedachte-experimenten, zegt zij. „De redeneerwijze is vaak aan de wiskunde ontleend. Een voorbeeld is de redering ad absurdum. Als je daarmee A wilt bewijzen, dan begin je juist met A te ontkennen, en vervolgens laat je zien dat die ontkenning onmogelijke gevolgen heeft.”

In de Euclidische meetkunde komt dat vaak voor. Van school herinneren mensen zich misschien het bewijs dat twee parallelle lijnen elkaar nooit zullen snijden. En ook Archytas’ gedachteproef over de oneindige wereld gebruikt de redenering ad absurdum. „De eerste gedachte-experimenten werkten steeds met zulke wiskundige redeneringen”, zegt Palmerino.

Sommige van die gedachte-experimenten waren weer cruciaal voor de wiskunde: zoals Zeno’s paradox waarin de snelle Achilles nooit de trage schildpad kan inhalen. Dat komt door de redering dat de som van oneindig veel stappen altijd oneindig is, zelfs al worden de stappen zelf op den duur oneindig klein. De oplossing kwam toen de zeventiende eeuwse integraalrekening toonde dat die som wél eindig is – zoals ook de dagelijkse ervaring laat zien.

**De psycholoog**

Maar niet in elke discipline maakten de strikte redenaties binnen denkbeeldig scenario’s evenveel furore. Ontwikkelingspsycholoog Willem Koops, aan de telefoon vanuit de Ardennen, kan in zijn vakgebied maar één gedachte-experiment bedenken, zegt hij. Het is het beroemde boek Émile, ou De l’éducation. In 1762 beschreef de Franse filosoof Jean-Jacques Rousseau daarin de ontwikkeling en de ideale opvoeding van het fictieve jongetje Émile, en zette die af tegen de in zijn ogen decadente Franse cultuur.

Met recht een gedachte-experiment, vindt Koops, want Rousseau baseerde zijn opvoedkundige ideeën niet op observaties. „Hij had een hekel aan kinderen. Zijn eigen zes kinderen bracht hij meteen na hun geboorte naar het kindertehuis.”

Ironisch genoeg werd juist zijn Émile daarna in de verlichte westerse wereld een leidraad voor de opvoeding. „Daarbij hielp natuurlijk”, zegt Koops, „dat Rousseau’s boek ingebed was in de brede cultuurhistorische stroom van de Franse Revolutie en van de Verlichting. Rousseau had een fijn afgestelde antenne voor wat er in de literatuur en wetenschap leefde en schreef prachtig. Dat maakte zijn boek invloedrijk. Parijse dames liepen ermee onder de arm, en tijdens de Franse Revolutie las men er op de barricaden passages uit voor. Welk ander boek overkomt zoiets?”

Het is ook geen wonder, vervolgt Koops, dat de befaamde Zwitserse pedagoog Jean Piaget aan het begin van de twintigste eeuw bij kinderen inderdaad de ontwikkelingsfasen terugvond, die Rousseau al had beschreven. „In de verlichte Westerse wereld waren kinderen in toenemende mate naar Rousseau’s ideeën gemodelleerd! Zo laat Rousseau zien dat je de werkelijkheid kunt veranderen vanuit de leunstoel.”

Maar Palmerino is streng: „Ik vind Émile geen gedachte-experiment, zo min als politieke utopieën. Het gaat weliswaar om een imaginair scenario, maar Rousseau gebruikt dat uitsluitend om zijn gedachtegoed te illustreren. Hij geeft niet, streng redenerend, een eenduidig antwoord op een vooraf gestelde theoretische vraag. Zo ontbreekt een belangrijk kenmerk van gedachte-experimenten.”

Misschien, denkt psycholoog Koops, is theoretiseren, zoals via gedachte-experimenten, in de psychologie lastiger dan in bijvoorbeeld de fysica. Menselijk gedrag is ingewikkeld, en de praktijk weerbarstig. Om iets te noemen: zodra psychologen inzicht in gedrag hebben verkregen, kunnen mensen aan de hand van dat inzicht hun gedrag weer bijstellen. „We bedenken heus slimme proeven, en in andere takken van de psychologie zelfs gedachte-experimenten, maar psychologen stuiten nu eenmaal niet makkelijk op harde wetmatigheden.”

**De biomedicus**

„Mijn vak is vooral empirisch”, zegt biomedicus Hans Clevers aan de telefoon, kort voordat hij naar Rusland zal reizen. Dat komt doordat in de natuur, in de evolutie, het toeval overheerst, zegt hij. Toeval maakt gedachte-experimenten nutteloos. „Zo weten we nu dat in de loop van de evolutie dieren vanuit het water het land op zijn getrokken. Daartoe moest de natuur iets ontwikkelen dat deze dieren in staat stelde om zuurstof uit de lucht te halen. In een leunstoel kun je daarvoor wel honderd mechanismen bedenken, maar de evolutie is door toeval tegen één daarvan aangelopen.” En tja, wat heb je dan aan 99 andere mogelijke oplossingen?

Hij formuleert het anders: „Waarom lopen we op twee benen en niet op vier? Waarom rollen we niet? Daar ligt geen grote wetmatigheid onder. Er is slechts een kans dat een bepaalde oplossing waar is. Het had ook anders kunnen gaan.”

Toch heeft één bioloog wél een doorslaggevend gedachte-experiment bedacht, zegt Clevers. Dat is Charles Darwin die de evolutietheorie ontwikkelde en zo „door diep nadenken de misschien enige grote wetmatigheid in de natuur doorgrondde.”

Clevers: „Al voordat hij met de Beagle naar de Galapagoseilanden reisde, had Darwin eenden en schapen gefokt. Hij wist dus dat je door kruisen bepaalde eigenschappen kunt uitselecteren. En toen Darwin zag dat vinken op het ene Galapagos-eiland gekromde bekken hadden, en op het andere rechte, bedacht hij dat ook de natuur zulke vormen misschien uitselecteert. Let wel, Gregor Mendel had zijn erfelijkheidswetten nog niet gepubliceerd, DNA was nog lang niet ontdekt, en Darwin kon geen experimenten doen, want daarvoor verloopt de evolutie te langzaam. Op zijn stoel beantwoordde Darwin dus de vraag: hoe ontwikkelen vinken met een rechte bek zich tot vinken met een gekromde bek? Alleen al het stellen van die vraag, in die tijd, was bijzonder.”

Nu stemt Palmerino in. „Darwin gaf een eenduidig antwoord op die vraag door in imaginaire scenario’s versneld evolutionaire processen af te spelen die normaal miljoenen jaren in beslag nemen. Dat laatste kenmerkt veel gedachte-experimenten: dat ze een situatie beschrijven, die je in werkelijkheid niet kunt meemaken.”

Net als Galileo Galilei en andere zeventiende-eeuwse wetenschappers, gebruikte Darwin gedachte-experimenten bovendien om anderen te overtuigen van de juistheid van zijn inzicht. In zijn grote werk uit 1859, On the origin of species, legt Darwin bijvoorbeeld het begrip ‘natuurlijke selectie’ uit door denkbeeldige populaties wolven te beschrijven waarvan steeds de slimste en snelste jagers overleven – inderdaad de wolven uit Palmerino’s oratie.

Toch stappen moderne biologen niet vaak meer in die traditie, zegt Clevers. „Er zijn wel recente gedachte-experimenten over het evenwicht tussen prooi- en roofdieren, maar dat zijn haast economische modellen...”, ironisch, „en we kennen allemaal de voorspellende waarde daarvan.”

**De natuurkundige**

Dan de natuurkunde. Daarin spelen gedachte-experimenten een cruciale rol, zegt theoretisch fysicus Erik Verlinde. Juist daarom houdt hij van zijn vak. „Ik vind het mooi dat je door alleen maar nadenken tot vernieuwende inzichten kunt komen.”

Verlindes favoriet komt uit de koker van Albert Einstein, „een meester in het bedenken van gedachte-experimenten.” Het experiment vormde de opmaat voor Einsteins algemene relativiteitstheorie.

Einstein vergeleek in gedachten twee raamloze liften. De ene stond stil op aarde. De ander werd ver weg in de lege ruimte aan een denkbeeldig touwtje omhooggetrokken – precies zo hard dat de lift met dezelfde versnelling omhoog ging, als waarmee voorwerpen naar de aarde vallen.

Mensen in de lift, zo redeneerde Einstein, konden dus niet uitmaken of zij op aarde stonden of door de ruimte werden gesleept. Ze werden met dezelfde kracht tegen de liftbodem gedrukt en als ze een voorwerp loslieten, dan bereikte dat in beide gevallen even snel de liftbodem. Op aarde doordat het viel. In de ruimte doordat de liftvloer omhoog kwam.

Het bracht Einstein ertoe te veronderstellen dat een zwaartekrachtsveld en een situatie van versnelling gelijkwaardig zijn. En dat ‘equivalentieprincipe’ paste hij daarna ook toe op denkbeeldige liftbewoners die maten hoe een lichtstraal zijwaarts door hun lift schoot. Zo’n lichtstraal moest volgens het principe de bewegende én de stilstaande lift op dezelfde plek verlaten. Maar dan móest, concludeerde Einstein, licht dus in een zwaartekrachtsveld worden afgebogen. En dan móesten klokken die de reistijd van het licht maten, in het zwaartekrachtsveld langzamer lopen om op dezelfde reis uit te komen als in de bewegende lift.

Zo werd de algemene relativiteitstheorie geboren waarin Einstein ruimte en tijd bijeenbracht, en waarin hij zwaartekrachtsvelden gelijk stelde aan krommingen van die ‘ruimtetijd’. „En het mooie is”, zegt Palmerino, „dat fysici de inzichten uit gedachte-experimenten vervolgens ook vaak experimenteel kunnen toetsen.” Sir Arthur Eddington bewees in 1919 de juistheid van Einstein’s idee toen hij tijdens een zonsverduistering liet zien dat zwaartekrachtsvelden inderdaad lichtstralen afbuigen. „In de filosofie is dat anders. Daar blijft het meestal bij denken.”

Het lift-experiment had bovendien een theoretisch vervolg, zegt Verlinde. „Stephen Hawking en Jacob Bekenstein vroegen zich af wat er gebeurt als je die denkbeeldige lift blijft versnellen tot hij met de lichtsnelheid reist.” Door aan dat denkbeeldige touwtje te blijven trekken, of door de lift in een denkbeeldig zwart gat te gooien.

Verlinde: „Uiteindelijk zouden klokken dan stil gaan staan. Maar: als de tijd niet loopt, kunnen deeltjes- en lichtgolven geen frequentie meer hebben. Dan kunnen ze geen energie meer dragen en omdat energie en massa volgens Einstein equivalent zijn, hebben ze dan geen massa meer.” Het leidt tot een absurde situatie die in tegenspraak is met de quantummechanica en de wetten van de thermodynamica.

De uitweg was het idee dat er spontaan paren van elementaire deeltjes verschijnen en weer verdwijnen in de lege ruimte, al dan niet rond een zwart gat. Verlinde: „Zo verbonden Hawking en Bekenstein de ruimtetijd met materie – met die elementaire deeltjes –, en dat is iets wat we nu dieper proberen te doorgronden.”

Allemaal vanuit de leunstoel, inderdaad, en de methode is karakteristiek voor veel fysische gedachte-experimenten, zegt Verlinde. „Je combineert twee inzichten en laat zien dat ze tot een tegenspraak leiden. Het oplossen van die tegenspraak geeft daarna nieuw inzicht.”

Klopt, zegt Palmerino. „Het combineren van twee inzichten tot een paradox is, naast de redering ad absurdum, de meest gebruikte redeneerwijze in gedachte-experimenten.” Zelf noemt zij gedachte-experimenten „het meest wetenschappelijke instrument van filosofen en het meest filosofische instrument van wetenschappers”.

Ze voegt daaraan toe dat tot in de vroegmoderne tijd helemaal niet zo’n strikt onderscheid werd gemaakt tussen natuurwetenschap en filosofie. „De zeventiende-eeuwse filosoof John Locke bedacht net zo makkelijk gedachte-experimenten over persoonlijke identiteit als over vacuüm of kosmologie. Toen daarna een vak als natuurkunde zich emancipeerde, behielden fysici die traditie.

„De filosofie is dus de ware moeder van het gedachte-experiment.”

**GEDACHTE-EXPERIMENTEN**

Een heldere vraag, een denkbeeldig draaiboek en een eenduidig antwoord

Een gedachte-experiment is een experiment dat in gedachten wordt uitgevoerd.

Maar zo’n experiment kan niet zomaar van alles zijn. Zo kun je je proberen voor te stellen hoe je kamer eruitziet als je de muur knalrood verft, maar dat een gedachte-experiment noemen is overdreven.

Een waar gedachte-experiment wordt vaak met drie kenmerken getypeerd: Het moet een imaginair scenario en een verhaalstructuur hebben; het moet een strikte redeneerwijze volgen én het moet eenduidig antwoord geven op een heldere vraag. Dat antwoord mag ook een paradox zijn - dat weer wel.

Wetenschapsfilosoof Thomas Kuhn noemde gedachte-experimenten een van de belangrijkste instrumenten van wetenschappers - vooral als ze leiden tot een paradox, omdat die hen dwingt hun concepten te herzien.

Maar filosoof Kathleen Wilkes vond ze vaak zo losgezongen van de werkelijkheid dat ze irrelevant werden. Bijvoorbeeld: om inzicht te krijgen in ‘persoonlijke identiteit’ kun je jezelf zien als een van talloze kopieën, en van daaruit gaan redeneren. Te buitenissig om nog zinnig te zijn, vond zij. Zeker wanneer je de inzichten die je zo verwerft, evenmin aan de praktijk kan toetsen.