



Werkelijkheid in Wording

Een Voortzetting van het Debat over de Metafysische Interpretatie van de Kwantummechanica

Auteur: Luka Vinck

Studentnummer: 548175

Hoofdstudie: Technische Natuurkunde

Begeleider: dr. S. van Tuinen

Adviseur: dr. T.K.A.M. de Mey

Datum: 2 april 2022

Woorden: 15399

Inhoud

1	Inleiding.....	3
1.1	Van Debat naar Dogma	3
1.2	Doel, Structuur en Methodologie.....	4
2	De Kopenhageninterpretatie.....	7
2.1	Tweespletenexperiment.....	7
2.2	Complementariteit	8
2.2.1	Causaliteit en Ruimtetijd	9
2.2.2	Heisenberg's Onzekerheidsrelatie	10
2.2.3	Tweespletenexperiment Herzien	10
2.3	Overeenkomsten met Kant.....	11
3	De (Meta)fysica van Albert Einstein.....	13
3.1	EPR-Paradox	14
3.1.1	Bell-test.....	15
3.2	Einsteins eigen incompleetheidsargument	16
3.3	Einstein en Spinoza	18
3.3.1	Spinoza's Metafysica.....	18
3.3.2	Natuurkunde en de Werkelijkheid	19
3.3.3	Plaats van het Subject.....	20
4	De Filosofie van Individuatie.....	22
4.1	Nietzsche: De Psychologie van het 'Ding'	22
4.2	James: Werkelijkheid van Relaties	23
4.3	Bergson: Intuïtieve waarheid.....	24
4.4	Simondon: Het Worden van Zijn	26
4.4.1	Pre-individuele Werkelijkheid.....	26
4.4.2	Individuatie als Transductieve Operatie.....	26
4.4.3	Kennis en Informatie.....	28
4.5	Individuatie in de Kwantumwereld	29
4.5.1	Kwantum als Beschrijving van een Pre-individuele Werkelijkheid.....	29
4.5.2	Stiegler en Bohr: Kennis is Performatief.....	30
4.5.3	Kritiek van Barthélemy.....	31
5	Everett's Alternatief: een Relatieve Werkelijkheid	32
5.1	Theorie van de Universele Golffunctie.....	32

5.1.1	Het Meetproces	32
5.1.2	Waarneming	33
5.1.3	Informatie	34
5.2	Discussie van de Metafysische Implicaties	35
5.2.1	Schrödinger's Kat in de Kopenhageninterpretatie	35
5.2.2	Oneindige werkelijkheid	36
5.2.3	Trajecten van waarnemers	37
5.2.4	Individuatie door correlatie	37
5.2.5	Overgang naar de klassieke wereld	39
6	Conclusie.....	40
	Literatuurlijst.....	42

1 Inleiding

“Normaal gesproken kan een natuurkundige het filosoferen beter aan een filosoof overlaten”, schreef Einstein in 1936, “maar in een tijd waarin de fundamenteën van de natuurkunde zelf ter discussie komen te staan kan dit niet langer juist zijn.”¹ Zo was de situatie in de jaren 30: Lange tijd vormde de klassieke mechanica een solide basis voor de natuurkunde, maar de komst van zowel de kwantummechanica als Einsteins eigen relativiteitstheorie hadden de onvolkomenheid van dit fundament blootgelegd. Zij stelden hier echter geen eenduidig nieuw wereldbeeld tegenover. Integendeel, in bepaalde opzichten leken de twee onverenigbaar. Het is dus de taak van de natuurkundige om op zoek te gaan naar een nieuw fundament en de concepten die hij gebruikt te evalueren, vond Einstein, omdat hij zelf het beste weet “waar de schoen wringt”².

1.1 Van Debat naar Dogma

Voor Einstein wrong de schoen bij de kwantummechanica. Alhoewel, niet zozeer bij de theorie *ansich*, de juistheid waarvan hij niet in twijfel trok, maar bij de dominerende Kopenhagen interpretatie hiervan, zoals deze onder leiding van Niels Bohr in de jaren 20 was geformuleerd. Bohr stelde dat een werkelijkheid onafhankelijk van de waarnemer niet te definiëren is.³ Een deeltje waarnaar niet gekeken wordt heeft simpelweg geen positie of snelheid; pas bij het doen van een waarneming worden potentiële eigenschappen geactualiseerd. Einstein daarentegen zag het juist als de taak van de natuurkunde om een waarnemer-onafhankelijke werkelijkheid te beschrijven.⁴ En hij was ervan overtuigd dat deze werkelijkheid compleet deterministisch was. Wat volgde was een diepgaand debat over wat werkelijkheid is, en in welke mate wij daar toegang tot hebben.

Bohr wist echter al snel vrijwel de gehele natuurkundige gemeenschap achter zich te krijgen – en dat bleef decennialang onveranderd. John F. Clauser, een van de weinige natuurkundige die in de jaren 70 nog wel vraagtekens bij de Kopenhageninterpretatie durfde te zetten, vergelijkt de situatie in de natuurkunde na de oorlog met de anticommunistische heksenjacht van Joe McCarthy: “Elk open onderzoek naar de wonderen en eigenaardigheden van de kwantummechanica en kwantumverstremming dat buiten de rigide partijlijn ging was praktisch verboden door het bestaan van verschillende religieuze stigma’s en sociale druk, die samengenomen neerkwamen op een evangelische kruistocht tegen zulk denken.”⁵ Iemand die zich wel kritisch opstelde tegenover de kwantumtheorie, werd bestempeld als een ‘charlatan’ en moest vrezen voor zijn carrière. Niet onterecht stelde Murray Gell-Mann in

¹ Albert Einstein, “Physics and Reality,” *Journal of the Franklin Institute* 221, no. 3 (1936): p. 349.

² *Ibid.*

³ Niels Bohr, “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, *Nature* 121, no. 3050 (1928): p. 580.

⁴ Albert Einstein, “Autobiographical Notes”, in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, red. Paul Arthur Schilpp (New York: MJF books, 1970), p. 81.

⁵ John F. Clauser, “Early History of Bell’s Theorem”, in *Quantum [Un]speakables*, red. R.A. Bertlmann en A. Zeilinger (Berlijn: Springer, 2002): p. 62.

zijn Nobel-lezing van 1969 dat Niels Bohr een hele generatie van natuurkundigen had “gehersenspoeld.”⁶

Het is ook om deze reden dat een alternatieve interpretatie van de kwantummechanica die Hugh Everett III in 1957 formuleerde initieel geen draagvlak vond. Gedesillusioniseerd switchte de natuurkundige van de academische wereld naar het Pentagon. En toen hij in 1982 stierf aan een hartaanval, kon hij niet meer meemaken hoe zijn ‘veel-werelden’ interpretatie uiteindelijk toch serieus genomen werd.⁷ De theorie blinkt uit door haar logische simpliciteit; ze geeft geen speciale status aan de waarnemer, en maakt geen onderscheid tussen de ervaringswereld en een onderliggende ‘echte’ wereld.

Toch is de Kopenhageninterpretatie nog steeds dominant. Tenminste, misschien kunnen we tegenwoordig beter spreken van een agnostische houding. Het is niet zozeer dat de religieuze stigma’s die Clauser noemde nog zo sterk zijn; de discussie rond de metafysische implicaties van de theorie is simpelweg op de achtergrond geraakt. Ik kan uit mijn eigen ervaring als natuurkundestudent zeggen dat vragen als ‘Wat is de golf functie?’, ‘Wat geldt als een waarnemer?’ of ‘Wat is de relatie tussen de klassieke wereld en de kwantumwereld?’ niet of nauwelijks aan bod kwamen. De focus in de academische wereld is verschoven naar technologische toepassingen. En hier leent de Kopenhageninterpretatie zich prima voor – alhoewel nu ook de oorspronkelijke nuance van de theorie overbodig lijkt en langzaam verdwijnt. We leren simpelweg dat de golf functie ‘vervalt’ bij het doen van een waarneming, wat dat ook moge betekenen.

Maar dit betekent niet dat er sprake is van een nieuw fundament: de algemene relativiteitstheorie en kwantummechanica zijn nog altijd onverenigbaar, en zowel rond de Kopenhageninterpretatie als rond alle alternatieven zijn een hoop onbeantwoorde vragen. Daarom voel ook ik de noodzaak tot filosoferen. Hiermee bedoel ik dan niet alleen de filosofie als vakgebied, maar juist ook een wijsgerige houding naar de wereld toe. De beroemde fysicus Pauli zei ooit: “Je zou evenmin je hoofd moeten breken over vragen over het bestaan van iets waar je toch niks van af kan weten, als over de eeuwenoude vraag hoeveel engelen op de punt van een naald kunnen zitten.”⁸ Ik wil deze vragen juist wel stellen, want de schoen wringt nog steeds.

1.2 Doel, Structuur en Methodologie

Het doel van dit onderzoek is om de discussie tussen Einstein en Bohr nieuw leven in te blazen, en terug te gaan naar de vraag hoe we de kwantummechanica vanuit een metafysisch oogpunt moeten interpreteren. Er zal worden betoogd dat hoewel de Kopenhageninterpretatie een coherent raamwerk vormt om de kwantummechanica in te begrijpen – die voor praktische doeleinden zeker volstaat – deze vanuit een wijsgerig oogpunt niet de voorkeur verdient. In plaats daarvan vormt de theorie van Everett een beter

⁶ Geciteerd in: Manjit Kumar, *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality* (New York: W.W. Norton & Company, 2010): p. 360.

⁷ *Ibid.*

⁸ Pauli parafraseerde hier Otto Stern in een brief aan Born, opgenomen in: Max Born en Albert Einstein, *The Born-Einstein Letters* (Londen: The MacMillan Press, 1971): p. 128.

alternatief. Hierbij baseren we ons specifiek op de metafysische traditie die niet een wereld van *zijn*, maar een wereld in *wording* vooropstelt.

Het tweede hoofdstuk zal eerst de originele Kopenhageninterpretatie uiteenzetten zoals deze door Bohr is geformuleerd. We zullen zien dat zijn theorie te plaatsen is in de metafysische traditie van Kant. Vervolgens gaat het derde hoofdstuk in op Einsteins bezwaren tegen de Kopenhageninterpretatie. Einstein was een groot bewonderaar van Spinoza, wiens filosofie we zullen gebruiken om Einsteins denken beter te doorgronden. Uiteindelijk moeten we concluderen dat Einstein geen coherent alternatief weet te formuleren, maar wel terechte vraagtekens plaatst bij de interpretatie van Bohr. De metafysische implicaties van de kwantumtheorie komen uiteindelijk neer op een probleem van individuatie: aan welke delen van de werkelijkheid kunnen we een onafhankelijk bestaan toeschrijven?

In het vierde hoofdstuk wordt dit probleem vanuit vier filosofen benaderd: Nietzsche, James, Bergson en Simondon. Nietzsche is één van die filosofen – net als Kant en Spinoza – die niet alleen een bepaald idee vertegenwoordigen, maar een hele beweging in de filosofie. Bij Nietzsche bestaat deze beweging uit een omkering van het Platonisme – dat zo sterk doorleeft in de traditie van Kant en het westerse denken in het algemeen. Dit houdt in dat de waarheid niet in een andere wereld wordt geplaatst; de enige ‘echte’ wereld is de wereld die we ervaren, en wat we ervaren is een wereld die continu in wording is. Deze ideeën werken door in het denken van James, Bergson en Simondon. Vanuit hun filosofieën zal worden betoogd dat we niet moeten uitgaan van een wereld die bestaat uit individuen met vaste identiteiten, maar dat we juist het proces waarin het individu wordt gevormd als primordiaal moeten beschouwen.

Het vijfde hoofdstuk presenteert dan de alternatieve interpretatie van Everett. Ook hij beschrijft een wereld in wording en keert zich tegen het Kantiaanse denken van Bohr. Everett kent geen speciale status aan de waarnemer toe; zijn theorie postuleert enkel de deterministische ontwikkeling van de golf functie volgens de Schrödingervergelijking, met als gevolg een wereld die wordt gekenmerkt door de continue creatie van nieuwe mogelijkheden, en waarin individuen met vaste eigenschappen enkel een relatieve werkelijkheid zijn. Dit sluit goed aan bij de metafysica van de hierboven genoemde filosofische beweging, maar ook bij het deterministische wereldbeeld van Spinoza. Tot slot kan dus in het zesde hoofdstuk worden geconcludeerd dat vanuit de eerdergenoemde filosofische overwegingen deze interpretatie de voorkeur verdient.

Buiten deze Inleiding en de Conclusie zal worden geprobeerd om de verschillende hoofdrolspelers zo veel mogelijk zelf aan het woord te laten. Alhoewel ik natuurlijk een narratief bouw dat naar een zekere conclusie toewerkt, en dus een bepaalde richting op stuur, tracht ik als verteller waar mogelijk een afstandelijke houding aan te nemen, zodat de ideeën op gelijke voet naast elkaar worden geplaatst en de lezer zelf zijn oordeel kan vellen.

Dit betekent ook dat het onderzoek zich zo veel mogelijk beperkt tot primaire literatuur, met enkele uitzonderingen: Het populairwetenschappelijke boek van Manjit Kumar over de geschiedenis van de kwantummechanica wordt gebruikt om het debat tussen Einstein en Bohr in een historische context te plaatsen. Ook komen in het derde hoofdstuk Einstein-

kenners Don Howard en Arthur Fine prominent aan bod, welke de achterliggende ideeën in Einsteins kritiek uitgebreid geanalyseerd hebben; en worden in de discussie rond Simondon een aantal ideeën van Bernard Stiegler en Jean-Hugues Barthélémy besproken. Dit laatste met als voornaamste redenen dat er nog weinig teksten van Simondon zelf uit het Frans vertaald zijn, en deze twee aanhangers van zijn traditie specifiek ingaan op de relatie van zijn filosofie tot de kwantummechanica.

Natuurlijk biedt deze selectie van denkers maar een beperkt perspectief op de complexe wereld van de kwantummechanica, en de metafysica in het algemeen. Maar ik hoop op deze manier de discussie tussen Einstein en Bohr voort te kunnen zetten, door er een nieuw perspectief op te bieden.

2 De Kopenhageninterpretatie

In 1927 was de Deense natuurkundige Niels Bohr de eerste die een coherente interpretatie van de kwantummechanica wist te formuleren, waarin hij de raadselachtige ontwikkelingen van de voorgaande jaren bijeenbracht.⁹ Vooral de golf-deeltjes dualiteit van de werkelijkheid op haar kleinste niveau was voor wetenschappers destijds een steeds groter wordend enigma. Al sinds de tijd van Newton en Huygens woedde een debat over de vraag of licht een golf was, of uit deeltjes bestond. De elektromagnetische theorie van Maxwell uit de 19^e eeuw – ondersteund door verschillende experimenten – leek deze discussie definitief te hebben beslecht: licht was een golf. Maar in 1905 toonde Einstein aan dat het foto-elektrisch effect alleen verklaard kon worden door het bestaan van een fundamenteel lichtdeeltje. Daarnaast bestond al sinds de Grieken het idee dat materie uit fundamentele deeltjes bestond, wat werd bevestigd door de ontdekking van het elektron in 1897 en de atoomkern in 1911. Toen De Broglie in 1924 echter liet zien dat alle materie zich ook als golf gedroeg, stelden dit natuurkundigen opnieuw voor een raadsel.¹⁰

2.1 Tweespletenexperiment

Dat deze dubbelzinnigheid van de natuur niet te rijmen valt met de normale manier van denken – in ieder geval in de natuurkunde – kan het beste worden geïllustreerd met een voorbeeld. Aan het begin van de 19^e eeuw toonde Thomas Young met zijn beroemde tweespletenexperiment als eerste het golfkarakter van licht aan.¹¹ Hij scheen monochromatisch licht op een niet-doorlatend scherm met daarin twee dunne spleten. Achter het scherm stond een tweede, wit scherm, waarop dan een afwisselend patroon van lichte en donkere strepen zichtbaar werd. Dit verschijnsel kon enkel worden verklaard door diffractie en interferentie – twee typische golfverschijnselen.

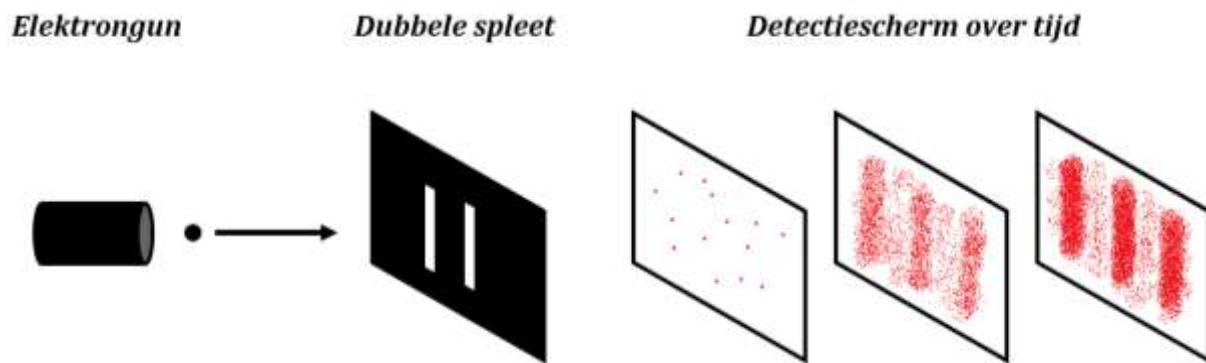
Later is het experiment in vele vormen herhaald. Ook wanneer een stroom deeltjes, zoals bijvoorbeeld elektronen, op de spleten werd afgevuurd ontstond hetzelfde patroon. Iets wonderbaarlijks gebeurde echter wanneer de bron zo werd afgesteld dat deze niet meer dan één deeltje tegelijk uitzond. Zo'n deeltje kan dan door één van de twee spleten het detectiescherm bereiken en wordt daar zichtbaar als een stip – zoals men van een deeltje zou verwachten. Deze stippen zijn in eerste instantie schijnbaar willekeurig over het scherm verdeeld. Maar naarmate na verloop van tijd meer deeltjes het detectiescherm bereiken, wordt langzaam weer hetzelfde interferentiepatroon zichtbaar (zie Figuur 1).¹²

⁹ Bohr zette deze interpretatie voor het eerst uiteen tijdens zijn zogenaamde 'Como lezing', welke later is gepubliceerd in *Nature*: Bohr, "The Quantum Postulate and the Recent Development in Atomic Theory", pp. 580-590.

¹⁰ Kumar, *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*, pp. 364-373.

¹¹ Thomas Young, "The Bakerian Lecture. Experiments and Calculations Relative to Physical Optics," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 94 (1804): pp. 1-16.

¹² Zie bijvoorbeeld: A.Tonomura et al., "Demonstration of Single-Electron Build-up of an Interference Pattern," *American Journal of Physics* 57, no. 2 (1989): pp. 117-120.



Figuur 1 Het beroemde tweespletenexperiment illustreert de golf-deeltjes dualiteit van elektronen. De elektro gun vuurt per keer een enkel elektron af, dat door een van de twee spleten het detectiescherm kan bereiken. Elk elektron dat het detectiescherm bereikt wordt weergegeven met een stip, waarbij het elektron zich gedraagt als een deeltje. Naarmate meer elektronen het detectiescherm bereiken ontstaat een interferentiepatroon, een typisch golfoverschijnsel.

Wat is hier aan de hand? Een deeltje zou ten alle tijden een goed gedefinieerde positie moeten hebben, wat lijkt te kloppen op het moment van afvuren en wanneer het deeltje het detectiescherm bereikt. Maar daartussen gedraagt het deeltje zich als een golf, die door beide spleten gaat en met zichzelf interfereert – anders zou het geen interferentiepatroon kunnen veroorzaken.¹³ De stelling ‘het deeltje gaat door één van de twee spleten’ lijkt dus onhoudbaar.

Stel nu dat we een manier bedenken om te kijken door welk van de twee spleten elk elektron gaat – bijvoorbeeld door een sterke lichtbron achter de spleten te plaatsen, waardoor de fotonen worden verstrooid wanneer er een elektron langskomt. In dat geval zien we duidelijk dat elk elektron door één van de twee spleten gaat. Maar, tegelijkertijd is ook het interferentiepatroon verdwenen. Zodra we het licht uitzetten is het interferentiepatroon weer terug.¹⁴ Het lijkt of het kijken zelf de werkelijkheid beïnvloedt.

2.2 Complementariteit

Dat is volgens Bohr precies wat er aan de hand is. Zijn antwoord op de golf-deeltjes dualiteit is gebaseerd op het idee van complementariteit: er is, zo stelt hij, “een fundamentele beperking in de klassieke natuurkundige ideeën wanneer deze worden toegepast op atomaire fenomenen.”¹⁵ Onze interpretatie van experimentele resultaten berust echter volledig op deze klassieke concepten, met als gevolg dat er bij een waarneming altijd sprake is van een “inherente irrationaliteit.”¹⁶ Maar, zegt Bohr, dit betekent niet dat de verschillende klassieke interpretaties van de onderliggende werkelijkheid tegenstrijdig zijn. Integendeel,

¹³ Dit kan worden geverifieerd door achtereenvolgend één van de twee spleten af te sluiten. In dat geval ziet men geen interferentiepatroon verschijnen, wat betekent dat dit patroon niet het resultaat kan zijn van deeltjes die door één van de twee spleten gaan.

¹⁴ Richard Feynman, “Probability and Uncertainty – the Quantum Mechanical view of Nature,” in *The Character of Physical Law* (London: British Broadcasting Cooperation, 1965): pp. 140-141.

¹⁵ Bohr, “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, p. 580.

¹⁶ *Ibid.*

ze vullen elkaar juist aan daar waar de anderen tekortschieten: het zijn complementaire beelden van de werkelijkheid.

2.2.1 *Causaliteit en Ruimtetijd*

De klassieke natuurkunde wordt volgens Bohr gekarakteriseerd door een samenkomst van het idee van causaliteit en de beschrijving van fenomenen in ruimtetijd. Het concept van een deeltje hoort bij het denken in causaliteit. Dit idee vooronderstelt namelijk, zoals Nietzsche al zei¹⁷, een 'ding' dat iets 'doet' – het deeltje 'vliegt', 'bots't', 'neemt op', 'staat af' met als gevolg de uitwisseling van energie en impuls. Causaliteit staat ons dus toe om te denken in termen van behoudswetten. Het concept van een golf daarentegen hoort bij de ruimtetijd beschrijving. De evolutie van dingen in tijd en ruimte wordt beschreven door een golfvergelijking (differentiaalvergelijking), waarbij er niet sprake is van een scherp gedefinieerd individu maar een golf die zich uitspreidt in ruimtetijd. In de ruimtetijd beschrijving staat het superpositieprincipe centraal, waarbij verschillende mogelijkheden elkaar niet uitsluiten maar naast elkaar bestaan, letterlijk 'op elkaar worden geplaatst', en de wet van het uitgesloten midden – het deeltje is op positie x of niet op positie x – in het algemeen niet meer geldt.

In de klassieke natuurkunde kunnen deze concepten tegelijkertijd worden toegepast. Maar in de kwantummechanica zijn ze complementair en sluiten ze elkaar uit. De essentie van de kwantummechanica, zo stelt Bohr, wordt gevormd door het idee dat elke waarneming een interactie met het systeem impliceert. Dit heeft verregaande consequenties. De definitie van de toestand van een systeem impliceert dat we deze kunnen isoleren – oftewel dat deze vrij is van externe invloeden. Maar hiermee wordt de mogelijkheid tot een waarneming uitgesloten, en "verliezen de concepten van tijd en ruimte dus hun directe betekenis."¹⁸ Omgekeerd betekent een waarneming dat een ondubbelzinnige definitie van een systeem onmogelijk is, met als gevolg dat er "geen sprake kan zijn van causaliteit in de gebruikelijke zin van het woord."¹⁹

De causale beschrijving en ruimtetijd beschrijving van een fenomeen symboliseren dus de idealisatie van respectievelijk definitie en waarneming. De gelijktijdige toepassing van deze concepten in de klassieke natuurkunde wordt verantwoord met het feit dat de invloed ten gevolge van de waarneming op macroscopische schaal verwaarloosbaar klein is. Maar op (sub)atomaire schaal is dit niet het geval, waardoor geen objectief onderscheid kan worden gemaakt tussen objectstelsel en meetstelsel, en deze niet langer een onafhankelijke werkelijkheid bezitten.

¹⁷ Volgens Nietzsche was dit echter een van de grootste fouten in het menselijk denken, zie: Friedrich Nietzsche, "The Four Great Errors," in *Twilight of the Idols*, vert. Richard Polt (Indianapolis: Hackett Publishing Company, 1997): p. 32.

¹⁸ Bohr, "The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory", p. 580.

¹⁹ *Ibid.*

2.2.2 Heisenberg's Onzekerheidsrelatie

In het formalisme van de kwantummechanica komt deze fundamentele beperking van de klassieke concepten tot uiting in Heisenberg's onzekerheidsrelatie.²⁰ Deze stelt dat het product van twee canoniek geconjugeerde variabelen²¹ – zoals bijvoorbeeld positie en impuls, of tijd en energie – altijd groter is dan een zekere constante.²² Dit betekent dat deze variabelen niet tegelijkertijd scherp gedefinieerd kunnen zijn. Wanneer bijvoorbeeld de positie van een deeltje exact bekend is, kan de impuls dat niet zijn, maar moet deze een onzekerheid hebben die minstens gelijk is aan de bovengenoemde constante. Omgekeerd geldt hetzelfde: wanneer de impuls exact bekend is, kan de positie dat niet zijn.

Het is geen toeval dat energie en impuls bij de causale beschrijving van de werkelijkheid horen, en positie en tijd bij die van ruimtetijd. Elk paar geconjugeerde variabelen correspondeert met twee complementaire concepten, die niet tegelijkertijd toepasbaar zijn op de werkelijkheid. De onzekerheidsrelatie drukt dus niet zozeer een onwetendheid uit, maar de maximale 'scherpte' waarmee we deze beide variabelen tegelijkertijd kunnen definiëren.²³ Welke variabele scherp gedefinieerd kan worden hangt af van de keuze van de experimentele opstelling.²⁴

2.2.3 Tweespletenexperiment Herzien

In het licht van de Kopenhageninterpretatie zijn de wonderbaarlijkheden van het tweespletenexperiment beter te begrijpen. Het onderliggende fenomeen *is* niet een golf of een deeltje – dit zijn beide abstracties. Zo lang we geen experimentele opstelling gebruiken waarmee we kunnen bepalen door welke spleet het deeltje gaat, kunnen we tussen het moment van afschieten en moment van inslag op het detectiescherm niet spreken van een deeltje met een vaste positie, maar gedraagt het zich als een golf en wordt het interferentiepatroon zichtbaar. De vraag 'door welke spleet gaat het deeltje?' heeft dan geen enkele betekenis. Bedenken we echter een opstelling waarmee we exact kunnen bepalen door welke spleet het deeltje gaat – bijvoorbeeld door een lichtbron achter de spleten te plaatsen – dan is er inderdaad sprake van een deeltje met een vaste positie. Het concept van een golf is dan echter niet meer adequaat en we verliezen het interferentiepatroon. De keuze van de experimentele opstelling bepaalt dus wanneer het concept van een deeltje of dat van een golf gebruikt kan worden.

²⁰ De Duitse natuurkundige Werner Heisenberg was een van de medegrondleggers van de Kopenhageninterpretatie. De onzekerheidsrelatie ontdekte hij terwijl hij werkte onder Bohr, en dit vormde een directe aanleiding voor Bohr's idee van complementariteit. Zie: Manjit Kumar, "Uncertainty in Copenhagen", in *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality* (New York: W. W. Norton & Company, 2010): pp. 244-265.

²¹ Canoniek refereert hier aan het Hamiltoniaanse formalisme dat wordt gebruikt in de kwantummechanica. Canoniek geconjugeerde variabelen corresponderen met operatoren die niet commuteren. Deze kunnen ook worden gezien als paren van variabelen in de Fourier transformatie.

²² Namelijk de constante van Planck h gedeeld door viermaal Pi.

²³ In het Duits wordt de relatie van Heisenberg 'Die Unschärferelation' genoemd, wat letterlijk vertaald als 'onscherpheidsrelatie.'

²⁴ Niels Bohr, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review* 48, no. 8 (1935): p. 699.

In het formalisme van de kwantummechanica wordt dit als volgt weergegeven: de toestand van het deeltje wordt beschreven door een golffunctie. Nadat deze wordt afgeschoten, volgt deze de Schrödingervergelijking en verspreid deze zich door tijd en ruimte. De 'golf' gaat dan door beide spleten en interfereert met zichzelf. Zodra de 'golf' het detectiescherm bereikt vervalt de golffunctie en wordt het 'deeltje' gedwongen om een positie te kiezen. De waarschijnlijkheid om het deeltje ergens te vinden wordt gegeven door de amplitude van de golf op die plek, welke is verdeeld volgens het interferentiepatroon. Als we het experiment dus vele malen herhalen wordt langzaam dit patroon zichtbaar. Bepalen we echter al bij de spleten de positie van het deeltje, dan vervalt de golffunctie daar en krijgt het deeltje een vaste positie, waardoor er niet meer sprake is van een golf die met zichzelf kan interfereren. De golffunctie is dus een wiskundig construct die ons helpt met het voorspellen van de mogelijke uitkomsten van een waarneming – niet een objectieve beschrijving van de werkelijkheid.

2.3 Overeenkomsten met Kant

Bohr's denken toont overeenkomsten met de traditie van Kant en diens transcendentiaal idealisme. Net als Kant maakt hij een fundamenteel onderscheid tussen de ervaringswereld en een onderliggende 'echte' werkelijkheid, die ontoegankelijk is voor waarneming. Ook lijken hun concepties van wat de natuur is en wat er over haar gezegd kan worden overeen te komen.

Kant beschouwt de natuur als de "totaalsom van alle objecten van ervaring."²⁵ Dit betreft enkel de dingen zoals ze aan ons verschijnen via de zintuigen. Het ding *ansich* daarentegen – hoe het 'echt' is, in zichzelf – kan geen object van ervaring zijn. Hier kunnen we dus ook geen uitspraken over doen of kennis van hebben. Toch kunnen we een objectieve beschrijving geven van de natuur door de universele condities waaronder waarneming mogelijk is te bestuderen. De natuurwetten beschrijven dus niet het gedrag van de dingen *ansich*, maar de *a priori* voorwaarden waaronder we iets kunnen ervaren.²⁶

Bij Bohr zien we iets soortgelijks. Voordat we een waarneming doen aan een systeem kan deze geen object van ervaring zijn. We kunnen dan dus ook geen concrete uitspraken doen over de eigenschappen van het systeem. Wel kunnen we, met behulp van de golffunctie, de mogelijke uitkomsten van een waarneming beschrijven. De golffunctie beschrijft hier dus niet het systeem zoals het is, maar de mogelijkheden tot ervaring die we hebben.

Daarnaast stelt Kant net als Bohr dat causaliteit en ruimtetijd geen eigenschappen zijn die aan de werkelijkheid zelf toebehoren. Beide zijn 'ideeën' die we toepassen op onze percepties, en waarmee we deze aan elkaar relateren en als geheel structureren.²⁷ Hoewel deze *a priori* zijn, hebben ze dus enkel betekenis met betrekking tot waarneming.

²⁵ Immanuel Kant, *Prolegomena to Any Future Metaphysics*, vert. Gary Hatfield (Cambridge: Cambridge University Press, 2004): p. 48.

²⁶ *Ibid.*, p. 57.

²⁷ Alhoewel causaliteit en ruimtetijd voor Kant niet op gelijke voet staan en elkaar niet uitsluiten, en dus ook niet complementair kunnen zijn. Ruimte en tijd zijn voor Kant pure intuïties van de representatie, de eerste stap waarmee we percepties structureren. Oordelen op basis van enkel deze

Dit verklaart waarom Bohr veronderstelt dat uitspraken over de natuur alleen zinnig zijn in combinatie met een beschrijving van een experimentele opstelling. De natuurkunde kan geen beschrijving geven van de werkelijkheid zoals deze is – elke waarneming verstoort haar namelijk. In plaats daarvan heeft de natuurkunde de taak om een beschrijving te geven van wat er gezegd kan worden over de natuur, met betrekking tot mogelijke manieren waarop we haar kunnen ervaren. Deze mogelijkheden hangen af van de interactie die we hebben met de werkelijkheid.

intuïties zijn subjectief. Causaliteit is een van de pure concepten van het verstand. Deze staan ons toe om ook objectief geldige uitspraken te doen. Zie: Kant, *Prolegomena to Any Future Metaphysics*, pp. 24–123.

3 De (Meta)fysica van Albert Einstein

Hoewel Bohr snel het grootste deel van de wetenschappelijke gemeenschap achter zijn interpretatie wist te krijgen, kon hij de beroemdste natuurkundige van zijn tijd niet overtuigen. Einstein bleef zich tot het einde van zijn leven verzetten tegen wat hij noemde "Spookachtige langeafstandseffecten."²⁸ Op zich zijn zulke protesten tegen een nieuwe theorie die oude ideeën onderuithaalt niet verwonderlijk; Einsteins kritiek doet denken aan het verzet tegen Newtons concept van een kracht die werkt op afstand in de zeventiende eeuw. Zoals Bergson ooit schreef: "vele concepten van de moderne natuurkunde moeten in eerste instantie obscuur hebben geleken, niet makkelijk verenigbaar met concepten die al eerder in de wetenschap zijn opgenomen, en inderdaad erg dicht bij de grens van absurditeit."²⁹ Pas naargelang we concepten succesvol weten toe te passen worden deze steeds duidelijker voor ons.

Voor Einstein was de mogelijkheid tot toepassing echter niet voldoende. De indeterministische, discontinue natuur van de Kopenhageninterpretatie strookte niet met zijn "geloof" – zoals hij dit noemde – in een "rationele natuur."³⁰ Maar naarmate het succes van de Kopenhageninterpretatie groeide namen steeds minder mensen hem serieus – tot het punt dat werd gezegd dat de oude man seniel zou zijn geworden.³¹ Dit doet geen recht aan het denken van één van de grondleggers van de kwantumtheorie. Einstein stelde niet dat de Kopenhageninterpretatie niet correct was, maar dat deze geen complete beschrijving van de werkelijkheid kon zijn. In tegenstelling tot Bohr hield hij vast aan de overtuiging dat het de taak is van de natuurkunde een werkelijkheid onafhankelijk van de waarnemer te beschrijven – de wereld zoals deze *is*.³² Einstein was dus niet tevreden met een interpretatie die enkel logisch consistent en instrumenteel was.

Zoals Don Howard heeft betoogd moeten we dit niet zien als een blind geloof in realisme.³³ Einsteins argument wordt vaak gereduceerd tot de zogenaamde 'EPR-paradox', uit het beroemde artikel dat hij schreef samen met zijn collega's Podolsky en Rosen. Zoals we zullen zien was zijn bezwaar in werkelijkheid fundamenteleler, en gegrond in een filosofie die haar wortels heeft in Spinoza.

²⁸ In het originele Duits: 'spukhafte Fernwirkungen.' In het Engels vaak vrij vertaald als 'spooky action at a distance.' Einstein deed deze beroemde uitspraak in een brief aan Born, gepubliceerd in: Max Born, *Natural Philosophy of Cause and Change* (Oxford: Oxford University Press, 1949), p. 122.

²⁹ Henri Bergson, *An Introduction to Metaphysics*, vert. T.E. Hulme (New York: G.P. Putnam's Son, 1912): p. 87.

³⁰ Albert Einstein, *Letters to Solovine 1906-1955* (New York: Open Road Media, 2011): p. 77.

³¹ Clauser, "Early History of Bell's Theorem", p. 72.

³² Einstein, "Autobiographical Notes", p. 81.

³³ Don Howard, "Einstein on Locality and Separability", *Studies in History and Philosophy of Science* 16, no. 3 (1985): p. 176.

3.1 EPR-Paradox

In 1935 stelden Einstein, Podolsky en Rosen (EPR) in hun gelijknamige artikel de vraag: *Kan de kwantummechanische beschrijving van de fysieke werkelijkheid als compleet worden beschouwd?*³⁴ Hun antwoord was 'nee.' Een noodzakelijke voorwaarde voor een complete theorie was volgens hen dat "elk element uit de fysieke werkelijkheid een tegenhanger moet hebben in de theorie." Vervolgens is dan natuurlijk de vraag wat de elementen van de fysieke werkelijkheid zijn, en EPR beaamden – geheel in lijn met de kwantumfysica – dat deze niet *a priori* kunnen worden vastgesteld, maar enkel empirisch verkregen kunnen worden. In plaats daarvan gaven zij het volgende criterium: "Als, zonder op enige manier een systeem te verstoren, we met zekerheid de waarde kunnen voorspellen van een fysische grootheid, dan bestaat er een element van de fysieke werkelijkheid die overeenkomt met deze fysische grootheid."³⁵

Zoals we al zagen is een van de grondbeginselen van de kwantummechanica het onzekerheidsprincipe van Heisenberg, die stelt dat grootheden die corresponderen met canonic geconjugeerde variabelen – zoals positie en impuls – niet tegelijkertijd bepaald kunnen zijn. Hieruit trekken EPR de volgende conclusie: (I) de beschrijving die de kwantummechanica geeft van de werkelijkheid is niet compleet, óf (II) eigenschappen die corresponderen met geconjugeerde variabelen kunnen niet tegelijkertijd een werkelijkheid hebben.

Dan komt het gedachtenexperiment: stel we hebben twee systemen, 1 en 2, die voor een korte tijd een interactie met elkaar aangaan, waarna ze ruimtelijk van elkaar worden gescheiden en niet meer met elkaar interacteren. Van beide systemen is de staat voor de interactie bekend, wat betekent dat we de toestand van het samengestelde systeem 1+2 voor elk daaropvolgend moment kunnen bepalen, ook nadat de systemen van elkaar gescheiden zijn. Het is echter in het formalisme van de kwantummechanica niet mogelijk om de staat van een van de individuele systemen na de interactie te bepalen – omdat deze aan elkaar zijn gecorreleerd.

Wel kunnen we een meting doen aan een van beide systemen. Stel, we meten aan systeem 1 de grootheid A , en deze blijkt de waarde a te hebben; dan vervalt de toestand van het samengestelde systeem ten gevolge van de meting en is systeem 1 nu in een toestand die correspondeert met de gevonden waarde a , een eigenfunctie van de operator A . Ook van systeem 2 kunnen we dan de golf functie vaststellen. Deze stelt ons nu in staat om met zekerheid de grootheid A voor systeem 2 te bepalen.

Hadden we echter de grootheid B gemeten aan systeem 1, en hierbij de waarde b gevonden, dan was systeem 1 in een andere toestand vervallen: een die een eigenfunctie is van de operator B . In dat geval was ook systeem 2 in een andere toestand geweest, waarmee we de grootheid B voor systeem 2 kunnen vaststellen.

³⁴ Albert Einstein, Boris Podolsky, en Nathan Rosen, "Can the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?" *Physical Review* 47, no. 10 (1935): pp. 777-780.

³⁵ *Ibid.*, p. 777

Dit betekent dat het mogelijk is om twee verschillende golf functies toe te schrijven aan systeem 2, afhankelijk van de meting die we doen aan systeem 1. De meting aan systeem 1 kan echter geen directe invloed hebben op systeem 2. De verschillende golf functies beschrijven dus dezelfde realiteit.

Nu kan het voorkomen, zo tonen de auteurs aan, dat de A en B canoniek geconjugeerde variabelen zijn. Door het meten van de grootte A ofwel B aan systeem 1, kunnen we voor systeem 2 de grootte A óf B met zekerheid bepalen. Maar de meting heeft niks veranderd aan de onderliggende realiteit van systeem 2. Als gevolg moeten we, in overeenstemming met het eerder gestelde criterium, tegelijkertijd de grootte A en B als een element van dezelfde werkelijkheid in systeem 2 beschouwen. Dit spreekt stelling (II) tegen, en dus moeten we stelling (I) als haar enige alternatief aannemen. Conclusie: de kwantummechanische beschrijving van de werkelijkheid is niet compleet.

3.1.1 Bell-test

Voor lange tijd bleef de EPR-paradox een onderwerp van filosofische discussie. In het algemeen werd het artikel geïnterpreteerd als een argument voor het bestaan van zogenaamde lokale verborgen variabelen – variabelen die niet toegankelijk zijn voor waarneming³⁶ maar wel de uitkomst van een meting voorbeschikken. Dit zouden de ontbrekende puzzelstukjes zijn die de kwantummechanische theorie compleet moesten maken.

De meeste natuurkundigen waagden zich echter überhaupt niet aan een dergelijk metafysisch debat. Een natuurkundige theorie wordt uiteindelijk getoetst aan haar overeenstemming met empirische data; de Kopenhagen interpretatie had tot dan toe elke test doorstaan, met als gevolg dat ze een bijna religieus dogmatische status had gekregen onder natuurkundigen.³⁷ Het bestaan van lokale verborgen variabelen was niet experimenteel vast te stellen. Sterker nog, de theorieën die geformuleerd werden waren erop gericht om dezelfde voorspellingen te doen als de Kopenhagen interpretatie. Waarom zou men zich druk maken over iets wat je toch niet kunt weten?

In 1964 deed de relatief onbekende Ierse natuurkundige John Bell echter een opmerkelijke ontdekking. Hij toonde aan dat *elke mogelijke* lokale-verborgen-variabelentheorie tot een tegenspraak leidde met de kwantummechanica die empirisch was vast te stellen.³⁸ Hiervoor gebruikte hij een alternatieve versie van het EPR-gedachtenexperiment die was geformuleerd door Bohm en Aharonov:³⁹ de twee systemen zijn hier twee spin- $1/2$ deeltjes, die spontaan gevormd worden uit een spin-zero deeltje. Omdat het totale impulsmoment gelijk moet blijven, staat vast dat wanneer van een van de deeltjes de spincomponent in een

³⁶ In de kwantummechanica zijn enkel grootheden die overeenkomen met een hermitische operator toegankelijk voor waarneming, zie: David Griffiths en Darrell Schroeter, 'Observables', in *Introduction to Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge University Press, 2018): pp. 122-126.

³⁷ Manjit Kumar, "The Quantum Demon," in *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate About the Nature of Reality* (New York: W.W. Norton & Company, 2010): pp. 354-363.

³⁸ John Bell, "On the Einstein Podolsky and Rosen Paradox", *Physics* 1, no. 3 (1964): pp. 195-200.

³⁹ David Bohm en Yakir Aharonov, "Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky", *Physical Review* 108, no. 4 (1957): pp. 1070-1076.

arbitraire richting wordt gemeten, het andere deeltje in diezelfde richting een tegengestelde spin moet hebben. Informatie van de spincomponent in de ene richting sluit echter informatie over de spincomponent in een andere richting uit – volgens het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. De vraag is dus of de uitkomst van een meting aan de spincomponent van een van de deeltjes van tevoren vast staat en deze informatie ontbreekt in de kwantummechanische beschrijving (de EPR-stelling), of dat deze uitkomst afhangt van de keuze van de richting waarin wordt gemeten bij het andere deeltje en er voor het doen van een meting überhaupt niet kan worden gesproken van een goed gedefinieerde spin voor beide systemen afzonderlijk (de Kopenhageninterpretatie).

Bell stelde een experiment voor waarin van beide deeltjes tegelijkertijd de spincomponent in een willekeurige richting wordt gemeten. Vervolgens liet hij zien dat als er inderdaad een onderliggende variabele was die de uitkomst van de metingen voorbeschikte – zoals hij zelf trouwens ook onderschreef – de statistische relatie tussen de uitkomsten van de metingen moest voldoen aan een zekere ongelijkheid. Deze ‘ongelijkheid van Bell’ zou niet gelden volgens de voorspellingen van de Kopenhageninterpretatie. Dus, door het experiment vaak genoeg te herhalen en hierbij op willekeurige wijze en afzonderlijk van elkaar de richting waarin wordt gemeten bij beide deeltjes te variëren, kon het bestaan van lokale verborgen variabelen experimenteel worden vastgesteld.

Het experiment, nu bekend als de Bell-test, is in de daaropvolgende decennia vele malen en in vele vormen uitgevoerd. De uitkomsten waren echter eenduidig: keer op keer werd de ongelijkheid van Bell geschonden.⁴⁰ Hiermee was – zo concludeerde de natuurkundige gemeenschap – het bestaan van lokale verborgen variabelen definitief uitgesloten en het debat tussen Einstein en Bohr beslecht.⁴¹ Kopenhagen had gewonnen.

3.2 Einsteins eigen incompleetheidsargument

Het is echter, zoals onder andere Howard⁴² en Fine⁴³ hebben opgemerkt, verkeerd om het EPR-argument gelijk te stellen aan Einsteins denken. In een brief aan Schrödinger vertelt Einstein hoe het artikel een product was van discussies tussen hem, Podolsky en Rosen, maar dat het artikel uiteindelijk door Podolsky was geschreven – Einstein beheerste de Engelse taal niet erg goed- en dat hij ontevreden was over het resultaat, omdat het belangrijkste punt naar zijn mening was ‘verborgen onder eruditie.’⁴⁴

⁴⁰ Recent nog is in Delft een Bell-test uitgevoerd die als compleet ‘loophole-free’ wordt beschouwd: Bob Hensen et al., “Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres”, *Nature* 526, no. 7575 (2015): pp. 682-686.

⁴¹ Helaas hebben beiden de ontwikkelingen rond de Bell-test niet mogen meemaken; Einstein overleed in 1955 en Bohr zeven jaar later.

⁴² Howard, “Einstein on Locality and Separability”, pp. 171-201.

⁴³ Arthur Fine, “Einstein’s Interpretations of the Quantum Theory”, *Science in Context* 6, no. 1 (1993): pp. 257 – 273.

⁴⁴ Geciteerd in: Howard, “Einstein on Locality and Separability”, p. 175.

Het EPR-argument wordt gezien als de conjunctie van twee fundamentele veronderstellingen: lokaliteit en realisme.⁴⁵ Lokaliteit betekent dat gebeurtenissen alleen invloed kunnen hebben op hun 'directe' omgeving – ook causale verbanden worden gelimiteerd door de lichtsnelheid.⁴⁶ Met realisme wordt bedoeld dat systemen ten alle tijden een eigen werkelijkheid bezitten met vast gedefinieerde eigenschappen, onafhankelijk van een waarnemer. Beide aannames zijn nodig om tot de paradox te komen.

Nu hadden Bohr en zijn aanhangers geen problemen met lokaliteit. In zijn antwoord op de EPR-paper schrijft Bohr: "Natuurlijk is er in een dergelijk geval geen sprake van een mechanische verstoring van het systeem onder beschouwing gedurende de laatste kritische fase van de meetprocedure."⁴⁷ Maar het realisme waar het EPR-argument op is gebouwd is nou juist datgene wat volgens de Kopenhagen interpretatie niet geldt. Het bestaan van waarnemer-onafhankelijke systeemeigenschappen als uitgangspunt nemen, en hiervan uit vervolgens aantonen dat de kwantummechanische beschrijving niet compleet is omdat de theorie deze eigenschappen niet beschrijft, leidt tot een cirkelredentie.⁴⁸

Er is een onderliggende aanname in het realisme van het EPR-argument die niet expliciet wordt benoemd: men veronderstelt door middel van een principe van individuatie te weten wat geldt als een afzonderlijk systeem en wat niet. Voor Einstein was dit juist het belangrijkste punt in zijn meningsverschil met Bohr, dat verborgen bleef in de formulering van Podolsky. Einstein geloofde dat objecten die, op een zekere tijd, ruimtelijk van elkaar gescheiden zijn een van elkaar onafhankelijk bestaan - oftewel een eigen fysische staat – bezitten.⁴⁹ Dit noemt Howard het separabiliteitsprincipe.⁵⁰ Bohr verwerpt dit principe impliciet wanneer hij stelt dat de kwantummechanische beschrijving compleet is, en dit is precies waar Einstein het debat naartoe wilde leiden.⁵¹

In zijn eigen argument tegen de compleetheid van de kwantummechanische beschrijving, zoals hij deze in latere essays heeft geformuleerd, maakt Einstein het separabiliteitsprincipe dan ook wél expliciet. Hij gebruikt hetzelfde gedachtenexperiment gebruikt als het EPR-argument, maar zijn redenering is een stuk simpeler: afhankelijk van de meting die we doen aan systeem 1 kunnen we verschillende golf functies toeschrijven aan systeem 2. De meting aan systeem 1 kan echter geen directe invloed hebben op systeem 2, gezien de twee systemen ruimtelijk van elkaar gescheiden zijn. Het feit dat we verschillende golf functies kunnen toeschrijven aan dezelfde werkelijkheid betekent dus dat deze geen complete beschrijving van het systeem kunnen zijn. Deze conclusie kan alleen ontweken worden door óf te stellen

⁴⁵ Zie bijvoorbeeld: Howard Wiseman, "Death by experiment for local realism", *Nature* 526, no. 7575 (2015): pp. 649-650.

⁴⁶ Dit volgt uit de relativiteitstheorie.

⁴⁷ Niels Bohr, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review* 48, no. 8 (1935): p. 700.

⁴⁸ Howard, "Einstein on Locality and Separability", p. 175.

⁴⁹ Albert Einstein, "Quantum Mechanics and Reality", in *The Born-Einstein Letters*, vert. Irene Born (Londen: MacMillan Press, 1971), p. 170.

⁵⁰ Howard, "Einstein on Locality and Separability", p. 173.

⁵¹ *Ibid.*, p. 183

dat de meting aan systeem 1 een directe invloed uitoefent op de staat van systeem 2 (verwerping van lokaliteit), óf te ontkennen dat men in het algemeen individuele staten kan toeschrijven aan twee ruimtelijk gescheiden systemen (verwerping van separabiliteit). Neemt men echter beide principes aan, dan leidt dit tot een contradictie met de stelling dat de kwantummechanische beschrijving compleet is.⁵²

3.3 Einstein en Spinoza

Einstein vertoont in zijn denken een sterk verwantschap met Spinoza, voor wie hij een diepe bewondering koesterde.⁵³ In een brief aan Dagobert D. Runes schreef Einstein ooit: “Spinoza was de eerste die met echte consistentie het idee van een alles doordringend determinisme toepaste op menselijk denken, gevoel en handelen.”⁵⁴ Deze zin vat twee centrale ideeën van Spinoza samen die leidend zijn in Einsteins denken en kritiek op de Kopenhagen interpretatie: determinisme als noodzakelijkheid vanuit de essentie der dingen en het concept van psychofysisch-parallelisme.

3.3.1 Spinoza's Metafysica

In zijn *Ethica* stelt Spinoza dat er maar één substantie is: *Deus sive natura*.⁵⁵ Maar deze ‘God’ is geen antropomorfisch wezen dat zich bezighoudt met aardse zaken en een vrije wilt heeft. Integendeel, dit zou God als subject tegenover de natuur als object plaatsen, terwijl God voor Spinoza juist immanent is. God is de oneindige substantie met een oneindig aantal attributen waaruit oneindig veel dingen volgen – de totaliteit van alles wat is. Particuliere dingen in de wereld zijn niets anders dan modi, oftewel affecties van Gods attributen (EIP25C). Zo is ruimtelijkheid een attribuut van God, en zijn particuliere ruimtelijke dingen modi van dit attribuut, die een uiting geven aan de essentie van wat God is (EIIP2). Op dezelfde manier zijn singuliere gedachten een uiting van de essentie van God voor zover Hij een denkend ding is (EIIP1).

Dit alles gebeurt op noodzakelijke wijze. Alles wat is volgt uit de essentie van God op dezelfde manier als het uit de essentie van een driehoek volgt dat zijn hoeken gelijk zijn aan 180 graden (EIP17S). Niks in de natuur is contingent, en wanneer dit zo lijkt komt dit enkel door een gebrek aan kennis (EIP33S1). Sterker nog, dingen hadden niet anders kunnen zijn, en ook niet in een andere volgorde kunnen zijn, dan zoals ze zijn gevolgd uit de essentie van God (EIP33). Spinoza's determinisme is dus een absoluut (causaal) determinisme, dat redeneert vanuit noodzakelijkheid.

Dit betekent ook dat de wil niet kan worden gezien als een vrije oorzaak (EIP32). De wil is niks anders dan een specifieke modus van denken, en heeft dus een externe oorzaak op grond waarvan het bestaat en handelt op een noodzakelijke wijze. Hetzelfde geldt voor het

⁵² Einstein, “Autobiographical Notes”, p. 85.

⁵³ Einstein sprak bijvoorbeeld over hem als ‘Unseres Meister Spinoza’ (brief aan Willy Aron), zie: Michel Paty, “Einstein and Spinoza,” in *Spinoza and the Sciences*, red. Marjorie Grene en Debra Nails (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1986): p. 267.

⁵⁴ Geciteerd in: Max Jammer, “Einstein's Religiosity and the Role of Religion in His Private Life,” in *Einstein and Religion: Physics and Theology* (Princeton: Princeton University Press, 1999): p. 45

⁵⁵ Baruch Spinoza, “The Ethics”, in *A Spinoza Reader*, red. Edwin Curley (Princeton: Princeton University Press, 1994): pp. 85-265

intellect: beide zijn “gerelateerd aan Gods natuur op dezelfde manier als beweging en rust, en absoluut alle andere natuurlijke dingen” (EIP32C2). Met psychofysisch parallelisme wordt hier dus bedoeld dat beide werelden uiting geven aan een ander attribuut van dezelfde werkelijkheid, zoals twee lijnen die elkaar volgen maar nooit raken.

3.3.2 *Natuurkunde en de Werkelijkheid*

Hoe verhouden deze ideeën zich tot Einsteins denken? Zoals we hebben gezien gelooft Einstein op de eerste plaats in het bestaan van een objectieve werkelijkheid, die compleet wordt geregeerd door wetten.⁵⁶ Natuurkundige concepten komen volgens hem overeen met dingen in een ‘externe’ werkelijkheid, en met ons denken kunnen we deze werkelijkheid objectief beschrijven.⁵⁷ Dit zien we ook terug in Spinoza, wanneer deze stelt dat een bestaand ding en het idee van dit ding hetzelfde zijn, maar uitgelegd door verschillende attributen van God, en dat de orde en verbanden der dingen hetzelfde is als de orde en verbanden der ideeën (EIIP7).

Wetenschap, zo zegt Einstein, is niks anders dan “een verfijning van het alledaagse denken.”⁵⁸ De natuurkunde specifiek gaat over de behandeling van zintuigelijke ervaringen en een begrip van hun onderlinge verbanden.⁵⁹ De concepten van de natuurkunde zijn dus altijd verbonden aan de menselijk ervaring. Vergelijk dit weer met Spinoza: ook hij stelt dat de geest een ding alleen als ‘bestaand’ kan bevatten door middel van een idee van een affectie van het eigen lichaam (EIIP26).

Het lokaliteits- en separabiliteitsprincipe komen voort uit dit alledaagse denken. En beide zijn volgens Einstein noodzakelijke voorwaarden voor het formuleren en testen van natuurkundige wetten. Het lokaliteitsprincipe is onmisbaar voor het idee van een (quasi-) gesloten systeem, en daarmee de mogelijkheid tot het empirisch testen van wetten.⁶⁰ Het separabiliteitsprincipe hebben we nodig om de dingen die door de ervaring worden geïntroduceerd te ordenen in de wereld.⁶¹ Het fungeert als een raamwerk, of beter gezegd een raster, dat de wereld in vierdimensionale, oneindig kleine hokjes verdeelt. Zonder dit principe zegt Einstein niet te weten wat de natuurkunde zou moeten beschrijven, omdat “wat wordt gezien als een systeem uiteindelijk conventie is, en ik niet zie hoe men [zonder dit principe] de wereld objectief kan opdelen, zodat er iets gezegd kan worden over de delen.”⁶²

In deze erkenning van de problematiek in het objectief opdelen van de wereld herkennen we Spinoza’s ideeën over substantie: fysieke objecten zijn modi die, voor zover ze tot de fysieke werkelijkheid behoren, uiting geven aan hetzelfde attribuut van God. Ze kunnen dus niet in

⁵⁶ Einstein in een brief aan Born, opgenomen in: Max Born, “Metaphysical Conclusions”, in *Natural Philosophy of Cause and Chance* (Oxford: Oxford University Press, 1949): pp. 122-128.

⁵⁷ Einstein, “Quantum Mechanics and Reality”, p. 170.

⁵⁸ Einstein, “Physics and Reality”, p. 349.

⁵⁹ *Ibid.*

⁶⁰ Einstein, “Quantum Mechanics and Reality”, p. 170.

⁶¹ *Ibid.*

⁶² Einstein in een ongepubliceerd commentaar op Born, geciteerd in: Howard, “Einstein on Locality and Separability”, p. 191.

essentie onderscheiden worden. In plaats daarvan schrijft Spinoza dat “materie overall hetzelfde is, en dat delen alleen worden onderscheiden voor zover materie op verschillende wijze wordt geaffecteerd, zodat zijn delen alleen modaal worden onderscheiden, niet werkelijk” (EIP15S). We kunnen affectie of modus hier vergelijken met wat Einstein bedoelt met een individueel systeem. Het separabiliteitsprincipe zou dan betekenen dat deze zich onderscheiden in de manier waarop ze uiting geven aan hun ruimtelijkheid doordat ze een andere plek in de ruimte innemen.

3.3.3 *Plaats van het Subject*

Het is ook met het lokaliteits- en separabiliteitsprincipe in ons achterhoofd dat we Einsteins spreken van een ‘externe’ werkelijkheid moeten interpreteren.⁶³ In de Kopenhagen interpretatie staat het subject buiten de (atomaire) werkelijkheid, in de zin dat hij er geen deel van uitmaakt, geen directe toegang tot heeft, maar er wel in twee richtingen invloed wordt uitgeoefend. Voor Einstein staat het subject in de werkelijkheid, maar *ruimtelijk gezien* is de rest van de wereld dus extern aan het subject. Het separabiliteitsprincipe zegt dan dat wanneer een systeem ruimtelijk gescheiden is van het subject – zoals in het EPR-gedachtenexperiment – deze een eigen bestaan heeft onafhankelijk van de realiteit op de plaats van het subject. Het lokaliteitsprincipe dicteert dat een gebeurtenis in de ruimte van het subject – zoals het te weten komen in welke staat het systeem is – geen directe invloed kan hebben op de werkelijke staat van het systeem.

Sterker nog, een gebeurtenis in het bewustzijn kan überhaupt geen invloed hebben op een fysieke werkelijkheid. Dit komt overeen met het psychofysisch-parallelisme van Spinoza: de geest is één met het lichaam (EIIP13S), als twee kanten van dezelfde munt, en affecties van het lichaam corresponderen met ideeën van deze affecties in de geest (EIIP12). Een idee van een object buiten het subject kan overeenkomen met de ruimtelijke werkelijk hiervan; maar er kan nooit een causaal verband bestaan tussen een idee in de geest en een object in de ruimte, omdat deze modi worden uitgelegd door verschillende attributen van God (EIIP6). Ze bevinden zich zogezegd in een parallelle werkelijkheid.

Het idee dat de kwantumwereld indeterministisch is komt volgens Einstein voort uit een verwarring tussen de subjectieve en objectieve werelden.⁶⁴ Hij schrijft: “Het indeterminisme van de kwantummechanica is een subjectief indeterminisme. Indeterminisme moet gerelateerd zijn aan iets, anders heeft het geen betekenis, en hier is het gerelateerd aan ons eigen onvermogen om de koers van individuele atomen te volgen en hun activiteit te voorspellen.”⁶⁵ Een alternatief dat hij voorstelt is om de golffunctie in de kwantummechanische beschrijving te beschouwen als een beschrijving van de kennis die we hebben van een systeem, in plaats van een complete beschrijving van de werkelijkheid.⁶⁶ De discontinue verandering van de golffunctie ten gevolge van het doen van een meting

⁶³ *Ibid.*, p. 193.

⁶⁴ Einstein in een reactie op Murphy in: Albert Einstein, Max Planck en James Murphy, “Epilogue: A Socratic Dialogue”, in *Where is Science Going?*, vert. James Murphy (New York: Norton, 1932), p. 202

⁶⁵ *Ibid.*

⁶⁶ Einstein in een brief aan Ernst Cassirer, geciteerd in: Fine, “Einstein’s Interpretations of the Quantum Theory”, p. 262.

correspondeert dan simpelweg met een verandering in onze kennis van het systeem. Zo wordt het probleem van het bewustzijn dat de fysieke werkelijkheid beïnvloed ontweken.⁶⁷

Maar, we kunnen de uitkomsten van de Bell-experimenten niet negeren. Wat betekenen deze in het licht van het lokaliteits- en separabiliteitsprincipe? Over het algemeen wordt in de discussie rond de Bell-test gefocust op de mogelijke schending van het lokaliteitsprincipe. Bell zelf geeft in zijn artikel een afleiding voor zijn ongelijkheid die geldt voor alle lokale variabelen, ongeacht of deze zich aan het separabiliteitsprincipe houden,⁶⁸ wat lijkt te impliceren dat de schending van zijn ongelijkheid in ieder geval het lokaliteitsprincipe breekt. Howard laat echter zien dat de ongelijkheid van Bell zowel van het lokaliteitsprincipe als het separabiliteitsprincipe af te leiden is.⁶⁹ De Bell-experimenten schenden dus óf het lokaliteitsprincipe óf het separabiliteitsprincipe. Hij schrijft: “We focussen onze aandacht op de schijnbare demonstratie van niet-lokale effecten die op mysterieuze wijze worden gecommuniceerd tussen twee ruimtelijk gescheiden systemen, zonder onszelf de diepere vraag te stellen of er daadwerkelijk *twee* systemen zijn, of maar *een*.”⁷⁰ Omdat het lokaliteitsprincipe een onmisbare rol vervuld in de relativiteitstheorie en een noodzakelijke voorwaarde is voor het empirisch testen van theorieën, betoogt Howard dat het beter is om het separabiliteitsprincipe los te laten.⁷¹ Dit betekent dan wel dat we op zoek moeten naar een nieuw principe van individuatie – de natuurkunde kan niet zonder, toch?.

⁶⁷ Einstein in een brief aan Heitler, geciteerd in: Fine, “Einstein’s Interpretations of the Quantum Theory”, p. 262.

⁶⁸ Bell, “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox”, p. 196.

⁶⁹ Don Howard, “Holism, Separability and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments”, in *Philosophical Consequences of the Quantum Theory: Reflections on Bell’s Theorem*, red. James Cushing en Ernan McMullin (Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1989), pp. 224 – 259.

⁷⁰ Howard, “Einstein on Locality and Separability”, pp. 195-196.

⁷¹ *Ibid.*, p. 197.

4 De Filosofie van Individuatie

Hoe wordt een ding een 'ding'? Zoals we gezien hebben zag Einstein het als de taak van de natuurkunde om de werkelijkheid te beschrijven zoals deze *is*. Zo'n beschrijving gaat uit van een werkelijkheid die al geïndividueerd is: een wereld van dingen. Daarom is het geven van een natuurkundige beschrijving niet mogelijk zonder een bepaald principe van individuatie te vooronderstellen. Maar wat betekent het als een dergelijk principe niet *a priori* gevonden kan worden? En kan er überhaupt sprake zijn van een principe? Moeten we niet het proces van individuatie – het worden tot 'ding' – ook als een modus van de werkelijkheid beschouwen, in plaats van uit te gaan van dingen die 'zijn'? En is het dan niet juist de taak van de natuurkunde om de werkelijkheid te beschrijven zoals deze *wordt*?

4.1 Nietzsche: De Psychologie van het 'Ding'

Er is in de filosofie altijd een hogere status toegekend aan dat wat *is* dan aan dat wat *wordt*, zo stelt Nietzsche.⁷² En dit is onterecht: wat de zintuigen ons laten zien – dat wat 'echt' is – toont juist enkel verandering. In plaats van trouw te blijven aan dit gegeven zoeken filosofen naar iets 'eeuwigs', met als gevolg dat "ze zich enkel bezighouden met conceptuele mummies; niks echts is ooit levend uit hun handen ontsnapt."⁷³ Dat het nooit goed lukte om dit eeuwige 'zijn' te bevatten werd toegeschreven aan misleiding door de zintuigen. Maar de zintuigen liegen niet, het gaat mis bij onze interpretatie van hun getuigenis. Het 'zijn' is een verzinsel.

Dat geldt volgens Nietzsche dus ook voor het concept van een 'ding'. Net zoals Spinoza betoogt hij dat het verkeerd is om de wil als een vrije oorzaak te zien. Door dit geloof zijn we gekomen op het idee van een 'ik' – een subject als actor in de wereld. Vervolgens zijn we dit idee op de wereld om ons heen gaan projecteren. Zo werd al het gebeuren een actie, en de wereld een veelheid aan 'dingen' die iets 'doen'.⁷⁴ Maar, zegt Nietzsche, er is geen 'ding', het 'doen' is alles. Mensen verdubbelen het gebeuren door dezelfde gebeurtenis als oorzaak en gevolg neer te zetten: "de gewone mens scheidt de bliksem van zijn flits en neemt die laatste als een daad, uitgevoerd door een subject [...] de wetenschapper doet niet beter wanneer hij zegt dat 'kracht beweegt, kracht veroorzaakt' en dergelijke."⁷⁵

Net als Spinoza gelooft Nietzsche dat alles wat kan gebeuren moet gebeuren.⁷⁶ Maar dit betekent nog niet dat er zoiets is als een natuurwet. Er is niks dat handelt uit noodzakelijkheid of gehoorzaam is aan een regel. De wereld is simpelweg wat ze is: "Als wij,

⁷² Friedrich Nietzsche, "'Reason' in Philosophy," in *Twilight of the Idols*, vert. Richard Polt (Indianapolis: Hackett Publishing Company, 1997): p. 18-19.

⁷³ *Ibid.*, p. 18.

⁷⁴ Friedrich Nietzsche, "The Four Great Errors," in *Twilight of the Idols*, vert. Richard Polt (Indianapolis: Hackett Publishing Company, 1997): p. 32.

⁷⁵ Friedrich Nietzsche, "First Essay", in *On the Genealogy of Morality*, vert. Carol Diethe (Cambridge: Cambridge University Press, 2007): p. 26.

⁷⁶ Friedrich Nietzsche, *The Will to Power*, vert. R. Kevin Hill en Michael A. Scarpitti (Londen: Penguin Books, 2017): p. 361.

voor gewone doeleinden van voorspelling, weten hoe we deze ‘wetten’ moeten uitdrukken, des te beter voor ons! Maar dat betekent niet dat we enige ‘moraliteit’ in de wereld hebben geïntroduceerd, alleen omdat we (het idee) hebben bedacht dat zij gehoorzaam is.”⁷⁷ Nietzsche beaamt, in overeenstemming met Einstein, dat voor het doen van voorspellingen een idee van geïndividueerde ‘dingen’ nodig is – welke we baseren op het idee van de ‘ik’. Maar deze basis is wankel; willen we dus de mechanische interpretatie van de wereld als theorie blijven gebruiken, dan is dit altijd met de kanttekening dat deze rust op een psychologisch vooroordeel. Mochten we ons echter ontdoen van dit verzinsel, dan blijft er niks anders over dan dynamische energiekwanta, “waarvan de essentie bestaat uit hun relatie tot alle andere kwanta, uit hun ‘effect’ op hen – de wil tot macht”⁷⁸.

4.2 James: Werkelijkheid van Relaties

Ook de Amerikaanse filosoof William James verandering als iets dat direct ervaren wordt. In het essay *A World of Pure Experience* uit 1904 zet hij zijn basis voor een nieuwe filosofie uiteen die hij radicaal empirisme noemt.⁷⁹ Rationalisme, zo stelt hij, wordt gekarakteriseerd door een overmatige nadruk op de veronderstelde eenheid van het zijnde, en kent aan deze eenheid een soort bovennatuurlijke waarheid toe. Empirisme daarentegen gaat uit van de delen, de individuen, maar geeft te weinig aandacht aan de samenhang der dingen.

‘Radicaal’ empirisme houdt in dat alles dat direct wordt ervaren – en niks meer of minder – moet worden meegenomen in de beschouwing en een gelijke status krijgt toegekend. Dit betekent volgens James ook dat de relaties die ervaringen verbinden zelf als ervaren relaties gezien moeten worden: “elke soort relatie die wordt ervaren moet als even ‘echt’ worden beschouwd als alle andere dingen in het systeem.”⁸⁰ Zowel disjunctieve als conjunctieve relaties moeten worden meegenomen. Maar die laatste zijn door de empiristen nooit als zodanig erkend.

James onderscheidt verschillende graden van ‘intimiteit’ van relaties. Op de laagste trap staat een simpelweg ‘samen zijn’ in het universum. Iets hoger staan gelijktijdigheid (conjunctief) en tijdsinterval (disjunctief), dan ruimtelijke nabijheid (conjunctief) en afstand (disjunctief). Vervolgens komen gelijkenis en verschil, die al een stuk breder geïnterpreteerd kunnen worden; daarna relaties van activiteit, waaruit het concept van causaliteit ontspringt; maar de meest intieme is de relatie die verschillende staten van bewustzijn verbindt – de verbinding die alle ervaringen van een ‘ik’ aan elkaar rijgt en deze tot één geheel maakt. James noemt dit de *co-conscious transition*.

Elke graad van intimiteit komt overeen met een verdere graad van individuatie. De hele wereld is verbonden in een simpel ‘samen zijn’. Maar verder is er geen relatie die alle ervaringen verbindt: “Het universum van de empirist heeft meer iets weg van één van die gedroogde mensenhoofden waarmee de Dajaks van Borneo hun hutten bedekken. De

⁷⁷ *Ibid.*, p. 360.

⁷⁸ *Ibid.*, p. 362.

⁷⁹ William James, “A World of Pure Experience”, *Journal of Philosophy, Psychology, and Scientific Methods* 1, no. 20 (1904): pp. 533-543.

⁸⁰ *Ibid.*, p. 534.

schedel vormt een solide kern; maar ontelbare veren, bladeren, koordjes, kralen en losse aanhangsels van elke soort drijven en hangen er omheen, en, los van dat ze daarin eindigen, lijken niks met elkaar te maken te hebben.”⁸¹

De grootste eenheid daarentegen, de verst voltrokken individuatie, is te vinden in de ‘ik’. De relaties tussen de ervaringen die de ‘ik’ constitueren kenmerken zich door de afwezigheid van een breuk – dit is de essentie van de *co-conscious transition*. Deze verandering zonder breuk, dit gevoel van continuïteit, wordt zelf ook direct ervaren. Op deze manier dient de ervaring van de ‘ik’ als een blauwdruk voor het idee van een ‘gelijk-zijn’: “Het ervaren van je eigen persoonlijke continuüm is het kennen van de originelen van de ideeën van continuïteit en gelijkheid, weten waar de woorden concreet voor staan, het bevatten van alles wat ze ooit kunnen betekenen.”⁸² Omgekeerd kunnen we ‘anders-zijn’ alleen echt begrijpen door de discontinuïteit die we ervaren wanneer we van ons eigen bewustzijn proberen over te stappen naar dat van iemand anders.

4.3 Bergson: Intuïtieve waarheid

Een tijdgenoot en bewonderaar van James was de Franse filosoof Bergson.⁸³ Ook hij pleitte voor een ‘waar empirisme’, waarbij de nadruk ligt op de innerlijke ervaring.⁸⁴ Volgens Bergson zijn er twee fundamentele manieren waarop wij dingen kunnen benaderen: met analyse bewegen we om het object heen, met intuïtie verplaatsen we onszelf in het object. Analytische kennis is relatief, omdat er altijd andere perspectieven aan te nemen zijn. Intuïtieve kennis is absoluut, omdat van binnenuit in één keer de gehele waarheid wordt ervaren. Waar empirisme doet dit laatste.

Het is niet gek dat we gewend zijn om volgens de analytische weg te werk te gaan, stelt Bergson. Het menselijke intellect is immers niet onbaatzuchtig – in het algemeen vergaren we kennis met een bepaald doel, we willen weten in hoeverre iets aan het een of andere idee voldoet. Kant-en-klare concepten lenen zich hier het beste voor. Een concept vertegenwoordigt een bepaald perspectief, en door deze te plakken op een object bepalen we hoe we het moeten benaderen. In de positieve wetenschappen wordt deze methode systematisch toegepast door het gebruik van symbolen. Zij reduceren de complexe werkelijkheid tot uitdrukbare – en dus bruikbare – kennis, door samen te vatten wat objecten gemeen hebben en wat hun onderlinge relaties zijn.

De individuen die we onderscheiden in de natuurkunde zijn ook uiteindelijk samenstellingen van concepten – toestanden – die we op de werkelijkheid plakken. Door nieuwe perspectieven aan te nemen delen we een toestand verder op in deeltoestanden,⁸⁵ en creëren we dus nieuwe individuen. Zo kunnen we in het EPR-gedachtenexperiment het

⁸¹ *Ibid.*, p. 535.

⁸² *Ibid.*, p. 537

⁸³ Zie: Henri Bergson, “On the Pragmatism of William James. Truth and Reality”, in *The Creative Mind*, vert. Mabelle L. Andison (New York: The Philosophical Library, 1946): pp. 248-260.

⁸⁴ Bergson, *An Introduction to Metaphysics*, pp. 1-92.

⁸⁵ Henri Bergson, “Growth of Truth. Retrograde Movement of the True”, in *The Creative Mind*, vert. Mabelle L. Andison (New York: The Philosophical Library, 1946): p. 26.

samengestelde systeem in verschillende manieren opdelen, afhankelijk van de meting die we doen - oftewel de houding die we aannemen ten opzichte van het systeem.

Maar we vergissen ons wanneer we denken dat we hiermee de werkelijkheid hebben opgedeeld op een manier dat we haar ook weer kunnen reconstrueren. Een "toestand", schrijft Bergson, "is nauwelijks meer dan een schets [...] het is het geheel beschouwd onder een zeker elementair aspect waarin we speciaal geïnteresseerd zijn en welke we zorgvuldig hebben genoteerd."⁸⁶ Dit zijn elementen, geen delen van de werkelijkheid. Net zoals rood en geel elementen zijn van oranje, maar we nooit tot de kleur oranje kunnen komen vanuit de concepten van rood en geel.

Hebben we de kleur oranje echter direct ervaren, dan zien we in één keer hoe oranje zowel geel als rood is. We kunnen de werkelijkheid altijd op verschillende manieren benaderen, en er dus verschillende, of zelfs tegenstrijdige concepten op plakken. Maar we kunnen met deze concepten nooit tot de werkelijkheid zelf komen. Kennen we echter de werkelijkheid zelf, dan zien we gemakkelijk hoe deze tot verschillende concepten leidt – hier is sprake van een soort omgekeerde dialectiek.

De werkelijkheid is altijd in beweging, stelt Bergson. En beweging kunnen we niet begrijpen vanuit het idee van rust, evenmin als we verandering kunnen begrijpen vanuit het idee van identiteit. Het intellect probeert de werkelijkheid te bevatten door statische, kant-en-klare concepten aan elkaar te rijgen als een net, maar de werkelijkheid is als een stroom water die ons op deze manier altijd ontglipt. In plaats daarvan moeten in het water duiken en ons laten meevoeren door de stroom. Alleen door wat Bergson noemt 'intellectuele sympathie' kunnen we onszelf *in* de beweging plaatsen, deze echt begrijpen. En wat we dan zien is dat deze beweging de "voortdurende creatie van mogelijkheden"⁸⁷ is, het ontstaan van iets radicaal nieuws. De werkelijkheid bestaat niet uit dingen, maar dingen in de maak.⁸⁸

Voor pragmatische doeleinden is de analytische methode op zijn plaats. Bohr is dus gerechtvaardigd in zijn stelling dat we gedwongen zijn om tegenstrijdige concepten te gebruiken om de werkelijkheid te beschrijven, en correct met de erkenning dat we hiermee nooit echt de werkelijkheid kunnen grijpen. Vanuit een wijsgerig oogpunt daarentegen kunnen we hier geen genoegen meenemen. Bergson verwerpt het Kantiaanse idee dat de werkelijkheid in zichzelf ontoegankelijk is. Kant, zo schrijft hij, houdt vast aan het Platoonse idee dat het intellect niet in staat is om iets anders te doen dan "het gieten van alle mogelijke ervaring in reeds bestaande mallen."⁸⁹ Maar filosofie begint met een omkering van de gebruikelijke werking van het intellect. Het is een metafysische intuïtie waarop de concepten van de wetenschappen zijn gebouwd – ook al zijn we dit misschien vergeten. En het is door dezelfde intuïtie dat we ons begrip van de werkelijkheid zullen verbeteren en tot nieuwe concepten zullen komen, niet andersom.

⁸⁶ *Ibid.*, p. 27.

⁸⁷ Bergson, "Growth of Truth. The Retrograde Movement of the True", p. 20.

⁸⁸ Bergson, *An Introduction to Metaphysics*, p. 65.

⁸⁹ *Ibid.*, p. 85.

4.4 Simondon: Het Worden van Zijn

De filosoof die misschien wel het meeste over de wording van het individu heeft geschreven is de Fransman Simondon. En niet geheel toevallig was Bergson van grote invloed op hem. Hij neemt van Nietzsche, James en Bergson het idee over dat de werkelijkheid altijd in wording is, en zoekt hierin een antwoord op het probleem van individuatie.

4.4.1 Pre-individuele Werkelijkheid

Volgens Simondon is de algemene fout bij het begrijpen van individuatie dat men uitgaat van het bestaan van het individu, en vervolgens probeert terug te redeneren wat de oorsprong van zijn bestaan is. Het gevolg van deze omkering is dat een principe van individuatie wordt vooronderstelt dat vóór de individuatie zelf komt. Maar een dergelijk principe als 'eerste term' is op een bepaalde manier zelf al een individu: "Alles wat als basis kan dienen voor een relatie is al van dezelfde modus van zijn als het individu."⁹⁰

Hij stelt daarom voor om niet het bestaan van het individu als uitgangspunt te nemen, maar de operatie van individuatie die het individu tot stand brengt: "Het individu wordt dan begrepen als een relatieve realiteit, een bepaalde fase van *zijn* die een pre-individuele werkelijkheid veronderstelt."⁹¹ Individuatie is een operatie waarmee de pre-individuele werkelijkheid zichzelf verdeelt en structureert en zowel het individu als zijn omgeving voortbrengt. Dit proces – het *worden van zijn* – noemt Simondon ontogenese.

Deze pre-individuele werkelijkheid moet echter niet worden gezien als een soort oer-eenheid, dat in het proces van individuatie volledig wordt opgedeeld in individuen en omgeving, en dat uit de ontstane delen zou kunnen worden gereconstrueerd. De concepten van eenheid en identiteit gelden alleen voor een al geïndividueerde werkelijkheid, en zijn hier dus simpelweg niet toepasbaar.⁹² De pre-individuele werkelijkheid is méér dan eenheid: zij vertoont een zekere incompatibiliteit met zichzelf. Deze incompatibiliteit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van spanningen (potentialen) en verschillende orden van grootte, die initieel niet met elkaar kunnen interacteren.⁹³ Het systeem is in een metastabiele situatie.

4.4.2 Individuatie als Transductieve Operatie

Wanneer de verschillende orden van grootte met elkaar in communicatie worden gebracht, wordt de metastabiele situatie doorbroken en treedt het proces van individuatie op als een gedeeltelijke resolutie⁹⁴ van de initiële incompatibiliteit: de pre-individuele werkelijkheid structureert zichzelf en vormt een systeem van relaties, waarbij het individu ontstaat als een middenterm die deze relaties actualiseert en bemiddelt tussen de twee orden van grootte.⁹⁵ Dit gebeurt door middel van een operatie die Simondon transductie noemt. In plaats van een

⁹⁰ Gilbert Simondon, "The Position of the Problem of Ontogenesis", vert. Gregory Flanders, *Parrhesia* 1, no. 7 (2009): p. 4.

⁹¹ *Ibid.*, p. 5.

⁹² *Ibid.*, p. 6.

⁹³ *Ibid.*, p. 5.

⁹⁴ Beschouw hier ook de originele betekenis van het woord *re-solvere*: zich (grondig) losmaken.

⁹⁵ Sean Bowden, "Gilles Deleuze, a Reader of Gilbert Simondon", in *Gilbert Simondon: being and technology* (Edinburgh: Edinburgh University Press, 2012): p. 138.

principe van buitenaf te gebruiken om de inherente problematiek op te lossen (deductie), of de termen te reduceren tot wat hen allen verbindt (inductie), wordt de structuur van de resolutie uit de spanning in het systeem zelf gehaald. Hierbij krijgen alle initiële termen een plekje en worden alle initiële tegenstellingen geïntrigeerd in de ontstane structuur⁹⁶ – er geldt dus een compleet behoud van informatie.

Simondon vergelijkt dit met het proces van kristallisatie: de pre-individuele werkelijkheid is initieel als een oververzadigde oplossing. Deze metastabiele situatie wordt doorbroken door een singulariteit: de nucleatiekern. De vorming van het kristal treedt dan op als een bemiddeling tussen een hoge orde van grootte (De chemisch potentiaal van het systeem) en een lage (de materie zelf) waartussen eerst geen communicatie bestond. Het kristal groeit vervolgens vanuit een klein zaadje in alle richtingen waarbij elke laag moleculen als een voorbeeld voor de volgende dient. En alle kleine verschillen in chemische samenstelling komen tot uiting in de eigenschappen van het ontstane kristal.

Individuatie is echter nooit volledig. Hoewel het systeem zich met de nieuwgevonden structuur in een lagere energietoestand bevindt, begeeft het zich opnieuw in een metastabiele situatie. Het ontstane individu blijft een bepaalde pre-individuele 'lading' bij zich dragen. Dit biedt mogelijkheid tot verdere individuatie: na fysieke individuatie – waar we vanuit een natuurkundig perspectief in geïnteresseerd zijn – kan het systeem zich verder ontwikkelen in een vitale individuatie, waarbij het levende individu ontstaat. Het levende individu kan zich vervolgens weer ontwikkelen tot een subject in de wereld, door deel te nemen in een psychisch-collectieve individuatie. Ook Simondon onderscheidt dus verschillende niveaus waarop individuatie plaatsvindt; elke ware relatie ontwikkelt zich tot een nieuwe individuatie.⁹⁷

Wat is de singulariteit die het proces van individuatie initieert, en de metastabiliteit doorbreekt? Dit kan niet het individu zijn dat in het proces wordt gevormd. Simondon vergelijkt het daarentegen met "de steen die de duin begint."⁹⁸ Een dergelijke singulariteit is anders dan een individu in de zin dat deze enkel lokaal en functioneel gedefinieerd is met betrekking tot de twee orden van grootte die zij in communicatie met elkaar brengt – de zandkorrels en het klimaat.⁹⁹ Een individu kan – afhankelijk van de specifieke situatie – dienen als singulariteit, maar nooit in de individuatie die hemzelf tot stand brengt.

Zo kan een levend individu een psychische individuatie in gang zetten – waarbij een geheel nieuw individu, met een geheel nieuwe relatie tot zijn omgeving ontstaat. Initieel bevindt het levende individu zich in een tropistische¹⁰⁰ eenheid. De wereld dient hier enkel als richting:

⁹⁶ Hierin lijkt transductie op dialectiek, maar volgens Simondon is het verschil dat transductie het proces niet in de tijd plaatst, gezien "tijd zelf een resolutie is, een dimensie van de ontdekte systematiek" en dus ook ontspringt uit de pre-individuele werkelijkheid: Simondon, "The Position of the Problem of Ontogenesis", p. 12.

⁹⁷ Simondon, "The Position of the Problem of Ontogenesis", p. 8.

⁹⁸ Geciteerd in: Bowden, "Gilles Deleuze, a Reader of Gilbert Simondon", p. 139.

⁹⁹ *Ibid.*

¹⁰⁰ Tropisme is een fenomeen waarbij planten in een bepaalde richting groeien of bewegen onder invloed van een externe factor, zoals zwaartekracht of zonlicht.

“als de polariteit van een gradiënt, die het geïndividueerde wezen situeert in een onbepaalde dyade waarvan het de middenpositie inneemt.”¹⁰¹ Ter oplossing van zijn eigen problematiek kan het levende individu zelf deelnemen als element in een grotere problematiek. Het subject wordt dus geboren “als een wezen dat zijn acties door de wereld aan zichzelf weergeeft als een element en een dimensie van de wereld.”¹⁰² Gelijktijdig wordt ook het idee van het object gevormd: het individu plaatst zichzelf als ‘ding’ in een wereld van objecten, welke “de bron worden van de primitieve gradiënten.”¹⁰³

4.4.3 Kennis en Informatie

Met de vorming van het psychische individu ontstaat ook de notie van kennis, begrepen als relatie tussen subject en object. Simondon pleit ervoor om deze relatie radicaal te her-denken, en uit hierbij kritiek op Kant: “er is geen sensatie die als materie *a posteriori* wordt gegeven aan de *a priori* vormen van sensibiteit”¹⁰⁴ – deze opvatting vooronderstelt namelijk al een individu dat tegenover de wereld staat. In plaats daarvan moeten we kennis denken met het individuatieproces. De zogenaamde *a priori* structuren van waarneming – zoals ruimtetijd – zijn een resolutie van de spanningen in een initieel tropistische eenheid. Perceptie, het idee van een ‘ding’, wetenschap en elke verdere ontwikkeling van kennis zijn stappen in een individuatieproces, waarbij zowel het subject als zijn omgeving worden gevormd. De illusie van *a priori* en *a posteriori* volgt enkel uit het bestaan van twee extremen, welke het subject door de vorming van een concept in communicatie brengt.¹⁰⁵

Fundamenteler is voor Simondon het begrip informatie; hij betoogt dat dit het begrip vorm moet vervangen. Informatie moet hier worden begrepen als de betekenis die ontstaat uit een operatie van individuatie waarmee twee uit elkaar liggende werkelijkheden een systeem worden.¹⁰⁶ Zij relateert dus niet enkel aan een denkend subject dat betekenis geeft aan de wereld – ook het kristallisatieproces voltrekt zich door middel van de uitwisseling van informatie van de structuur tussen de individuele deeltjes. Informatie is de basis waarop individuatie plaatsvindt, zonder hieraan vooraf te gaan: de betekenis die wordt gevonden ter resolutie van de inherente problematiek van een systeem. Op deze manier vervangt informatie het hylemorfische begrip vorm als de “structuur van compatibiliteit en levensvatbaarheid”¹⁰⁷ – net zoals de vormen van sensibiteit.

Maar hoe kunnen we kennis hebben van het proces van individuatie, als we het niet kunnen herleiden uit de gevormde individuen, we er geen *a priori* kennis van kunnen hebben, en er geen informatie (oftewel betekenis) bestaat voordat individuatie zich voltrekt? Volgens

¹⁰¹ Simondon, “The Position of the Problem of Ontogenesis”, p. 9.

¹⁰² Simondon, “The Position of the Problem of Ontogenesis”, p. 8.

¹⁰³ *Ibid.*, p.8.

¹⁰⁴ Simondon vergelijkt Kant’s epistemologie hier met het hylemorfische schema van Aristoteles dat hij eerder in het stuk bekritiseert, waarin elk individu wordt gezien als een samenkomst van vorm en materie: *Ibid.*, p. 9.

¹⁰⁵ *Ibid.*, p. 15.

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 9.

¹⁰⁷ *Ibid.*, p. 12. Beschouw ook hier de originele betekenis van het woord *informare*: vormgeven, vormen. Oftewel: het proces waarin vorm tot stand komt.

Simondon kan dit enkel door onszelf te individueren: “De individuatie van de werkelijkheid die uitwendig is aan het subject wordt door hem begrepen door middel van een analoge individuatie van kennis binnenin het subject”¹⁰⁸ – net zoals Bergson stelt dat we ons *in* de beweging van de werkelijkheid moeten plaatsen. Dit laat ook denken aan het psychofysische parallelisme van Einstein en Spinoza.

4.5 Individuatie in de Kwantumwereld

Bij de vier hierboven besproken denkers zagen we als rode lijn het idee van wereld die continu in wording is. Waar Einstein stelde dat de natuurkunde als empirische wetenschap de werkelijkheid moest beschrijven zoals deze is, en dat er daarom een principe van individuatie nodig is om objectief onderscheid te kunnen maken tussen de delen, draaien zij deze redenering om. Statische concepten zijn enkel een abstractie, een bepaald perspectief op een wereld in beweging. Ze dienen een pragmatisch doel, maar stellen ons niet in staat de werkelijkheid te reconstrueren. In plaats daarvan, stelt Simondon, moeten we individuatie zien als “dat wat eerst bekend moet zijn over het zijn.”¹⁰⁹

4.5.1 *Kwantum als Beschrijving van een Pre-individuele Werkelijkheid*

De onvolkomenheid van de klassieke natuurkundige concepten komt volgens Simondon doordat een al geïndividueerde werkelijkheid wordt verondersteld; de kwantummechanica weet daarentegen wel de pre-individuele werkelijkheid te grijpen.¹¹⁰ Hij vergelijkt de golfdeeltjes dualiteit met de méér-dan-eenheid van de pre-individuele werkelijkheid, en refereert hierbij aan Bohr’s concept van complementariteit: net als in de pre-individuele werkelijkheid zijn de concepten van eenheid en identiteit, en dus ook de wet van het uitgesloten midden (het deeltje is óf op positie x óf niet op positie x), niet toepasbaar op de kwantummechanische beschrijving.

Simondon-kenner Barthélémy noemt de kwantummechanica zelfs “een wetenschap van het daadwerkelijke proces van individuatie.”¹¹¹ Hij ziet in de kwantummechanica een paradigma voor het begrijpen van individuatie – maar dit kunnen we voor onze doeleinden hier ook omdraaien. Wat als we het doen van een meting beschouwen als het in communicatie brengen van een hogere (de waarnemer en het meetapparaat) en een lagere (de subatomaire werkelijkheid) orde van grootte, kunnen we dit dan niet begrijpen als een proces van individuatie, waarbij het deeltje ontstaat als middenterm die potentiële relaties tussen de subatomaire wereld en de waarnemer actualiseert? En waarbij ruimte en tijd tevoorschijn komen als dimensies van de gevonden structuur? En betekent dit niet dat de kwantummechanische beschrijving vóór het doen van een meting uiting geeft aan een pre-individuele werkelijkheid, die een bepaalde incompatibiliteit met zichzelf vertoont en potentialen bevat?

¹⁰⁸ *Ibid.*, p. 13.

¹⁰⁹ *Ibid.*

¹¹⁰ *Ibid.*, p. 6.

¹¹¹ Jean-Hugues Barthélémy, “Individuation and Knowledge: The ‘refutation of idealism’ in Simondon’s Heritage in France”, *SubStance* 41, no. 3 (2012): p. 70.

4.5.2 Stiegler en Bohr: Kennis is Performatief

Volgens Stiegler – ook een kenner van Simondon – is kennis van objecten altijd een proces van individuatie, waarbij met behulp van een ‘kwantumsprong’ het object wordt geconstitueerd.¹¹² Kennis is dus performatief¹¹³ en brengt een verandering in de omgeving teweeg. Deze verandering leidt echter altijd tot een nieuwe metastabiliteit, met als gevolg dat kennis nooit compleet kan zijn: “Weten betekent individueren, en individueren betekent het trans-formeren van het te weten object, het onbekend maken, iets dat opnieuw geweten moet worden.”¹¹⁴ Hieruit concludeert Stiegler dat de “tegenstelling tussen subject en object ons niet langer toestaat kennis te denken”, en dat er in de daad van weten altijd sprake is van een “niet-reduceerbare ontoereikendheid.”¹¹⁵

Dit laat sterk denken aan het kwantumpostulaat van Bohr. Ook hij spreekt van een “algemene moeilijkheid in het vormen van menselijke ideeën, inherent aan de scheiding tussen subject en object.”¹¹⁶ Elke observatie brengt noodzakelijkerwijs een verandering in het geobserveerde systeem teweeg, welke op atomaire schaal niet verwaarloosd kan worden. Als gevolg kunnen we nooit complete kennis hebben van een systeem, maar is er altijd sprake van een niet-reduceerbare onzekerheid, uitgedrukt in de onzekerheidsrelatie van Heisenberg.

Betekent dit dan toch dat een mentale operatie van kennis invloed heeft op de fysieke werkelijkheid – in tegenstelling tot wat Spinoza betoogde? Stiegler lijkt dat te impliceren wanneer hij schrijft dat “het individu dat weet de omgeving verandert door deze kennis.”¹¹⁷ Of kunnen we überhaupt niet spreken van een tegenstelling mentaal-fysiek als de subject-object tegenstelling wordt verworpen? De ‘omgeving’ begrepen als een wereld van objecten in de fysieke ruimte ontstaat gelijktijdig met het subject uit een proces van psychische individuatie. We kunnen dus niet stellen dat het subject als een alreeds bestaande term door middel van een mentale operatie invloed uitoefent op een alreeds bestaande fysieke wereld. In plaats daarvan spreekt Bohr van “een invloed op de condities die de mogelijke typen voorspellingen definiëren [...] welke een inherent element vormen van de beschrijving van elk fenomeen waaraan de term ‘fysieke werkelijkheid’ kan worden gekoppeld.”¹¹⁸ Kennis beïnvloed de manier waarop we een fysieke werkelijkheid kunnen definiëren; en dus kan de natuurkunde niet meer doen dat beschrijven wat er gezegd kan worden over de natuur.

¹¹² Bernard Stiegler, “The Uncanniness of Thought and the Metaphysics of Penelope”, *Parrhesia* 23 (2015): p. 69.

¹¹³ Performatief (Frans: performatif) is een term die in taalkunde gebruikt wordt voor uitspraken die dat wat ze beweren zelf ten uitvoer brengen. Het woord lijkt ook van het Latijnse *formare* (vormen) af te stammen, maar heeft in werkelijkheid een Germaanse oorsprong.

¹¹⁴ Stiegler, “The Uncanniness of Thought and the Metaphysics of Penelope”, p. 69.

¹¹⁵ *Ibid.*, p. 70.

¹¹⁶ Bohr, “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, p. 590.

¹¹⁷ Stiegler, “The Uncanniness of Thought and the Metaphysics of Penelope”, p. 70.

¹¹⁸ Bohr, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, p. 700.

4.5.3 *Kritiek van Barthélémy*

Aan de andere kant, geeft deze manier van denken niet een te hoge status aan het subject? Barthélémy verwijt Stiegler – en dit is net zo goed toepasbaar op Bohr – dat hij het pre-individuele reduceert tot de “technisch-wetenschappelijke modus van kennis die we ervan kunnen hebben”¹¹⁹, en het hiermee “onmogelijk maakt om eerst de natuur te denken en dan pas psychisch-sociaal-technische individuatie.”¹²⁰ Stiegler en Bohr verwerpen de subject-object dichotomie door – in navolging van Nietzsche – te stellen dat het object alleen in relatie tot het subject bestaat. Hierin hebben zij gelijk. Maar wanneer Bohr van een fundamentele onzekerheid spreekt, die voortkomt uit de beperkte mate waarin de klassieke concepten waarmee wij onze eigen macroscopische wereld beschrijven toepasbaar zijn op de atomaire wereld, houdt hij nog steeds een onoverbrugbare kloof in stand tussen het subject en een ‘externe’ wereld, alhoewel deze laatste dan misschien niet bestaat uit objecten maar pre-individueel is.

Barthélémy betoogt daarentegen dat de kwantummechanica juist toegang heeft tot de werkelijkheid zoals deze *is* op de kleinste schaal, namelijk waar “*zijn* bestaat uit *worden* – een *worden* door relatie.”¹²¹ Als we trouw willen blijven aan een ‘realisme van relaties’ moeten we ook deze relatie als werkelijk beschouwen. Daarnaast stelt Simondon expliciet dat de individuatie van kennis binnenin het subject *analoog* is aan de individuatie van de werkelijkheid buiten het subject, die met elkaar in communicatie worden gebracht.¹²² Er is dus geen sprake van een onoverbrugbare kloof tussen beide. We kunnen de natuur niet reduceren tot de werkelijkheid van het subject, tot ‘wat we erover kunnen zeggen’, en ook niet tot een aantal vaste identiteiten. We moeten de natuur beschrijven in haar proces van wording.

¹¹⁹ Barthélémy, “Individuation and Knowledge: The ‘refutation of idealism’ in Simondon’s Heritage in France”, p. 65.

¹²⁰ *Ibid.*, p. 69.

¹²¹ *Ibid.*

¹²² Simondon, “The Position of the Problem of Ontogenesis”, p. 13.

5 Everett's Alternatief: een Relatieve Werkelijkheid

Kan de natuurkunde een werkelijkheid beschrijven die continu in wording is? In 1957 zette de Amerikaan Hugh Everett III een alternatieve interpretatie van de kwantummechanica uiteen, waarin hij voorstelde om in plaats van waarnemers een aparte status te geven, alles te beschrijven volgens hetzelfde mechanisme: de continue en deterministische ontwikkeling van de golffunctie volgens de Schrödingervergelijking.¹²³ Het 'verval' van de golffunctie is dan enkel een subjectieve verschijning; en geïndividueerde objecten – oftewel systemen met vast gedefinieerde eigenschappen – een relatieve werkelijkheid.

5.1 Theorie van de Universele Golffunctie

Everett beschrijft zijn theorie als volgt: De golffunctie is een complete en objectieve beschrijving van een systeem. Wanneer twee systemen een interactie met elkaar aangaan, worden ze met elkaar gecorreleerd en vormen ze een samengesteld systeem. De subsystemen kunnen dan niet meer los van de rest van het systeem worden beschreven – en bezitten dan dus ook geen onafhankelijke werkelijkheid meer. Wel kunnen we iets zeggen over hun relatieve staat ten opzichte van de rest van het systeem.

Neem bijvoorbeeld weer de twee spin- $\frac{1}{2}$ deeltjes die spontaan worden gevormd uit een spin-zero deeltje zoals beschreven in Hoofdstuk 3. We kunnen niet de staat van één van de twee deeltjes apart geven, maar wel ten opzichte van het andere deeltje: als de ene spin-up heeft, heeft de andere spin-down. En als de ene spin-down heeft, heeft de andere spin-up. De staat van het ene deeltje is dus relatief aan de staat van de ander.

5.1.1 Het Meetproces

Het meetproces is voor Everett niks anders dan een speciaal soort interactie tussen twee systemen, waarbij een eigenschap van het ene systeem wordt gecorreleerd aan een eigenschap van de ander. Een snelheidsmeter in een auto correleert de snelheid van het voertuig aan de richting van de wijzer op het dashboard, net zoals een thermometer de temperatuur correleert met de hoogte van het kwik.

In de kwantummechanica meet men over het algemeen aan systemen op zeer kleine schaal. Er is dan een amplificatieproces nodig om de systeemeigenschap te correleren met een macroscopische eigenschap van het meetapparaat, die kan worden waargenomen. Voorbeelden hiervan zijn een geigerteller¹²⁴ of een fotomultiplicator. Zo'n apparaat bevindt zich initieel in een metastabiele situatie. Een kleine invloed van buiten – zoals een inkomend deeltje – veroorzaakt dan een kettingreactie die de verstoring naar de rest van het systeem communiceert, en zo de twee verschillende orden van grootte met elkaar correleert. Hier is sprake van een transductief proces.

¹²³ Everett, "Theory of the Universal Wavefunction", pp. 3-140.

¹²⁴ Een geigerteller is een apparaat dat individuele stralingsdeeltjes telt, met behulp van een buis gevuld met gas onder hoge spanning. Wanneer stralingsdeeltje de buis bereikt veroorzaakt deze een kettingreactie waarbij het gas wordt geïoniseerd en kortstondig een stroompje ontstaat, die wordt geregistreerd als één tel.

Wat gebeurt er wanneer het systeem waaraan gemeten wordt geen vast gedefinieerde eigenschappen heeft, maar zich in een superpositie bevindt? Volgens Everett moeten we dit op dezelfde manier zien als elk ander natuurlijk proces: nadat de twee systemen met elkaar zijn gecorreleerd, kunnen we niet meer spreken van een individuele staat van het objectsysteem of het meetsysteem, maar bevindt het gehele samengestelde systeem zich in een superpositie, waarbij elke term correspondeert met een mogelijke initiële staat van het objectsysteem en een staat van het meetsysteem die de bijbehorende meetuitkomst geeft. De staat van het meetsysteem is dan relatief aan de staat van het objectsysteem, en andersom.

Dit laat denken aan Schrödinger's beroemde katparadox:¹²⁵ Stel een kat bevindt zich in een afgesloten doos, met daarin een kleine hoeveelheid radioactief materiaal, een geigerteller en een flesje met een dodelijk gif. De kans dat één van de radioactieve deeltjes binnen een uur vervalt is 50 procent. Als dat gebeurt gaat de geigerteller af, en wordt een hamer in beweging gezet die het flesje breekt, waardoor de kat sterft.

Radioactief verval is een puur kwantummechanisch proces. Na een uur wordt de toestand van het radioactief materiaal dus compleet beschreven door een superpositie van wél vervallen en niet vervallen. Omdat de toestand van de kat via het meetsysteem is gecorreleerd met de toestand van het radioactieve materiaal, bevindt deze zich nu óók in een superpositie: de kat is zowel dood als levend. Of beter gezegd: de staat van de kat is niet meer onafhankelijk te definiëren, maar relatief aan de staat van de rest van het systeem. Als een deeltje is vervallen, is de kat dood; en als geen deeltje is vervallen, is de kat levend. Deze mogelijkheden bestaan naast elkaar.

Toch lijkt dit niet te kloppen met onze ervaring: we nemen een kat altijd als dood óf levend waar. Hoe valt dit te rijmen?

5.1.2 Waarneming

Wat nou, vraagt Everett, als we een waarnemer simpelweg ook beschouwen als een natuurlijk systeem? Een waarneming is dan een interactie, die de waarnemer correleert met het waargenomen systeem – net zoals Simondon stelt dat individuatie van kennis gepaard gaat met de individuatie van het gekende. Zodra een waarnemer de doos opent om te controleren of de kat dood of levend is, verliest de waarnemer zijn onafhankelijkheid. Zijn staat is nu relatief aan de staat van de rest van het systeem. Het gehele systeem doos met inhoud plus waarnemer bevindt zich in een superpositie, waarbij elke term correspondeert met een waarnemer die de kat dood óf levend aantreft – in overeenstemming met onze ervaring.

Op deze manier splits de werkelijkheid zich dus in verschillende mogelijkheden, die naast elkaar blijven bestaan in een superpositie. Elke term beschrijft een systeem met vast gedefinieerde eigenschappen, en een waarnemer met een definitieve meetuitkomst. Voor elke waarnemer lijkt het alsof de golffunctie op discontinue wijze vervalt in een eigenstaat van de meting (dood of levend). En omdat vanuit de relatieve staat van de waarnemer maar één van de twee mogelijkheden wordt gerealiseerd, maar hij niet kon zeggen welke, leek de

¹²⁵ John D. Trimmer, "The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger's 'Cat Paradox' Paper", *Proceedings of the American Philosophical Society* 124, no. 5 (1980): pp. 323-338.

uitkomst van de meting onbepaald. In werkelijkheid is het gehele proces continu en deterministisch, en worden beide mogelijkheden parallel aan elkaar gerealiseerd.

Wat gebeurt er nu in een situatie met meerdere waarnemers? Stel een waarnemer bevindt zich in een afgesloten ruimte en doet een meting aan een systeem – laten we zeggen, de doos met de kat. Wanneer hij de doos heeft geopend, schrijft hij zijn resultaat – dood of levend – op in zijn notitieboek. Een tweede waarnemer die zich buiten de kamer bevindt is benieuwd naar wat er in het boekje staat, en berekent de golffunctie voor de gehele kamer inclusief de andere waarnemer aan de hand van de Schrödingervergelijking. Deze golffunctie is de hierboven genoemde superpositie, waarvan elke term correspondeert met een waarnemer die de kat dood óf levend heeft aangetroffen. Zodra de tweede waarnemer de kamer binnenloopt, bevindt ook hij zich in een superpositie, waarvan elke term correspondeert met een definitief resultaat. Voor beide waarnemers lijkt de superpositie te vervallen door hún waarneming, maar die ervaring is enkel subjectief. “Het is niet zozeer het systeem dat wordt beïnvloed door een waarnemer”, schrijft Everett, “als wel de waarnemer, die wordt gecorreleerd met het systeem.”¹²⁶

5.1.3 Informatie

Ook in Everett’s theorie speelt het begrip informatie een centrale rol. Hij definieert informatie als de ‘scherpheid’ van de waarschijnlijkheidsverdeling van een variabele.¹²⁷ Stel we hebben een systeem, bijvoorbeeld een deeltje in een afgesloten doos, waarvan de positie onbekend is. Als de waarschijnlijkheid om het deeltje ergens te vinden gelijk verdeeld is over de gehele doos, is de informatie minimaal. De informatie neemt toe naarmate we met meer zekerheid kunnen zeggen waar het deeltje zich bevindt.

Bij de formulering van het meetproces stelt Everett als voorwaarde dat de informatie van de eigenschap die wordt gemeten in het proces nooit afneemt; anders zou er geen sprake zijn van een meting. Dit betekent dat een systeem dat zich in een eigentoestand van de meting bevindt – en dus van tevoren volledig bepaald is – niet verstoord mag worden door de meting. De informatie was vóór het doen van de meting immers al maximaal. Deze voorwaarde garandeert op zijn beurt weer de herhaalbaarheid van metingen: na het doen van een meting bevindt voor elke relatieve toestand van de waarnemer het systeem zich in een eigentoestand van de meting – die correspondeert met een definitieve meetuitkomst. Als de meting dan direct wordt herhaald, wordt deze toestand niet verstoord, en krijgt de waarnemer dezelfde uitkomst. Dit is geheel in overeenstemming met de voorspellingen van de kopenhageninterpretatie voor een enkele waarnemer.

¹²⁶ Everett, “Theory of the Universal Wavefunction”, p. 116.

¹²⁷ Om precies te zijn: de informatie I_X van de stochastische variabele X wordt gedefinieerd als $I_X = -\sum_i P(x_i) \ln P(x_i)$, waarbij $P(x_i)$ de waarschijnlijkheidsverdeling van X is. De informatie van een operator A wordt gedefinieerd als de informatie van de verdeling van de kwadratische amplitudes over de eigenwaarden van de operator. Zie: Everett, “Theory of the Universal Wavefunction”, pp. 15-16 en 44.

5.2 Discussie van de Metafysische Implicaties

De interpretatie van Everett is aantrekkelijk door haar logische simpliciteit. Er is in het formalisme van de kwantummechanica namelijk geen reden waarom de golffunctie zou moeten vervallen bij het doen van een waarneming – dit wordt enkel gepostuleerd om de theorie te laten overeenkomen met onze ervaring. Everett laat zien dat zijn theorie ook zonder dit verval tot dezelfde voorspellingen leidt. Vanuit het perspectief van de waarnemer lijkt de golffunctie dan discontinu te vervallen, maar de theorie als geheel is continu en deterministisch.

Aan de andere kant is Everett's interpretatie minder sober in het aantal parallele werkelijkheden dat ze impliceert. Elke keer wanneer er verschillende mogelijkheden zijn, blijven deze naast elkaar bestaan, met als gevolg dat de werkelijkheid zich oneindig blijft vertakken. Dit doet denken aan wat Bergson noemde creatieve evolutie: “de doorlopende creatie van nieuwe mogelijkheden en niet alleen van werkelijkheid.”¹²⁸ Tenminste, als we werkelijkheid hier dan opvatten als dat wat wij ervaren. Hoe past dit in onze eerdere discussie over het debat tussen Bohr en Einstein en het proces van individuatie?

5.2.1 Schrödinger's Kat in de Kopenhageninterpretatie

Tegenwoordig worden gedachtenexperimenten zoals die van Schrödinger's kat vaak afgedaan met het argument dat 'kwantumachtige' verschijnselen simpelweg niet toepasbaar zijn op de macroscopische wereld.¹²⁹ Bohr was hier echter vrij ambigu over: Aan de ene kant schrijft zijn kwantumpostulaat aan atomaire processen een “essentiële discontinuïteit toe [...] die de klassieke theorieën compleet vreemd is.”¹³⁰ Dit lijkt een fundamentele tegenstelling tussen de micro- en macrowereld te impliceren. Aan de andere kant stelt Bohr dat het “een kwestie van gemak is op welk punt het concept van observatie en het kwantumpostulaat met zijn inherente ‘irrationaliteit’ wordt ingebracht.”¹³¹ Waarmee hij lijkt te suggereren dat hij de mogelijkheid van kwantumeffecten of macroscopische schaal niet direct verwerpt.

Maar dit is niet per se tegenstrijdig. De golffunctie is voor Bohr geen objectieve beschrijving van de werkelijkheid, maar een wiskundig construct die ons helpt bij het doen van voorspellingen. Er moet altijd een onderscheid worden gemaakt tussen de kwantummechanische wereld van het objectsysteem en de klassieke wereld van het meetsysteem. Maar waar de grens precies komt te liggen is een “kwestie van gemak”, en kan dus altijd zo worden gekozen dat ze “in het bijzonder elke denkbare inconsistentie in de kwantummechanische beschrijving uitsluit.”¹³²

Om de paradox van Schrödinger te ontwijken kan dus simpelweg worden gesteld dat het beslissende moment voor de kat al plaats vindt voordat de waarnemer de doos opent – bijvoorbeeld in de geigerteller – waardoor de kat nooit tegelijkertijd dood of levend is. De

¹²⁸ Bergson, “Growth of Truth. Retrograde Movement of the True”, p. 20.

¹²⁹ Dit proces wordt *quantum decoherence* genoemd, zie: Maximilian Schlosshauer, *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition* (Berlijn: Springer, 2007).

¹³⁰ Bohr, “The Quantum Postulate and the Recent Development in Atomic Theory”, p. 580.

¹³¹ *Ibid.*

¹³² Bohr, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, p. 701.

kwantummechanische beschrijving, waarbij het gehele systeem inclusief de kat zich in een superpositie bevindt, is namelijk niet 'echt'. Deze dient enkel als een hulpmiddel voor het voorspellen van de mogelijke waarnemingen wanneer de doos wordt geopend.

Everett beaamt dat de Kopenhageninterpretatie "veilig is voor tegenstrijdigheden", maar misschien iets té:¹³³ Het doel van een natuurkundige theorie is niet alleen om bekende resultaten samen te vatten en om als gereedschap te dienen voor de ingenieur, maar juist ook om nieuwe, onverwachte fenomenen te voorspellen die ons verder helpen in ons algehele begrip van de natuur. Perfect "veilige" theorieën, waarvan de concepten alleen refereren naar dingen die direct waarneembaar zijn, zouden dit laatste doel in de weg staan.

Daarnaast bespeurt Everett in de Kopenhageninterpretatie een bepaalde ambiguïteit in wat wordt gezien als werkelijkheid. Aan de ene kant schrijft ze aan de klassieke macroscopische wereld een realiteit toe met de mogelijkheid tot objectieve beschrijving. Aan de andere kant wordt deze mogelijkheid in de kwantumwereld ontkend. Everett verwerpt het Kantiaanse idee dat we alleen een objectieve beschrijving kunnen geven van de condities waaronder een fenomeen kan worden waargenomen, maar niet van de onderliggende werkelijkheid *ansich*. In plaats daarvan is alles even 'echt' is, en wordt er geen uitzonderingspositie toegekend aan de waarnemer in zijn theorie.

5.2.2 Oneindige werkelijkheid

De metafysica van Spinoza lijkt beter te passen bij Everett's theorie. Spinoza schrijft dat "een oneindig aantal dingen in een oneindig aantal modi" moeten volgen uit de noodzakelijkheid van de natuur zelf (EIP16). Daarnaast stelt hij dat *dat wat is* niet anders had kunnen zijn dan zoals het gevolgd is uit de essentie van de natuur (EIP33). Alles wat mogelijk is moet dus ook zijn, want anders had *dat wat is* ook anders kunnen zijn. Dit zien we precies bij Everett: alle mogelijke modi van zijn staan op gelijke voet, en blijven naast elkaar bestaan. Met als gevolg dat de werkelijkheid zicht vertakt in een oneindig aantal 'mogelijkheden'.

Dit laatste is moeilijk voorstelbaar. Maar als we de bevindingen van de kwantummechanica accepteren, waarbij een microscopisch systeem in een superpositie van verschillende mogelijkheden kan zijn; hoezo kunnen we dan onszelf niet als in een soortgelijke situatie beschouwen, maar plaatsen we onszelf buiten de werkelijkheid door te eisen we dat het systeem een definitieve toestand 'kiest' zodra wij er een interactie mee hebben? Dit kan worden gekoppeld aan Spinoza's idee van immanentie: alles is in essentie hetzelfde en wordt beschreven door één fundamentele entiteit – de golffunctie. In theorie is het zelfs mogelijk om één golffunctie op te stellen voor het gehele universum. Vervolgens geven de 'modi' op verschillende manieren uiting aan deze essentie volgens een puur deterministisch – en dus noodzakelijk – mechanisme.

Zou Einstein kunnen instemmen met deze interpretatie, gezien de overeenkomsten met Spinoza? Dat blijft natuurlijk gissen. Het continue en deterministische karakter van de theorie zou hem moeten aanspreken. Daarnaast blijft lokaliteit gewaarborgd in theorie van Everett – het correleren van systemen is een lokaal proces, en gebeurtenissen verplaatsen

¹³³ Everett, "The Theory of the Universal Wavefunction", p. 111.

zich nooit sneller dan het licht. Maar Einsteins separabiliteitsprincipe blijft niet behouden: systemen die ruimtelijk van elkaar zijn gescheiden hebben niet altijd een onafhankelijk bestaan. In het algemeen kunnen we juist alleen spreken van hun relatieve staat ten opzichte van de rest van het systeem.

Wel heeft Einstein in de interpretatie van Everett gelijk wat betreft de incompleetheid van de kwantummechanische beschrijving in het EPR-gedachtenexperiment. De golffunctie die wordt toegeschreven aan het verre systeem, na het 'verval' van de totale golffunctie door een meting aan het andere systeem, beschrijft maar één van de mogelijkheden waarin de werkelijkheid zich vertakt. In Everett's interpretatie blijven deze mogelijkheden naast elkaar bestaan. De golffunctie die aan het systeem wordt toegeschreven is dan dus geen complete beschrijving, maar een beschrijving relatief aan de waarnemer.

5.2.3 *Trajecten van waarnemers*

Wat betekent deze vertakking voor de eenheid van het subject? Bij James zagen we dat de ervaring van het subject wordt gekenmerkt door continuïteit. En Bergson zei: "bewustzijn betekent geheugen."¹³⁴ Wanneer een waarnemer een meting doet, en de werkelijkheid zich vertakt in verschillende mogelijke meetuitkomsten, vindt er een discontinuïteit plaats tussen de ervaringen van de waarnemer in de verschillende takken. Er kan dan dus niet meer sprake zijn van één waarnemer.

In plaats daarvan spreekt Everett van "trajecten van waarnemers."¹³⁵ Elk pad door de verschillende vertakkingen correspondeert met een waarnemer met een eigen, unieke, continue ervaring van de werkelijkheid (zie figuur 1). Voor elk van deze waarnemers lijkt er altijd één werkelijkheid te zijn, waarin metingen altijd maar één uitkomst hebben en de kans om een bepaalde meetuitkomst te krijgen – oftewel om zich in een bepaalde tak te bevinden – wordt gegeven door de normale wetten van de kwantummechanica. Dit komt overeen met onze ervaring. Of wat Bergson noemde: "het continue leven van een herinnering."¹³⁶

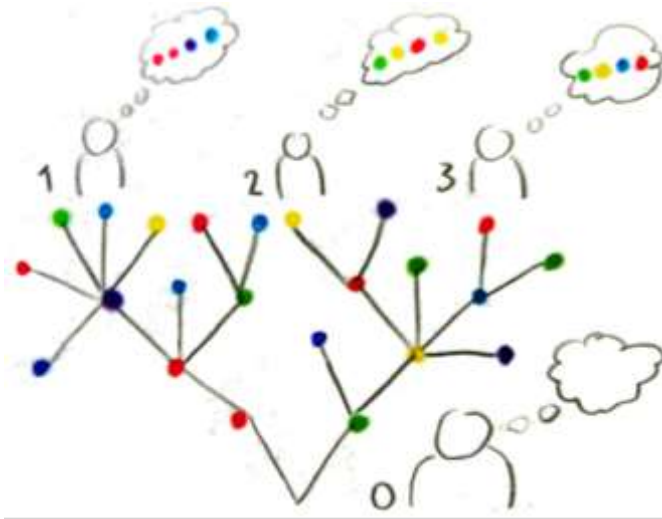
5.2.4 *Individuatie door correlatie*

Hoe ontstaat het individu in de interpretatie van Everett? We zagen al dat een microscopisch systeem – zoals een deeltje – vast gedefinieerde eigenschappen krijgt vanuit het perspectief van een waarnemer door zich met deze te correleren. Hiervoor was een initieel metastabiele situatie nodig en een amplificatieproces dat de uit elkaar liggende orden van grootte met elkaar in communicatie bracht. Ook speelde hier het begrip informatie een centrale rol: alleen als de informatie in het proces toeneemt is er sprake van een meting en dus individuatie. Dit lijkt overeen te komen met het proces van individuatie dat Simondon beschrijft.

¹³⁴ Bergson, "An Introduction to Metaphysics", p. 12.

¹³⁵ Everett, "Theory of the Universal Wavefunction", p. 73.

¹³⁶ Bergson, "An Introduction to Metaphysics", p. 44.



Figuur 2 Schematische weergave van hoe de vertakking van de werkelijkheid leidt tot verschillende waarnemers. Elke splitsing symboliseert een meting, al dan niet met verschillende mogelijke uitkomsten. Elk gekleurd bolletje staat voor een meetuitkomst. Aan het begin van het proces is er één waarnemer (0), waaruit uiteindelijk meerdere waarnemers volgen die elk een eigen, unieke, continue ervaring hebben. Drie hiervan zijn weergegeven (1,2,3).

Net als bij Simondon is in de interpretatie van Everett het ontstane individu enkel een relatieve werkelijkheid. Voor Simondon is het individu relatief op twee manieren: “het is niet al het zijn, en het resultaat van een staat van zijn waarin het noch als individu noch als principe van individuatie bestond.”¹³⁷ Het individu is een “zekere fase van zijn die een pre-individuele werkelijkheid veronderstelt, en die, zelfs na de individuatie, niet op zichzelf bestaat.”¹³⁸ Dit zien we terug bij Everett: vóór de meting bevindt het systeem zich – vanuit het perspectief van de waarnemer – in een pre-individuele toestand, waar het nog geen definieerbare eigenschappen heeft. Het individu dat vervolgens ontstaat in het meetproces is niet ál het zijn maar één van de mogelijkheden die naast elkaar blijven bestaan. Het heeft daarmee geen onafhankelijk bestaan, maar is relatief aan de toestand van de rest van het systeem.

Hoe ontstaan dan macroscopische objecten? Everett beschrijft dit als volgt: stel we hebben een afgesloten doos met daarin een elektron en een proton. Initieel is van beide deeltjes de positie onbekend, en de kans om het ergens te vinden gelijk over de doos verdeelt – zodat de informatie van de positie van beide deeltjes minimaal is. Na verloop van tijd verwachten we dat de deeltjes met elkaar gecorreleerd raken en een waterstofatoom vormen. De mogelijke posities van beide deeltjes zijn nog steeds uniform over de doos verdeelt, maar deze zijn niet meer onafhankelijk. In plaats daarvan is de positie van het ene deeltje nu relatief aan die van de ander, zij moeten namelijk voldoen aan de golf functie van een waterstofatoom. Kennen we nu de positie van één van de twee deeltjes, dan weten we ook meer over de positie het andere deeltje. De totale informatie is dus toegenomen.

Naarmate meer deeltjes zich op dezelfde manier met het systeem correleren, blijft de informatie toenemen – vergelijk dit met het kristallisatieproces dat Simondon beschrijft. De positie van elk van de deeltjes apart blijft even onbekend. Maar “desondanks kunnen we spreken van het bestaan van een relatief goed gedefinieerd object”, schrijft Everett, “gezien

¹³⁷ Simondon, “The Position of the Problem of Ontogenesis”, p. 5.

¹³⁸ *Ibid.*

de specificatie van de positie van één van de deeltjes, of het zwaartepunt, leidt tot een situatie waarin de relatieve posities van de overgebleven deeltjes dicht verdeeld zijn rond de gespecificeerde positie, op een manier dat ze een relatief goed gedefinieerd object vormen.”¹³⁹

De golf functie van het totale systeem beschrijft dan dus geen onsamenhangende verzameling van deeltjes (lage informatie), maar – doordat de deeltjes met elkaar zijn gecorreleerd – een superpositie waarin elke term een relatief goed gedefinieerd object (hoge informatie) op een andere positie beschrijft. Wanneer een waarnemer nu ook met het systeem wordt gecorreleerd, wordt zoals we eerder zagen ook hij een onderdeel van de superpositie. Elke term correspondeert dan met een waarnemer die een object op een andere definitieve positie waarneemt. Het object is dus – zoals Nietzsche zei – altijd een subjectieve werkelijkheid.

5.2.5 *Overgang naar de klassieke wereld*

Stel nu we hebben een systeem waarvan de positie van het zwaartepunt in eerste instantie bekend is. Na verloop van tijd verspreidt dit systeem zich dan volgens de wetten van de kwantummechanica langzaam door de ruimte, waardoor de positie steeds meer onbekend wordt. De snelheid waarmee dit gebeurt is echter afhankelijk van de massa van het object: een klein systeem zoals een enkel waterstofatoom vertoont vrijwel direct ‘kwantumachtig’ gedrag. Voor een macroscopisch systeem daarentegen – bestaande uit typisch zo’n 10^{23} deeltjes – is de tijd voordat deze effecten merkbaar zijn zó groot dat deze verwaarloosbaar is op de schaal van een mensenleven. In plaats daarvan zal het systeem zich bij (goede) benadering gedragen volgens de wetten van de klassieke mechanica.

De golf functie van een macroscopisch systeem beschrijft dus in het algemeen geen objecten met goed gedefinieerde eigenschappen, maar kan altijd worden gezien als een superpositie van toestanden die dat wel doen. Een waarnemer ziet altijd een wereld van objecten, die zich bij herhaalde observatie bij benadering gedragen volgens de wetten van de klassieke mechanica. Hoe goed deze benadering is, hangt af van de massa van het systeem. Zo laat Everett zien hoe in zijn interpretatie de verschijning van de klassieke wereld volgt uit de kwantumwereld op continue en deterministische wijze.

¹³⁹ Everett, “Theory of the Universal Wavefunction”, p. 87.

6 Conclusie

De ontwikkelingen in de kwantummechanica van de afgelopen eeuw vragen om een metafysische interpretatie. Door de jaren heen zijn verschillende voorstellen gedaan, maar er is nog geen eenduidig antwoord. Hier is getracht deze discussie voort te zetten door een aantal van deze voorstellen vanuit een filosofisch perspectief te onderzoeken.

In 1927 was Niels Bohr de eerste die een coherent antwoord wist te formuleren. Zijn Kopenhageninterpretatie stelde dat de concepten van de klassieke natuurkunde maar in beperkte mate toepasbaar zijn op de onderliggende werkelijkheid. We kunnen verschillende tegenstrijdige concepten op dezelfde werkelijkheid plakken afhankelijk van de keuze in experimentele opstelling, maar we zijn wel aan deze concepten gebonden omdat deze de macroscopische wereld van de meetinstrumenten beschrijven – de wereld die wij waarnemen. Uitspraken over de werkelijkheid hebben dus alleen betekenis in relatie tot een mogelijke waarneming. Bohr veronderstelt een discontinuïteit tussen de ervaringswereld en een onderliggende ‘echte’ wereld, en plaatst zichzelf hiermee in de traditie van Kant.

Einstein uitte kritiek op deze interpretatie. Als aanhanger van Spinoza hield hij vast aan het idee van een deterministische waarnemer-onafhankelijke werkelijkheid, en de mogelijkheid om deze te objectief te beschrijven. Het discontinue en indeterministische karakter van de kwantummechanische beschrijving was volgens Einstein enkel het gevolg van een tekort aan kennis. Zijn realisme was gebaseerd op twee vooronderstellingen: het lokaliteitsprincipe stelt dat gebeurtenissen alleen een effect kunnen hebben op hun directe omgeving; het separabiliteitsprincipe dat aan ruimtelijk gescheiden systemen een onafhankelijke werkelijkheid kan worden toeschreven.

In het licht van de Bell-experimenten zijn echter niet beide principes houdbaar. Om recht te doen aan Einsteins bewaren en de experimentele feiten moet één van de twee verworpen worden. Het lokaliteitsprincipe essentieel is in de algemene relativiteitstheorie, en wordt ook door Bohr en zijn aanhangers niet direct verworpen. Daarom wordt voorgesteld om het separabiliteitsprincipe op te geven. Hierdoor komen we op de vraag aan welke delen van de werkelijkheid we dan wel een onafhankelijk bestaan kunnen toewijzen – een probleem van individuatie.

Dit is een veelbesproken onderwerp in de filosofie. Vanuit de ideeën van Nietzsche, James en Bergson wordt een omkering van de normale manier van denken in dit aspect betoogd. Zij stellen dat wij wel degelijk directe toegang hebben tot de werkelijkheid – de wereld die we ervaren is de enige ‘echte’ wereld. Het probleem in het westerse denken is dat altijd wordt uitgegaan van een wereld van dingen die zijn, en we deze met statische concepten proberen te reconstrueren. Maar in werkelijkheid is de wereld die we ervaren altijd in wording. Simondon neemt deze ideeën over en komt tot de conclusie dat we niet het individu, maar het proces waarin het individu tot stand komt als primair moeten beschouwen, voordat er iets gezegd kan worden over het zijnde. Hij laat zien hoe het individu dan als relatieve

realiteit ontspringt uit een pre-individuele werkelijkheid, dat zichzelf structureert door een systeem van relaties te vormen.

De alternatieve interpretatie van Everett sluit goed aan bij deze ideeën. Hij verwierpt het idee dat de golf functie 'vervalt', en kent aan de waarnemer geen aparte status toe. In plaats daarvan postuleert hij enkel de continue en deterministische ontwikkeling van een systeem volgens de Schrödingervergelijking. Dit impliceert dat alle mogelijkheden van de werkelijkheid in een superpositie blijven bestaan. Bij het doen van een waarneming raakt de waarnemer gecorreleerd met het waargenomen systeem, waardoor ook hij in een superpositie raakt waarvan elke term correspondeert met een waarnemer die het systeem in een definitieve staat aantreft. Het individu – oftewel een systeem met goed gedefinieerde eigenschappen – is dan een relatieve werkelijkheid.

Everett's theorie en de Kopenhageninterpretatie vormen beide een coherent antwoord op het kwantummechanische vraagstuk, en zijn equivalent wat betreft de voorspellingen die ze doen. Welke verdient de voorkeur? Het is begrijpelijk dat de ingenieur voor de Kopenhageninterpretatie kiest. Een waarnemer ziet altijd een definitieve meetuitkomst, en de Kopenhageninterpretatie biedt het gereedschap om deze zo goed mogelijk te voorspellen. Waarom zou men zich dan achteraf nog druk maken over mogelijkheden die niet zijn waargenomen?

Maar vanuit een wijsgerig oogpunt is de Kopenhageninterpretatie wel erg 'veilig.' Er is geen reden waarom de golf functie zou moeten vervallen als gevolg van een waarneming; Everett laat zien dat zonder dit te postuleren exact dezelfde voorspellingen kunnen worden gedaan. Als we accepteren dat in de kwantummechanische werkelijkheid meerdere mogelijkheden naast elkaar kunnen bestaan; waarom kunnen we onszelf dan niet als in een soortgelijke situatie beschouwen, maar eisen we dat elk systeem een definitieve positie kiest zodra wij er interactie mee hebben – alsof wij buiten de werkelijkheid staan en hier geen onderdeel van uitmaken?

Daarnaast ervaren we een wereld die wordt gekenmerkt door continuïteit. We hebben geen grond waarop we kunnen stellen dat de wereld discontinu is, en de onze niet de echte. Bohr had misschien gelijk door te zeggen dat we met statische concepten de wereld nooit volledig kunnen grijpen. Maar het is niet zo dat het menselijk denken hier tot is beperkt. Zelfs de exacte wetenschappen hebben met de differentiaalrekening – zoals Everett met de Schrödingervergelijking laat zien – een middel om een wereld uit te drukken die continu in wording is; een deterministische wereld waarin toch niet alles voorspelbaar is, omdat elke relatie – en kennis is een relatie – de creatie van nieuwe mogelijkheden impliceert. Dat is de wereld die we ervaren.

Vanuit de filosofische invalshoek die hier is gekozen verdient de theorie van Everett dus de voorkeur. Everett schreef aan het einde van zijn scriptie dat hij met zijn theorie poogde een brug te slaan tussen de posities van Einstein en Bohr. Ik hoop dat ik, ondanks de beperkte visie van dit onderzoek, ook een klein steentje heb kunnen bijdragen aan de voortzetting van hun discussie, en de lezer heb kunnen enthousiasmeren voor de wonderen van de kwantumwereld – die toch ook de onze is.

Literatuurlijst

- Einstein, Albert. "Physics and Reality." *Journal of the Franklin Institute* 221, no. 3 (1936): pp. 349-382.
- Bohr, Niels. 'The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory.' *Nature* 121, no. 3050 (1928): pp. 580-590.
- Einstein, Albert. "Autobiographical Notes". In *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, bewerkt door Paul Arthur Schilpp, pp. 1-95. New York: MFJ Books, 1970.
- Clauser, John F. "Early History of Bell's Theorem". In *Quantum [Un]speakables*, bewerkt door R.A. Bertlmann en A. Zeilinger, pp. 61-98. Berlijn: Springer, 2002.
- Kumar, Manjit. *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*. New York: W.W. Norton & Company, 2010. ISBN: 978-0-393-07829-9.
- Everett III, Hugh. "Theory of the Universal Wavefunction". In *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, bewerkt door Bryce S. DeWitt en Neill Graham, pp. 3-140. Princeton: Princeton University Press, 1973.
- Born, Max en Albert Einstein. *The Born-Einstein Letters*. Vertaald door Irene Born. Londen: The MacMillan Press, 1971.
- Young, Thomas. "The Bakerian Lecture. Experiments and Calculations Relative to Physical Optics". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 94 (1804): pp. 1-16.
- Tonomura, A., J. Endo, T. Matsuda en T. Kawasaki. "Demonstration of Single-Electron Build-up of an Interference Pattern." *American Journal of Physics* 57, no. 2 (1989): pp. 117-120.
- Feynman, Richard. *The Character of Physical Law*. Londen: British Broadcasting Cooperation, 1965.
- Nietzsche, Friedrich. *Twilight of the Idols*. Vertaald door Richard Polt. Indianapolis: Hackett Publishing Company, 1997.
- Bohr, Niels. "Can Quantum Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?" *Physical Review* 48, no. 8 (1935): pp. 696-702.
- Kant, Immanuel. *Prolegomena to Any Future Metaphysics*. Vertaald en bewerkt door Gary Hatfield. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- Born, Max. *Natural Philosophy of Cause and Chance*. Oxford: Oxford University Press, 1949.
- Bergson, Henri. *An Introduction to Metaphysics*. Vertaald door T.E. Hulme. New York: G.P. Putnam's Son, 1912.

- Einstein, Albert. *Letters to Solovine 1906-1955*. New York: Open Road Media, 2011.
- Einstein, Albert, Boris Podolsky, en Nathan Rosen. "Can Quantum Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?" *Physical Review* 47, no. 10 (1935): pp. 777-780.
- Griffiths, David en Darrell Schroeter. *Introduction to Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. ISBN 978-1-107-18963-8h.
- Bell, John. "On the Einstein Podolsky and Rosen Paradox". *Physics* 1, no. 3 (1964): pp. 195-200.
- Bohm, David en Yakir Aharonov. "Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky". *Physical Review* 108, no. 4 (1957): pp. 1070-1076.
- Hensen, Bob, H. Bernien, A. E. Dréau, A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, J. Ruitenbergh, R. F. L. Vermeulen, R. N. Schouten, C. Abellán, et al. "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres". *Nature* 526, no. 7575 (2015): pp. 682-686.
- Howard, Don. "Einstein on Locality and Separability". *Studies in History and Philosophy of Science* 16, no. 3 (1985): pp. 171-201.
- Fine, Arthur. "Einstein's Interpretations of the Quantum Theory". *Science in Context* 6, no. 1 (1993): pp. 257 – 273.
- Wiseman, Howard. "Death by experiment for local realism". *Nature* 526, no. 7575 (2015): pp. 649-650.
- Paty, Michel. "Einstein and Spinoza." In *Spinoza and the Sciences*, bewerkt door Marjorie Grene en Debra Nails, pp. 267-304. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1986.
- Jammer, Max. *Einstein and Religion: Physics and Theology*. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- Spinoza, Baruch. "The Ethics". In *A Spinoza Reader*, bewerkt door Edwin Curley, pp. 85-265. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- Einstein, Albert, Max Planck en James Murphy. "Epilogue: A Socratic Dialogue". In *Where is Science Going*, vertaald door James Murphy, pp. 201-221. New York: Norton, 1932.
- Howard, Don. "Holism, separability, and the metaphysical implications of the Bell experiments." In *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. Bewerkt door James Cushing en Ernan McMullin, pp. 224-253. Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1989.

- Nietzsche, Friedrich. "First Essay". In *On the Genealogy of Morality*, vertaald door Carol Diethe, pp. 10-34. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- Nietzsche, Friedrich. *The Will to Power*. Vertaald door R. Kevin Hill en Michael A. Scarpitti. Londen: Penguin Books, 2017.
- James, William. "A World of Pure Experience". *Journal for Philosophy, Psychology, and Scientific Methods* 1, no. 3 (1904): pp. 533-543.
- Bergson, Henri. *The Creative Mind*. Vertaald door Mabelle L. Andison. New York: The Philosophical Library, 1946.
- Simondon, Gilbert. "The Position of the Problem of Ontogenesis". Vertaald door Gregory Flanders. *Parrhesia* 7, no. 1 (2009): pp. 4-16.
- Bowden, Sean. "Gilles Deleuze, a Reader of Gilbert Simondon". In *Gilbert Simondon: being and technology*, pp. 135-153. Edinburgh: Edinburgh University Press, 2012.
- Stiegler, Bernard. "The Uncanniness of Thought and the Metaphysics of Penelope". *Parrhesia* 23 (2015): pp. 63-77.
- Barthélémy, Jean-Hugues. "Individuation and Knowledge: The 'refutation of idealism' in Simondon's Heritage in France". *SubStance* 41, no. 3 (2012): pp. 60-73.
- Trimmer, John D. "The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger's 'Cat Paradox' Paper." *Proceedings of the American Philosophical Society* 124, no. 5 (1980): pp. 323-338.
- Schlosshauer, Maximilian. *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*. Berlijn: Springer, 2007.