

Modale Interpretaties van Quantummechanica:¹ Filosofie tussen Fysica en Metafysica²

ARTIKEL

PIETER E. VERMAAS

1. Inleiding

Als men de metafysica van een wetenschap opvat als een filosofische reflectie op de wijze waarop die wetenschap de werkelijkheid beschrijft,³ veronderstelt men een heldere taakverdeling tussen wetenschappers en filosofen: wetenschappers beschrijven de werkelijkheid met hun theorieën en filosofen reflecteren over die beschrijvingen. Het filosofisch onderzoek aan quantummechanica doorkruist deze taakverdeling. Natuurkundigen zien quantummechanica slechts als een systematische beschrijving van meetinstrumenten. En filosofen proberen, naast te reflecteren, quantummechanica te formuleren als een meer uitgebreidere beschrijving van de werkelijkheid. Het filosofisch onderzoek aan quantummechanica beweegt zich daarmee tussen fysica en metafysica.

Quantummechanica is een theorie over elementaire deeltjes zoals elektronen, protonen en neutronen, en is bij uitstek geformuleerd als een instrumentalistische theorie: zij voorspelt systematisch welke uitkomsten meetinstrumenten aangeven zodra metingen worden verricht aan elementaire deeltjes, maar beschrijft slechts sporadisch de eigenschappen van deze deeltjes zelf.

Op zich is er niets mis met een theorie die hoofdzakelijk meetinstrumenten beschrijft. Echter, natuurkundigen beschouwen quantummechanica als een universeel geldige en als een fundamentele theorie. Dit betekent dat natuurkundigen aannemen dat quantummechanica van toepassing is op alle materiële objecten, dus niet alleen op elementaire deeltjes, maar ook op macroscopische objecten zoals biljartballen, katten en hemellichamen. En dit betekent dat quantummechanica alle oude natuurkundige theorieën over dit soort macroscopische objecten in principe vervangt. Als men quantummechanica toepast op, bijvoorbeeld, biljartballen en planeten, dan moet men een beschrijving krijgen die ongeveer gelijk is aan de beschrijving van deze objecten door de klassieke mechanica van Newton.

Deze fundamentele status maakt het wenselijk om quantummechanica uit te breiden

1 Het Groene Boekje dicteert de spelling 'kwantummechanica'. Gesterkt door het pleidooi van mijn collega FA. Muller op de achterpagina van het NRC Handelsblad, d.d. 13 januari 2001, houd ik mij echter aan de professionele schrijfwijze 'quantummechanica'.

2 Mijn dank gaat uit naar de Sectie Filosofie van de TU Delft voor waardevol commentaar.

3 Papineau (1995).

van een instrumentalistische theorie naar een theorie die ook systematisch de eigenschappen van de elementaire deeltjes zelf beschrijft. Ten eerste verwachten veel natuurkundigen meer van fundamentele theorieën dan alleen voorspellingen over meetuitkomsten. Er wordt, bijvoorbeeld, verlangd dat zo'n theorie enig inzicht geeft over datgene wat wordt gemeten. Ten tweede volgt uit de veronderstelling dat quantummechanica de klassieke theorieën vervangt, dat quantummechanica in staat moet zijn om op zijn minst de eigenschappen van macroscopische objecten te beschrijven. De klassieke theorieën geven namelijk wel beschrijvingen van de eigenschappen van deze objecten. In de Newtonse mechanica, bijvoorbeeld, hebben biljartballen en planeten altijd welbepaalde posities en welbepaalde snelheden. Als deze mechanica kan worden vervangen door quantummechanica, betekent dit dat ook quantummechanica deze welbepaalde posities en snelheden op een of andere manier moet kunnen toeschrijven.

Er zijn verschillende pogingen ondernomen om quantummechanica uit te breiden naar een meer systematische beschrijving van de werkelijkheid. In eerste instantie waren vooral natuurkundigen hiermee bezig. Niels Bohr, bijvoorbeeld, formuleerde zijn Kopenhagen interpretatie en David Bohm stelde een verborgen-variabelenmechanica voor. Deze eerste pogingen hebben echter niet tot bevredigende resultaten geleid omdat ze beschrijvingen opleverden die moeilijk te accepteren waren. In de Kopenhagen interpretatie, bijvoorbeeld, heeft een deeltje nooit tegelijkertijd een welbepaalde positie en een welbepaalde snelheid. En in de mechanica van Bohm kan de wisselwerking tussen twee deeltjes zich sneller dan het licht door de ruimte voortplanten.

Deze onbevredigende resultaten hebben er toe geleid dat meer praktisch ingestelde natuurkundigen min of meer zijn gestopt met verdere pogingen om quantummechanica uit te breiden. Deze natuurkundigen accepteren dat quantummechanica een theorie is die alleen de eigenschappen van meetinstrumenten beschrijft en niet die van elementaire deeltjes. Dit standpunt wordt soms onderbouwd door er op te wijzen dat metingen in quantummechanica een aparte status hebben. Door deze aparte status wordt het verdedigbaar dat de instrumenten die bij metingen worden gebruikt, anders worden beschreven dan andere objecten zoals elementaire deeltjes. En als deze natuurkundigen al te verleiden zijn tot uitspraken over de deeltjes zelf, dan komen ze tot uitspraken dat een deeltje zich soms als een puntdeeltje gedraagt met een welbepaalde positie, en soms als een golf die is uitgesmeerd in de ruimte.

Filosofen en filosofisch georiënteerde natuurkundigen zijn daarentegen verder gegaan met onderzoek naar de mogelijkheden om quantummechanica te formuleren als een uitgebreidere beschrijving van de werkelijkheid. Zij zijn niet bereid om zonder slag of stoot het klassieke metafysische beeld op te geven dat materiële objecten fysische eigenschappen hebben. En zij kunnen noch accepteren dat metingen een aparte status hebben, noch dat men op een zinvolle manier kan spreken over één deeltje dat is uitgesmeerd in de ruimte. Dit verdere onderzoek heeft ondermeer geleid tot vragen over wat wij überhaupt verstaan onder een beschrijving van de werkelijkheid. En daarmee belandde dit onderzoek, wat bekend staat als onderzoek naar de interpretatie van quantummechanica, op het gebied van de metafysica.

In dit artikel introduceer ik de lezer in het onderzoek naar interpretaties van quantummechanica en bespreek ik de resultaten die zijn geboekt met zogenaamde *modale interpretaties*. Modale interpretaties zijn recente interpretaties van quantummechanica en hebben een Nederlands tintje: Bas van Fraassen, afkomstig uit Goes, heeft modale

interpretaties geïntroduceerd en Dennis Dieks, werkzaam te Utrecht, is een van de pioniers die deze interpretaties verder hebben ontwikkeld. Het onderzoek naar modale interpretaties is in de afgelopen jaren min of meer afgerond. Hierdoor verschijnen er op dit moment een aantal boeken waarin de resultaten van dit onderzoek zijn samengebracht en worden besproken. Naast Jeffrey Bub (1997) en Guido Bacciagaluppi (2001) is mijn *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics* (1999) een van die publicaties. Zoals gezegd beweegt de filosofie van quantummechanica zich tussen fysica en metafysica. Deze boeken bevatten daarom naast filosofie een hoop natuurkundige formules. Om nu een indruk te geven van het filosofisch onderzoek zal ik hier de fysische terminologie zo veel mogelijk onderdrukken.

Ik begin met een korte schets van quantummechanica. Daarna bespreek ik in paragraaf 3 wat men onder een interpretatie van quantummechanica verstaat en waarom men zo'n interpretatie nastreeft. In paragraaf 4 worden modale interpretaties geïntroduceerd en in paragraaf 5 geef ik een paar van de resultaten van het onderzoek aan deze interpretaties. Ik eindig met een beoordeling van wat modale interpretaties hebben opgeleverd.

2. Quantummechanica

Quantummechanica is zoals gezegd vooral een theorie die de uitkomsten van metingen aan elementaire deeltjes voorspelt. Dit gaat als volgt:

Quantummechanica kent fysische grootheden A, B, C, \dots toe aan elementaire deeltjes en deze grootheden worden traditioneel observabelen genoemd. Voorbeelden van fysische grootheden (ik zal in dit artikel over grootheden spreken en niet over observabelen) zijn 'positie' van een deeltje, 'snelheid' en 'energie'. Een grootheid A kan waarden a, a', a'', \dots aannemen. De grootheid 'snelheid' van een deeltje kan, bijvoorbeeld, de waarden 1, 2, 3, ... meter per seconde hebben. Quantummechanica kent verder een toestand toe aan elk deeltje. Deze toestand wordt aangeduid met W en verandert als een functie van de tijd. Soms kan een toestand worden gerepresenteerd door een zogenaamde golf functie ψ maar in het algemeen is dat niet het geval.

De toestand W legt de waarschijnlijkheden vast waarmee metingen uitkomsten hebben: als men grootheid A van een deeltje meet, dan is de uitkomst met waarschijnlijkheid $p_A(a)$ gelijk aan de waarde a . Deze waarschijnlijkheid $p_A(a)$ is een welbepaalde functie $f(W, A, a)$ van de toestand W van het deeltje, van de gemeten grootheid A en van de waarde a .

De voorspellingen over meetuitkomsten zijn in het algemeen statistisch; alleen in speciale gevallen is $p_A(a)$ gelijk aan 0 of 1 en kan men in die zin met zekerheid voorspellen of een meting van A de waarde a oplevert. Verder bestaan er in quantummechanica paren van grootheden A en B waarvoor geldt dat, voor elke toestand W , de waarden $f(W, A, a)$ en $f(W, B, b)$ nooit tegelijkertijd gelijk zijn aan 0 of 1. Als de waarschijnlijkheid $p_A(a)$ gelijk is aan 0 of 1, volgt derhalve dat de waarschijnlijkheid $p_B(b)$ dat een meting van grootheid B de waarde b oplevert, ergens tussen 0 en 1 ligt (en vice versa). Zulke grootheden A en B worden (onderling) complementair genoemd. Er geldt dus dat men nooit met zekerheid de uitkomsten van een gelijktijdige meting van complementaire grootheden kan voorspellen.⁴ Een voorbeeld van complementaire grootheden is 'positie' en 'snelheid' van een deeltje.

4 Deze opmerking heeft vooral theoretische betekenis; de standaard opvatting is dat complementaire grootheden niet gelijktijdig kunnen worden gemeten.

Quantummechanica schrijft ook eigenschappen toe. Ten eerste zijn de voorspellingen over meetuitkomsten voorspellingen over eigenschappen van meetinstrumenten: de voorspelling dat een meting van grootheid A met waarschijnlijkheid $p_A(a)$ een uitkomst a heeft, houdt in dat het meetinstrument met waarschijnlijkheid $p_A(a)$ een eigenschap heeft die correspondeert met die uitkomst. Deze eigenschap is, bijvoorbeeld, dat een wijzer naar de waarde a op een wijzerplaat wijst.

Ten tweede schrijft quantummechanica eigenschappen toe aan een deeltje als de toestand van het deeltje correspondeert met een golffunctie ψ . Een eigenschap van een deeltje kan worden opgevat als een waarde a toegekend aan een grootheid A . De eigenschap dat een deeltje een snelheid van tien meter per seconde heeft, bijvoorbeeld, is de waarde 10 toegekend aan de grootheid ‘snelheid’. De eigenschappen van een deeltje worden nu, op enkele subtiliteiten na, door de volgende regel gegeven:

Als een deeltje een toestand W heeft die correspondeert met een golffunctie ψ en als $p_A(a) = f(W, A, a)$ gelijk is aan 1, dan bezit het deeltje de eigenschap ‘grootheid A heeft waarde a ’.

Als de toestand W van een deeltje correspondeert met een golffunctie ψ en men met zekerheid kan voorspellen dat een meting van grootheid A de waarde a oplevert ($p_A(a) = 1$), dan bezit het deeltje dus de corresponderende eigenschap ‘ A heeft waarde a ’. Verder volgt dat een deeltje nooit tegelijkertijd de eigenschappen ‘ A heeft waarde a ’ en ‘ B heeft waarde b ’ bezit als A en B complementair zijn. Voor complementaire grootheden geldt immers dat $p_A(a)$ en $p_B(b)$ nooit tegelijkertijd gelijk zijn aan 1.

Quantummechanica doet geen uitspraak over de eigenschappen van een deeltje als de toestand W van het deeltje niet correspondeert met een golffunctie ψ .

De toestand van een deeltje ontwikkelt zich als een functie $W(t)$ van de tijd t . In het algemeen wordt deze ontwikkeling of dynamica bepaald door de *schrödingervergelijking*. De enige uitzondering hierop is de dynamica tijdens een meting. Op het tijdstip dat er een meting wordt verricht aan een deeltje, wordt de dynamica $W(t)$ van de toestand niet bepaald door de schrödingervergelijking, maar door het zogenaamde *projectiepostulaat*.

3. Interpretaties en het projectiepostulaat

Als men quantummechanica toepast op een deeltje en bepaalt hoe zij de werkelijkheid beschrijft, ontstaat er een betrekkelijk schamel beeld. Beschouw een deeltje dat door de tijd heen de toestand $W(t)$ heeft. Quantummechanica beschrijft deze situatie op twee manieren. Zij kent eigenschappen toe aan het deeltje en aan de instrumenten waarmee aan het deeltje wordt gemeten. De eerste manier leidt niet vaak tot resultaat. Beschouw een tijdsinterval waarin geen metingen worden verricht en waarin het deeltje wisselwerkt met haar omgeving. De toestand $W(t)$ van het deeltje ontwikkelt dan volgens de schrödingervergelijking. Dit betekent – en ik noem dit resultaat zonder bewijs – dat de toestand slechts op enkele tijdstippen t' met een golffunctie ψ correspondeert en dat niet doet voor de rest van de tijd. Quantummechanica bepaalt dus slechts op die enkele tijdstippen t' welke eigenschappen het deeltje bezit en laat die eigenschappen onbepaald op alle andere tijdstippen. De tweede manier van beschrijven is op haar beurt alleen van toepassing als metingen worden verricht. Als, bijvoorbeeld, grootheid A wordt gemeten

op tijdstip t' , dan ontwikkelt de toestand van het deeltje op dit tijdstip t volgens het projectiepostulaat en voorspelt quantummechanica dat het meetinstrument met waarschijnlijkheid $p_A(a)$ een eigenschap heeft die correspondeert met de uitkomst a .

De quantummechanische beschrijving van een deeltje is dus beperkt tot enkele tijdstippen: soms worden eigenschappen toegekend aan het deeltje en soms aan meetinstrumenten. Interpretaties van quantummechanica hebben nu tot doel om deze beschrijving uit te breiden naar alle tijdstippen. Anders geformuleerd, is het doel van een interpretatie om een beschrijving te geven van hoe de werkelijkheid er door de tijd heen uit zou kunnen zien als quantummechanica een ware theorie zou zijn.⁵

Dit doel van een interpretatie van quantummechanica is niet onproblematisch. Enerzijds roept het de vraag op aan welke voorwaarden een interpretatie moet voldoen om dit doel te bereiken. Op deze vraag kom ik terug in paragraaf 6. Anderzijds kan men zich afvragen of dit doel zinvol is. Vanuit wetenschapsfilosofisch oogpunt zijn hierover op zijn minst drie standpunten mogelijk. Ten eerste kan men quantummechanica als een zuiver instrumentalistische theorie opvatten. Quantummechanica is dan geen ware of onware theorie maar slechts een verzameling van regels waarmee men voorspellingen over meetuitkomsten kan genereren. Deze regels hebben geen betrekking op de werkelijkheid buiten die meetuitkomsten en het is derhalve zinloos om op grond van die regels een beschrijving van die werkelijkheid te geven.

Ten tweede kan men de positie van het wetenschappelijk realisme innemen. Fundamentele wetenschappelijke theorieën hebben dan tot doel om letterlijke en ware beschrijvingen van de werkelijkheid te geven. En gegeven dat quantummechanica zo'n fundamentele theorie is, is het zinvol om te bepalen hoe de werkelijkheid er uit kan zien als quantummechanica waar zou zijn.

Ten derde hebben interpretaties van quantummechanica betekenis binnen het empirisme. Beschouw, bijvoorbeeld, Van Fraassens constructief empirisme.⁶ Een theorie is volgens Van Fraassens semantische aanpak geassocieerd met een verzameling modellen. Deze modellen worden opgevat als letterlijke beschrijvingen van de werkelijkheid die waar of onwaar kunnen zijn. En de modellen bepalen de inhoud van de theorie in de zin dat zij vastleggen wat de theorie over de werkelijkheid zegt als het een ware theorie zou zijn. Een constructief empirist is nu geïnteresseerd in de modellen van een theorie, niet omdat ze beschrijvingen kunnen zijn van hoe de werkelijkheid er feitelijk uit ziet (een wetenschappelijke theorie heeft slechts tot doel om empirisch adequaat te zijn en dat houdt in dat tenminste een van haar modellen alle feitelijk observeerbare fenomenen correct representeert), maar omdat begrip van deze modellen tot begrip van de inhoud van de theorie leidt. Interpretaties geven nu modellen geassocieerd met quantummechanica en leveren daarmee begrip van quantummechanica.

Vaak wordt in interpretaties ook gepoogd om het projectiepostulaat uit quantummechanica te verwijderen. Quantummechanica wijkt van alle andere natuurkundige theorieën af door de dynamica van de toestanden van deeltjes te beschrijven met twee verschillende wetten. Beschouw opnieuw het hierboven beschreven deeltje. Als er geen

5 Healey (1989), pagina 6, en Van Fraassen (1991), paragraaf 8.1. Deze formulering is betrekkelijk liberaal. Als men een interpretatie geeft, hoeft men noch aan te nemen dat quantummechanica waar is, noch een beschrijving te geven van hoe de werkelijkheid er feitelijk uit ziet.

6 Zie, bijvoorbeeld, Van Fraassen (1991), hoofdstuk 1 en 8.

metingen aan dit deeltje worden verricht, ontwikkelt de toestand $W(t)$ van het deeltje volgens de schrödingervergelijking; als er wel een meting wordt verricht, ontwikkelt $W(t)$ volgens het projectiepostulaat. Metingen hebben daardoor een aparte status in quantummechanica. In klassieke natuurkundige theorieën hebben metingen echter niet deze aparte status en wordt de ontwikkeling van de (klassieke) toestanden gegeven door één uniforme wet. In een poging om quantummechanica in overeenstemming te brengen met de rest van de natuurkunde en metingen van hun aparte status te ontdoen, wordt nu in interpretaties vaak geprobeerd quantummechanica zodanig te herformuleren dat de dynamica van de toestanden van deeltjes gedurende metingen ook wordt bepaald door de schrödingervergelijking.

4. Modale interpretaties

Modale interpretaties zijn relatieve nieuwkomers. Weliswaar presenteerde Van Fraassen al in 1973 de eerste modale interpretaties en volgden Simon Kochen, Dieks, Richard Healey en Bub in de tweede helft van de jaren tachtig met alternatieve voorstellen. Maar pas in de jaren negentig zijn deze interpretaties systematisch uitgewerkt.

Een eerste idee dat ten grondslag ligt aan Van Fraassens modale interpretaties is dat toestanden in quantummechanica een dubbele rol spelen. Ten eerste genereren toestanden de waarschijnlijkheden waarmee metingen uitkomsten hebben. Ten tweede bepalen toestanden (soms) de eigenschappen van deeltjes. Deze twee rollen worden nu in modale interpretaties gescheiden door de enkelvoudige toestand W die quantummechanica toekent aan deeltjes, te vervangen door twee toestanden W_D en W_W . De eerste toestand W_D wordt de dynamische toestand genoemd en bepaalt in modale interpretaties de waarschijnlijkheden $p_A(a)$ voor meetuitkomsten: deze waarschijnlijkheden zijn opnieuw gegeven door de functie $f(W_D, A, a)$. De tweede toestand W_W wordt de waardetoestand genoemd en deze bepaalt de eigenschappen van deeltjes. De regels waarmee modale interpretaties eigenschappen toeschrijven zijn:

Als een deeltje een waardetoestand W_W heeft en $f(W_W, A, a)$ is gelijk is aan 1, dan bezit het deeltje de eigenschap 'A heeft waarde a'.

Als een deeltje een waardetoestand W_W heeft en $f(W_W, A, a)$ is gelijk is aan 0, dan bezit het deeltje niet de eigenschap 'A heeft waarde a'.

Deze regels leggen geen restricties op aan W_W . Modale interpretaties schrijven dus altijd eigenschappen toe, ook op de tijdstippen dat W_W niet correspondeert met een golf functie ψ .

Een tweede idee dat ten grondslag ligt aan modale interpretaties is dat quantummechanica een statistische theorie is en dat men derhalve niet mag verwachten dat er een een-op-een relatie bestaat tussen de toestand van een deeltje (dat wil zeggen, de toestand W in quantummechanica of de dynamische toestand W_D in modale interpretaties) en de eigenschappen van dat deeltje. Die relatie tussen toestand en eigenschappen moet juist statistisch zijn. In modale interpretaties wordt dit bereikt door een statistisch verband te veronderstellen tussen de dynamische en de waardetoestand: de dyna-

mische toestand W_D van een deeltje bepaalt niet eenduidig de feitelijke waardetoestand W_W van dat deeltje, maar bepaalt hooguit een verzameling $\{W_W\}$ van mogelijke waardetoestanden voor het deeltje. Hierdoor ontstaat er in het algemeen een indeterministisch verband tussen de dynamische toestand W_D en de eigenschappen van dat deeltje: als de dynamische toestand W_D van een deeltje vastligt, dan ligt de feitelijke waardetoestand W_W van het deeltje nog niet vast (de feitelijke waardetoestand wordt alleen beperkt doordat ze in de verzameling $\{W_W\}$ van mogelijke waardetoestanden moet zitten) en liggen dus ook de eigenschappen van dat deeltje nog niet vast. Een deeltje met een-en-dezelfde toestand W_D kan, bijvoorbeeld, soms feitelijk de eigenschap 'A heeft waarde 3' bezitten en soms feitelijk de eigenschap 'A heeft waarde 8'.⁷

Er bestaan verschillende modale interpretaties en deze onderscheiden zich door de wijze waarop W_D de verzameling $\{W_W\}$ van mogelijke waardetoestanden vastlegt. De belangrijkste varianten zijn Van Fraassens (1973; 1991, hoofdstuk 9) oorspronkelijke interpretatie, de KDH variant ontwikkeld door Kochen (1985), Dieks (1988) en Healey (1989, hoofdstuk 2), de variant van Bub (1992; 1997, hoofdstuk 4) en de zogenaamde atomaire modale interpretatie voorgesteld door Dieks (1998) en door Bacciagaluppi en Michael Dickson (1999).

In alle modale interpretaties wordt aangenomen dat de ontwikkeling van de dynamische toestand $W_D(t)$ van een deeltje altijd wordt bepaald door de schrödingervergelijking, ongeacht of er wel of niet een meting wordt verricht aan het deeltje. De ontwikkeling van de feitelijke waardetoestand $W_W(t)$ van een deeltje is beperkt door de ontwikkeling van de dynamische toestand $W_D(t)$: $W_D(t)$ bepaalt de ontwikkeling van de verzameling $\{W_W(t)\}$ van mogelijke waardetoestanden en de feitelijke waardetoestand moet daar op elk tijdstip in zitten.

5. Theorie en empirie

Modale interpretaties zijn door verschillende auteurs verder uitgewerkt en beoordeeld.⁸ *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics* presenteert dit onderzoek met name voor de KDH en de atomaire modale interpretatie, en in iets mindere mate voor de varianten van Van Fraassen en van Bub. Het boek bestaat uit drie delen. In het eerste deel, getiteld *Formalism*, worden modale interpretaties theoretisch uitgewerkt. Vragen die hierbij aan bod komen zijn, bijvoorbeeld, vragen over de logische structuur van de verzameling van eigenschappen toegekend aan deeltjes, en vragen over de dynamica van deze eigenschappen. Het tweede deel, *Physics*, behandelt de empirische inhoud van modale interpretaties en het zogenaamde meetprobleem. Dit probleem ontstaat zodra men metingen beschrijft met interpretaties. Quantummechanica zelf voorspelt dat een meting van grootheid A met waarschijnlijkheid $p_A(a)$ de uitkomst a oplevert. Als een interpretatie empirisch adequaat wil zijn, dat moet zij deze voorspelling

7 Van Fraassen kwam tot zijn interpretatie door de mogelijke-wereldensemantiek voor modale logica's toe te passen op quantumlogica. Hierdoor is de naam 'modale interpretatie' geboren en volgt dat de dynamische toestand van een deeltje niet de feitelijke eigenschappen van het deeltje bepaalt maar alleen de mogelijke eigenschappen. De modale interpretaties die na Van Fraassen zijn geformuleerd, maken geen gebruik van de mogelijke-wereldensemantiek.

8 Zie Dieks en Vermaas (1998) en Healey en Hellman (1998) voor een overzicht.

reproduceren door de uitkomst a met dezelfde waarschijnlijkheid als een eigenschap toe te schrijven aan het meetinstrument. Het meetprobleem is nu dat interpretaties vaak falen om deze voorspellingen over metingen te reproduceren. Het derde deel, getiteld *Philosophy*, gaat in op de vraag of modale interpretaties acceptabele beschrijvingen van de werkelijkheid geven.

De theoretische ontwikkeling van modale interpretaties is goed uitvoerbaar maar de resultaten zijn niet onverdeeld positief. Beschouw, bijvoorbeeld, de logische structuur van de beschrijving van een individueel deeltje. Het goede resultaat is dat de verzameling van eigenschappen die een deeltje bezit en niet bezit volgens modale interpretaties op een klassiek logische wijze gesloten is onder negatie, conjunctie en disjunctie. De beschrijving van deeltjes voldoet daarmee aan onze klassieke intuïties: als een deeltje een eigenschap bezit, dan bezit het niet de negatie van die eigenschap; als een deeltje twee eigenschappen bezit, dan bezit het ook de conjunctie en disjunctie van die eigenschappen, et cetera. Het minder goede resultaat is echter dat modale interpretaties, net zoals quantummechanica zelf, struikelen over de eigenschappen 'A heeft waarde a ' en 'B heeft waarde b ' zodra A en B complementair zijn. Voor dit soort grootheden geldt dat $f(W_W, A, a)$ en $f(W_W, B, b)$ nooit tegelijkertijd gelijk zijn aan 0 en 1, zodat ook modale interpretaties deze eigenschappen nooit tegelijkertijd aan een deeltje toekennen of juist niet toekennen. Hieruit volgt dat sommige eigenschappen van een deeltje de logische problematische status hebben dat zij noch bezeten noch niet bezeten zijn. Neem, bijvoorbeeld, de complementaire grootheden 'snelheid' V en 'positie' X en stel dat een deeltje een waardetoestand W_W heeft waarvoor geldt dat $f(W_W, V, v)$ gelijk is aan 1. Dan heeft het deeltje de eigenschap 'snelheid is v '. Maar omdat $f(W_W, X, x)$ nu een waarde tussen 0 en 1 heeft, volgt dat het deeltje de eigenschap 'positie is x ' noch bezit noch niet bezit. Wat dit betekent is, gegeven onze klassieke ervaring en intuïtie, moeilijk onder woorden te brengen.

Een tweede onaantrekkelijk resultaat volgt zodra men een atoom beschrijft dat bestaat uit een aantal deeltjes. In quantummechanica wordt aangenomen dat elke grootheid A van een deeltje in een atoom correspondeert met een specifieke grootheid van het atoom als geheel dat wordt aangeduid met het symbool $A\otimes I$. De grootheid A is bijvoorbeeld 'positie' van een elektron in een waterstofatoom. En $A\otimes I$ is de grootheid 'positie van het elektron' van het waterstofatoom als geheel. In sommige varianten van de modale interpretatie (Van Fraassens variant en de KDH variant) is het nu mogelijk dat een deeltje de eigenschap 'A heeft waarde a ' bezit, terwijl tegelijkertijd het atoom als geheel de eigenschap 'A \otimes I heeft waarde a ' noch bezit nog niet bezit. Dit betekent dat als men het elektron apart beschouwt, het een welbepaalde positie heeft, terwijl als men het waterstofatoom als geheel beschouwt, hetzelfde elektron in dat atoom een onbepaalde positie heeft. Dit resultaat staat opnieuw op gespannen voet met onze klassieke ervaring en intuïtie.

Het onderzoek naar de empirische inhoud van modale interpretaties heeft opnieuw geen onverdeeld positief beeld opgeleverd. Van Fraassens variant en die van Bub lossen het meetprobleem op en kunnen dus de door quantummechanica voorspelde meetuitkomsten als eigenschappen aan meetinstrumenten toeschrijven. De KDH variant en de atomaire modale interpretatie lossen in veel gevallen het meetprobleem op, maar lijken in andere gevallen in gebreke te blijven.

6. Beoordeling en conclusie

Een snelle beoordeling van modale interpretaties is gemakkelijk. Modale interpretaties zijn niet het tovermiddel waarmee quantummechanica kan worden uitgebreid tot een onproblematische beschrijving van de werkelijkheid. De beschrijving van elementaire deeltjes door modale interpretaties wijkt daarvoor op te veel punten af van de wijze waarop klassieke fysische theorieën deeltjes beschrijven en van de wijze waarop wij dat met onze alledaagse ervaring doen. Enkele ongewone trekjes in een nieuwe beschrijving van de werkelijkheid zijn weliswaar interessant omdat het de mogelijkheid geeft om haar te testen en om nieuwe fenomenen te ontdekken. Maar modale interpretaties overstijgen dit niveau van een paar ongewone trekjes.

Een meer afgewogen beoordeling is daarentegen niet zo gemakkelijk. Het doel van een interpretatie is om een beschrijving te geven van hoe de werkelijkheid er uit zou kunnen zien als quantummechanica een ware theorie zou zijn. Een afgewogen oordeel bestaat daarom uit een oordeel of modale interpretaties dit doel bereiken. En om tot dit laatste oordeel te komen, moet men eerst bepalen aan welke voorwaarden een interpretatie moet voldoen om dit doel te bereiken. Auteurs verschillen nu van mening over deze voorwaarden en dit verschil hangt samen met de redenen waarom zij naar interpretaties streven. Zoals gezegd in paragraaf 3 is het voor wetenschappelijk realisten en voor constructief empiristen zinvol om interpretaties van quantummechanica te ontwikkelen. Maar de redenen verschillen. Een realist ziet de beschrijvingen die interpretaties geven, als beschrijvingen van hoe de werkelijkheid er feitelijk uit zou kunnen zien, terwijl een constructief empirist deze beschrijvingen opvat als bijdragen aan ons begrip van quantummechanica. Door dit verschil van mening over wat een interpretatie oplevert, zijn realisten geneigd strengere voorwaarden voor interpretaties te formuleren dan constructief empiristen.

Drie voorwaarden voor interpretaties zijn waarschijnlijk acceptabel voor realisten en voor empiristen. Ten eerste moet een interpretatie een consistente beschrijving van de werkelijkheid geven. Alle modale interpretaties voldoen aan deze voorwaarde omdat men geen contradicties kan afleiden uit de eigenschappen die zij toekennen en niet toekennen aan deeltjes.⁹ Een tweede voorwaarde is dat de beschrijving de pretenties van een interpretatie moet waarmaken. Modale interpretaties voldoen ook hieraan. Zij kennen op elk tijdstip eigenschappen toe aan deeltjes en geven dus uitgebreidere beschrijvingen van de werkelijkheid dan quantummechanica zelf. Verder herformuleren modale interpretaties quantummechanica zodanig dat het projectiepostulaat verdwijnt: de dynamische toestand W_D ontwikkelt zich alleen volgens de schrödingervergelijking. Metingen verliezen daarom hun aparte status. Ten derde moet een beschrijving empirisch adequaat zijn. Modale interpretaties voldoen hieraan met wisselend succes. De varianten van Van Fraassen en van Bub zijn empirisch adequaat in de zin dat zij het meetprobleem oplossen. De KDH en de atomaire modale interpretatie lossen dit probleem waarschijnlijk niet op.

Deze drie voorwaarden sluiten niet uit dat interpretaties de werkelijkheid op een vreemde en tegenintuïtieve wijze beschrijven. Voor auteurs die de beschrijvingen van interpretaties realistisch opvatten, kunnen deze vreemdheden onverteerbaar zijn omdat

⁹ Deze eerste voorwaarde klinkt triviaal. Er bestaan echter interpretaties die eigenschappen toekennen waaruit men wel contracties kan afleiden.

door hun realisme deze vreemdheden zich vertalen in ontologische claims dat onze feitelijke werkelijkheid vreemd en tegenintuïtief kan zijn. Deze auteurs voeren daarom soms een vierde voorwaarde van metafysische acceptabelheid in om deze interpretaties alsnog uit te sluiten. Constructief empiristen kunnen daarentegen veel liberaler omgaan met vreemdheden in de beschrijvingen door interpretaties. Voor hen vertalen deze vreemdheden zich primair in semantische claims over hoe wij quantummechanica kunnen begrijpen en in veel mindere mate in ontologische claims over de werkelijkheid.

Twee auteurs die op grond van hun realistische toepassing van interpretaties een vierde voorwaarde van metafysische acceptabelheid invoeren zijn Rob Clifton (1996) en Frank Arntzenius (1998). Beiden stellen dat een interpretatie geen onderscheid mag maken tussen de eigenschap 'A heeft waarde a ' van een deel van een object en de eigenschap 'A \otimes I heeft waarde a ' van dat object als geheel. En zij onderbouwen dit standpunt door te laten zien dat men tot bizarre conclusies komt zodra men interpretaties die dit onderscheid wel maken, op een realistische manier toepast op onze feitelijke werkelijkheid. Het voorbeeld wat zij hiervoor gebruiken is een vliegtuig met een linkervleugel die mogelijk verbogen is. Als het nu mogelijk is dat een deel van een object de eigenschap 'A heeft waarde a ' bezit terwijl het gehele object de eigenschap 'A \otimes I heeft waarde a ' noch bezit noch niet bezit, dan volgt dat soms de linkervleugel van het vliegtuig verbogen kan zijn (de linkervleugel bezit de eigenschap 'verbogen') terwijl er aan het vliegtuig als geheel niets te merken is (de eigenschap 'de linkervleugel is verbogen' wordt door het vliegtuig als geheel noch bezeten noch niet bezeten). Deze situatie leidt volgens Arntzenius en Clifton niet tot een contradictie, maar is metafysisch onacceptabel. Beide auteurs wijzen dus (sommige van) de vreemde resultaten van modale interpretaties af en vellen daarmee een negatief oordeel over in ieder geval Van Fraassens variant en de KDH variant.

Van Fraassen (1991, paragraaf 9.10; 1994) zelf verwerpt zo'n vierde metafysische voorwaarde. Van Fraassen spreekt in de context van zijn constructief empirisme over 'houdbare' interpretaties en alhoewel hij er niet expliciet over is, lijkt een interpretatie houdbaar te zijn als haar beschrijving van de werkelijkheid consistent is en empirisch adequaat. Van Fraassen lijkt zelfs positief te staan tegen over vreemdheden in de beschrijvingen van interpretaties. Als een interpretatie, bijvoorbeeld, onderscheid maakt tussen de eigenschappen 'A heeft waarde a ' en 'A \otimes I heeft waarde a ', dan volgt hieruit dat quantummechanica modellen heeft die tegenintuïtief zijn. En dit verhoogt ons begrip van quantummechanica. Voor Van Fraassen zijn derhalve zijn eigen variant en die van Bub acceptabel. En de KDH en de atomaire modale interpretatie zijn voor Van Fraassen acceptabel zodra zij het meetprobleem weten op te lossen.

In *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics* verdedig ik dat men, ongeacht of men realist is of niet, terughoudend moet zijn met het opleggen van metafysische voorwaarden die vreemde beschrijvingen van de werkelijkheid uitsluiten. Mijn onderbouwing hiervoor gaat als volgt. Onze intuïties over beschrijvingen van de werkelijkheid hebben hun oorsprong in de wijze waarop klassieke fysische theorieën de werkelijkheid beschrijven en in de wijze waarop wij onze alledaagse werkelijkheid beschrijven. Deze laatste beschrijvingen zijn echter beperkt tot een domein van de werkelijkheid dat in principe waarneembaar is. Onze intuïties gelden dus voor beschrijvingen van datgene wat wij kunnen waarnemen. Modale interpretaties beschrijven daarentegen naast dit waarneembare domein, een domein dat principieel onwaarneembaar is. Er bestaan namelijk dynamische toestanden $W_D(t)$ voor deeltjes die uit-

sluiten dat de deeltjes worden waargenomen.¹⁰ Er zijn nu geen goede redenen om aan te nemen dat onze intuïties over de beschrijving van het waarneembare domein ook van toepassing zijn op de beschrijving van het onwaarneembare domein van de werkelijkheid. Het enige wat men, mijn inziens, op metafysische gronden kan eisen van de beschrijving van dit onwaarneembare domein is dat ze consistent is. Modale interpretaties voldoen aan deze eis zodat alle modale interpretaties metafysisch acceptabele beschrijvingen van het onwaarneembare deel van de werkelijkheid geven. De vraag die vervolgens overblijft is of modale interpretaties het waarneembare domein metafysisch acceptabel beschrijven. Zodra modale interpretaties voldoen aan de derde voorwaarde van empirische adequaatheid, is deze vraag echter equivalent met de vraag of de voorspellingen van quantummechanica zelf metafysisch acceptabel zijn. En gegeven dat deze voorspellingen systematisch worden bevestigd door onze waarnemingen, lijkt het pedant ze metafysisch onacceptabel te noemen. De tegenintuïtieve wijze waarop modale interpretaties de werkelijkheid beschrijven is voor mij dus geen reden om deze interpretaties te verwerpen.

Samenvattend kan worden gezegd dat modale interpretaties quantummechanica uitbreiden tot beschrijvingen waarin elementaire deeltjes altijd eigenschappen hebben en waarin het projectiepostulaat overbodig is. De modale interpretaties van Van Fraassen en van Bub zijn empirisch adequaat in de zin dat ze het meetprobleem oplossen. De modale interpretatie van Kochen, Dieks en Healey en de atomaire modale interpretatie lossen het meetprobleem waarschijnlijk niet op en moeten daarom mogelijk worden verworpen als empirisch inadequaat. Modale interpretaties geven beschrijvingen van de werkelijkheid die afwijken van hoe wij in ons dagelijks leven de werkelijkheid beschrijven en van hoe klassieke fysische theorieën dat doen. In Van Fraassens constructief empirisme zijn deze afwijkingen geen probleem omdat interpretaties niet tot doel hebben feitelijk ware beschrijvingen van de werkelijkheid te geven. Alle modale interpretaties zijn derhalve acceptabel in het constructief empirisme zodra ze consistent en empirisch adequaat zijn. In het wetenschappelijk realisme kan men geen eenduidig oordeel geven over modale interpretaties omdat men van mening kan verschillen over de voorwaarden waaraan beschrijvingen van de werkelijkheid moeten voldoen. Binnen het wetenschappelijk realisme verschuift de vraag of modale interpretaties voldoen, derhalve naar de vraag welke voorwaarden men aan beschrijvingen van de werkelijkheid moet opleggen. En deze laatste vraag plaatst de filosofie van quantummechanica terug in het hart van de metafysica.

Referenties

- Arntzenius, F. (1998). Curiouser and Curiouser: A Personal Evaluation of Modal Interpretations. In Dieks en Vermaas (1998), pp. 337–377.
- Bacciagaluppi, G. (2001). *The Modal Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. Te verschijnen.

¹⁰ Dit is een typisch kenmerk van quantummechanica. Als men een waarneming verricht aan een deeltje door er een meting aan te verrichten, dan verstoort de interactie tussen het deeltje en het meetinstrument in het algemeen de (dynamische) toestand van dat deeltje. Men kan nu bewijzen dat er toestanden zijn die altijd door een meting worden veranderd. Als een deeltje gedurende een periode zo'n toestand bezit, volgt dus dat er geen waarnemingen (metingen) aan dit deeltje kunnen zijn verricht (Vermaas (1999), paragraaf 12.1).

- Bacciagaluppi, G. en W.M. Dickson (1999). Dynamics for Modal Interpretations. *Foundations of Physics* 29, 1165–1201.
- Bub, J. (1992). Quantum Mechanics without the Projection Postulate. *Foundations of Physics* 22, 737–754.
- Bub, J. (1997). *Interpreting the Quantum World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Clifton, R.K. (1996). The Properties of the Modal Interpretations of Quantum Mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science* 47, 371–398.
- Dieks, D. (1988). The Formalism of Quantum Theory: An Objective Description of Reality? *Annalen der Physik* 7, 174–190.
- Dieks, D. (1998). Preferred Factorizations and Consistent Property Attribution. In Healey en Hellman (1998), pp. 144–159.
- Dieks, D. en P.E. Vermaas (Red.) (1998). *The Modal Interpretation of Quantum Mechanics*, Deel 60 van *Western Ontario Series in Philosophy of Science*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Fraassen, B.C. van (1973). Semantic Analysis of Quantum Logic. In C.A. Hooker (Red.), *Contemporary Research in the Foundations and Philosophy of Quantum Theory*. Dordrecht: Reidel, pp. 80–113.
- Fraassen, B.C. van (1991). *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Oxford: Clarendon.
- Fraassen, B.C. van (1994). Interpretations of Science; Science as Interpretation. In J. Hilgevoord (Red.), *Physics and Our View of the World*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 169–187.
- Healey, R.A. (1989). *The Philosophy of Quantum Mechanics: An Interactive Interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Healey, R.A. en G. Hellman (Red.) (1998). *Quantum Measurement: Beyond Paradox*, Deel 17 van *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Kochen, S. (1985). A New Interpretation of Quantum Mechanics. In P.J. Lahti en P. Mittelsteadt (Red.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics*. Singapore: World Scientific, pp. 151–169.
- Papineau, D. (1995). Science, Problems of the Philosophy of. In T. Honderich (Red.), *The Oxford Companion to Philosophy*. Oxford: Oxford University Press, pp. 809–812.
- Vermaas, P.E. (1999). *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics: Possibilities and Impossibilities of a Modal Interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press.