

*Proefschrift Lodewijk Koopman*

## **A Developmental Research on Introducing the Quantum Mechanics Formalism at University Level**

*Bespreking door:*

Hans van Bemmelen

ICLON, Universiteit Leiden

### **Inleiding**

Quantummechanica is een belangrijk onderdeel binnen de curricula van de universitaire natuurkunde- en scheikundestudies. Voor scheikundigen is het de basis van alle inzicht in chemische binding. Voor natuurkundigen is het de theorie van wat er gebeurt binnen in atomen en moleculen. Ook kernfysica, deeltjesfysica en vaste-stoffysica zijn quantumtheorieën. Het onderwerp is belangrijk en interessant vanwege deze centrale rol binnen de vakgebieden. Het is niet gemakkelijk quantummechanica te leren beheersen, want het is bij eerste kennismaking tegen-intuïtief en bovendien wiskundig moeilijk. Dat het onderwijs in de quantumchemie en de quantumfysica door Koopman systematisch en tot in details is onderzocht, is daarom zeer relevant voor docenten van natuurwetenschappelijke faculteiten die de taak hebben onderwijs te geven op dit gebied.

Het belang van het werk dat in het proefschrift is beschreven, reikt in twee richtingen verder dan de verkregen inzichten in leerprocessen op het gebied van quantummechanica binnen universitaire colleges, werkgroepen en computersessies. Ten eerste geeft het algemener inzicht in de didactiek van de universitaire natuurwetenschap. Dit is een van de weinige systematische onderzoeken naar bètadidactiek binnen het Nederlandse hoger onderwijs. In dit proefschrift zouden ook docenten die bijvoorbeeld colleges en werkgroepen elektromagnetisme of biochemie geven inspiratie kunnen opdoen betreffende onder andere mogelijkheden voor het onderzoeken van misconcepten, het inzetten van just-in-time-teaching en het ontwerpen van probleemstellend onderwijs. Ze zouden daarbij kunnen kennismaken met de mogelijkheid op een systematische wijze verbetering van het onderwijs te bereiken door aan ontwikkelingsonderzoek te doen. Ten tweede is dit onderzoek naar de leerprocessen van studenten die voor het eerst kennismaken met quantumprincipes ook van belang voor het voortgezet onderwijs, nu *Quantumwereld* is opgenomen als centraal-examendomein van het VWO-programma. Weliswaar is dat een andere groep studenten, met leerdoelen die verschillen van de universitaire, maar het gaat in beide gevallen om jonge mensen die voor het eerst kennismaken met quantumverschijnselen.

Deze bespreking omvat een beschrijving van het onderzoek en van de conclusies van Koopman, uiteraard ook met vermelding van de punten waar het onderzoek naar mijn mening niet optimaal is verlopen. Koopman geeft aanbevelingen voor de onderwijspraktijk in het hoger onderwijs en suggesties voor verder onderzoek, die het beide waard zijn ook hier te worden genoemd.

### **Samenvatting**

In het eerste hoofdstuk van het proefschrift wordt uitgelegd waarom is gekozen voor ontwikkelingsonderzoek. Deze vorm van onderzoek, waarbij studiemateriaal wordt ontworpen en in verschillende rondes volgens vooraf vastgestelde criteria getest, geëvalueerd en verbeterd, is welbekend, ook bijvoorbeeld binnen de universitaire lerarenopleidingen. Zeker voor stafleden van natuurkunde- en scheikundeafdelingen, die hier minder bekend mee zijn, is het nuttig dat deze werkwijze hier zo goed onderbouwd is beschreven. Door dit te lezen leren zij inzien dat dit een veel systematischer aanpak betreft dan het in de eigen cursus implementeren van hun persoonlijke visie op onderwijs.

Het literatuuroverzicht dat Koopman in hoofdstuk 2 geeft van wat in het verleden is onderzocht op het gebied van quantummechanica en quantumchemie, biedt onder andere inzicht in de vraag of het raadzaam is het semi-klassieke model van Bohr te onderwijzen. De resultaten van eerder onderzoek gaven een verdeeld beeld, maar uitgebreid onderzoek heeft geleerd dat de beste optie is dit te doen onder vermelding van het feit dat het een model betreft. Als je het Bohr-model plaatst in een reeks van modellen, dan leert de student ook veel over de manier waarop natuurkundigen modellen opstellen. Hoofdstuk 2 is door de volledigheid van het overzicht niet alleen nuttig als basis voor het vervolg van dit proefschrift, maar ook van praktisch nut voor ontwerpers van quantumonderwijs op alle niveaus.

In hoofdstuk 3 positioneert Koopman zijn werk binnen het constructivisme, in het bijzonder legt hij uit dat de aanpak in de opdrachten voor studenten *probleemstellend* zal zijn. Over deze aanpak is onderzoek gedaan binnen het voortgezet onderwijs, bijvoorbeeld door Klaassen (1995) en door Vollebregt (1998) op het gebied van radioactiviteit respectievelijk deeltjesmodellen. Kaper (1997), copromotor van Koopman, schreef zijn proefschrift over een probleemstellende aanpak van universitair thermodynamica-onderwijs. In dit hoofdstuk legt Koopman ook uit welke onderzoeksinstrumenten hij heeft gekozen. Het kader waarbinnen gesprekken tussen studenten en tussen student en docent worden onderzocht, is het Van Hiele-niveauschema. Dat is een beproefde methode om na te gaan of de discussie op een steeds hoger niveau komt.

In hoofdstuk 4 wordt een eerste ronde van onderzoek besproken, in feite een probleemverkenning. De lokale situatie aan de UvA wordt in kaart gebracht, onder andere via vragenlijsten. In samenspraak met de stafleden die de cursussen geven, komt naar boven dat nog voordat studenten kunnen gaan wennen aan een nieuw, quantummechanisch wereldbeeld, er hindernissen opdoemen. Gebrek aan wiskundige vaardigheden verhin-

dert dat ze toekomen aan nadenken over de nieuwe verschijnselen. Bovendien snappen ze bepaalde klassieke concepten onvoldoende om de verschillen met de quantumconcepten te kunnen appreciëren. Dat betreft met name inzicht in het begrip potentiële energie. Ook is een begrip nodig van golven en van het uitzenden van straling door versnellen-de ladingen.

Hoofdstuk 5 is gewijd aan een remediërend wiskundeprogramma. Via online-oefeningen worden de studenten verantwoordelijk gemaakt voor het in kaart brengen van hun voorkennis en voor het daarin aanbrengen van verbetering. Het effect is onderzocht via observaties en door naar de deelnamecijfers en resultaten van de tests te kijken. Koopman meldt hier successen. De eerlijkheid gebiedt te zeggen dat het niet heel moeilijk was om verbetering aan te brengen in een situatie waarin in het voorafgaande jaar een gemiddeld cijfer 2,5 was toegekend voor het tentamen quantumchemie. De verdienste van dit stuk onderzoek is dat alles systematisch is bijgehouden en dat er gedegen over is gerapporteerd. Aan de andere kant kun je zeggen dat deze ingrepen in het leerproces al veel eerder hadden moeten plaatsvinden, gezien het eerdere dramatische verschil tussen de verwachte uitkomsten van het leerproces en de werkelijke opbrengst. Dat verwijt treft de onderwijsorganisatie, niet de onderzoeker.

In hoofdstuk 6 volgt de werkelijke probleemstellende opzet van het lesmateriaal. Het betreft de eerste vier bijeenkomsten van de collegereeksen bij quantumfysica en quantumchemie, vakken die daarna op een meer traditionele wijze met hoor- en werkcolleges worden voortgezet. In een overzichtelijk schema, de didactische structuur, is een ontwerp gemaakt voor het samenspel van vakinhoud en motieven die de student op dat moment kan formuleren voor het zetten van een stap in de begripontwikkeling. In de probleemstellende aanpak zijn het zo vaak mogelijk confrontaties met experimentele gegevens die de studenten nopen hun oude concepten ter discussie te stellen.

Eén aspect waarbij experimenten een rol spelen is het vergelijken van experimenten waarin elektronen interferentie vertonen met experimenten waarin watergolven dat doen. Hoofdstuk 7 is gewijd aan deze analogie. Een belangrijke verdienste van het werk in het proefschrift is dat dit niet zomaar als een aardige analogie tussen deze twee specifieke terreinen wordt behandeld, het niveau waarop een fysicus of chemicus dit in eerste instantie zal aanpakken, maar dat studie is gemaakt van wat in bredere zin bekend is over het bereiken van leerdoelen via analogieredeningen. Uitgeschreven gesprekken tussen studenten geven inzicht in de manier waarop het leren kwalitatief verloopt.

Ook in hoofdstuk 8 wordt gerapporteerd over kwalitatief onderzoek. Het gaat hier vooral om de vraag of inzicht in de concepten, dus inzicht in de vraag wat de verbanden zijn zonder te rekenen, een positieve invloed heeft op het later leren doen van berekeningen binnen het formalisme. Andersom is in sommige cursussen de aanname dat eerst leren rekenen automatisch leidt tot conceptueel inzicht. Ook dat is onderzocht. Kort gezegd is de conclusie dat kwalitatief inzicht in de concepten een noodzakelijke, maar niet een voldoende voorwaarde is voor het bereiken van voldoende niveau in rekentaalvaardigheid. Een

focus op vaardigheid in het doen van berekeningen leidt er bovendien niet toe dat studenten een goed conceptueel inzicht krijgen. Enkele saillante voorbeelden laten zien dat studenten nieuwe misconcepten kunnen ontwikkelen door ten onrechte generalisaties uit gegeven voorbeelden te destilleren. Al met al genoeg redenen om in het vervolg ruime aandacht te besteden aan de basisconcepten.

Het laatste onderzoekshoofdstuk gaat over retentie. Het idee was dat een goed conceptueel begrip, zoals aangebracht tijdens de vier sessies met probleemstellend onderwijs, wellicht als resultaat heeft dat studenten het geleerde beter 'vasthouden'. Dit werd gemeten. De conclusies zijn wat teleurstellend. Er is nauwelijks achteruitgang, maar de score is al heel slecht. Het lijkt dus dat wat begrepen wordt bij de eerste meting ook bij de tweede meting 'onthouden' is, maar dat de test inzichtelijk gezien moeilijker blijkt dan het tentamen zelf. Ook dit resultaat pleit ervoor niet er op te vertrouwen dat als studenten redelijk kunnen rekenen ze ook conceptueel inzicht zullen hebben.

Na een overzicht van de gevonden resultaten in hoofdstuk 10 volgen nog aanbevelingen voor het ontwikkelen van onderwijs op universiteiten en voor het doen van verder onderzoek naar de didactiek binnen het hoger onderwijs.

### **Commentaar**

Koopman doet in het laatste hoofdstuk aanbevelingen voor het doorvoeren van verbeteringen in de organisatie van het hoger onderwijs die zeer noodzakelijk lijken. Eerder in deze bespreking werd opgemerkt dat voorafgaand aan het onderzoek er binnen de bestaande cursussen wel heel veel verschil was tussen het beoogde en het bereikte eindniveau van de studenten. Het is prijzenswaardig dat dit binnen deze cursussen uiteindelijk is aangepakt, maar het lijkt erop te duiden dat voorafgaand aan de interventies die Koopman beschrijft de docenten wel erg weinig voeling hielden met wat de studenten begrepen. Als zaken als monitoring van wiskundige voorkennis eerder waren aangepakt, dan had Koopman daar minder tijd aan hoeven besteden en had hij eerder kunnen beginnen aan het onderzoeken van de centrale vragen op dit gebied, die meer in de overgang van klassiek naar quantum liggen dan op het gebied van remediërende wiskunde. Nu is bijvoorbeeld de inzet van het Van Hiele-niveauschema als methode om voortgang in inzicht bij studenten te meten beperkt gebleven in omvang. Die beperkte hoeveelheid data komt ook doordat een nieuwe docent van de cursus quantumfysica het onderzoek niet wilde voortzetten. Het is de onderwijsorganisatie te verwijten dat dit is gebeurd: dat continuïteit niet gewaarborgd bleek is zowel kwalijk voor de kwaliteit van het onderwijs als voor de mogelijkheden voor de onderzoeker om nieuwe inzichten te verwerven in de didactische processen.

Koopmans aanbevelingen zijn waardevol. Dat de toetsing zich zozeer blijkt te richten op het wiskundig formalisme en zo weinig op conceptueel inzicht is niet alleen een omissie omdat de toetsing daarmee niet past bij het speciaal ontworpen onderwijs, het is hoe dan

ook een eenzijdige manier van doen. Docenten in het hoger onderwijs zouden de mogelijkheid moeten krijgen zich in deze richting te ontwikkelen.

Koopman heeft met het beschreven onderzoek veel werk verzet. Het blijkt dat de ingeslagen weg van via confrontatie met meetgegevens een probleemstellende route ontwerpen een goede is. Er is in de ontwikkeling van lesmateriaal op het gebied van quantummechanica en de bestudering van wat het werken daarmee oplevert nog veel te doen. Op universitair niveau zou bijvoorbeeld het vervolg van de ontwikkeling van het inzicht in quantumprocessen later in de studie moeten worden onderzocht. Op VWO-niveau zou kunnen worden gekeken of behalve experimenten ook de werking van technische toepassingen van de quantumtheorie, zoals de laser of de digitale camera, een goed startpunt zijn van een probleemstellende lessenserie. Koopmans werk zou verplichte kost moeten zijn voor docenten op beide niveaus, in ieder geval voor hen die het onderwijs ontwerpen. Verder onderzoek naar de didactiek van dit lastige maar zeer belangrijke vakgebied is dringend nodig, gezien de invoering ervan op het VWO en de gebleken moeilijkheden en mogelijkheden in het hoger onderwijs. Het is verheugend dat in Twente dankzij een lerarenbeurs een onderzoek binnen het VWO-onderwijs wordt gestart.

### **Literatuur**

- Kaper, W.H. (1997). *Thermodynamica leren onderwijzen*. Utrecht: CD- $\beta$  Press.
- Klaassen, C.W.J.M. (1995). *A Problem-Posing Approach to Teaching the Topic of Radioactivity*. Utrecht: CD- $\beta$  Press.
- Vollebregt, M.J. (1998). *A Problem-Posing Approach to Teaching an Initial Particle Model*. Utrecht: CD- $\beta$  Press.

