

Ontwerp van een  
Blended Learning Masterclass  
Quantummechanica voor Pre-U

---

Enzo Meijer  
s0177466



Universiteit Twente

Faculteit BMS  
Pre-U  
ELAN

Onderzoek van Onderwijs

**Ontwerp van een  
Blended Learning Masterclass  
Quantummechanica voor Pre-U**

Enzo Meijer  
s0177466

[e.m.meijer@student.utwente.nl](mailto:e.m.meijer@student.utwente.nl)

*1e Begeleider*

**dr.ir. H.J. Pol**  
ELAN  
Universiteit Twente

*2e Begeleider*

**drs. J. Volbers**  
Pre-U  
Universiteit Twente

18 januari 2019



# Abstract

Voor dit Onderzoek van Onderwijs is er in opdracht van Pre-U, het pre-university programma van de Universiteit Twente, een blended learning masterclass quantummechanica voor 5/6 vwo ontwikkeld. Op basis van een vooronderzoek zijn de wensen van de opdrachtgever, de randvoorwaarden en aanbevelingen uit de literatuur vastgesteld. Er is aandacht besteedt aan de algemene didactiek van blended learning en de vakdidactiek van quantummechanica. Dit heeft geleid tot een set van twaalf eisen waar het ontwerp aanmoet voldoen. Op basis deze eisen is een ontwerp voor de blended learning masterclass gerealiseerd. Aan de hand van de quantumcomputer wordt quantummechanica op een toegankelijke wijze geïllustreerd zonder een uitgebreide wiskundige benadering. De masterclass bestaat uit zes weken met een startbijeenkomst, vier online lesweken via een online leeromgeving en slotbijeenkomst. De onderwerpen van de lesweken zijn als volgt: 1) Startbijeenkomst met kennismaking en uitleg masterclass. 2) Inhoudelijke verdieping over spin, superpositie en verstrengeling. 3) Hardware van een quantumcomputer. 4) Rekenen met een quantumcomputer. 5) Toepassingen en toekomst. 6) Slotbijeenkomst met posterpresentaties en een rondleiding op de Universiteit Twente. Het ontwerp is getest op leeropbrengst en ervaringen, door middel van een pilot waarin zes leerlingen uit vwo 5 hebben deelgenomen. Hierna zijn de ontwerpeisen getoetst en worden er enkele wijzigingen voorgesteld voor zowel deze masterclass als toekomstige blended learning masterclasses bij Pre-U.

## Abstract (English)

This research of education features the design of a blended learning masterclass for high school level 5/6 vwo. The research was commissioned by Pre-U, the pre university program of the University of Twente. By means of an exploratory research the wishes of the client, external conditions and recommendations from literature were determined. This has led to a set of twelve requirements which the design has to meet and by which the blended learned masterclass was conceived. The quantumcomputer was chosen as a subject to illustrate quantum mechanics in an accessible way, without a complex mathematical approach. The masterclass consists of six weeks with a kick-off meeting, four online weeks through an online learning platform and a final meeting. The topics of the lessons weeks are: 1) Kick-off meeting with introduction of the teacher, students and the masterclass. 2) Theoretical framework on spin, super position and entanglement. 3) Hardware of a quantum computer. 4) Quantum computing. 5) Applications and future outlook. 6) Final meeting with poster presentations and a tour at University of Twente. Through a pilot study in which six students from vwo 5 participated, the design was evaluated on learning outcomes and experiences. Afterwards the design requirements were assessed together with a set of proposed adjustments for this masterclass and future blended learning masterclasses at Pre-U.

# Inhoudsopgave

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>Voorwoord</b>                                  | <b>1</b>  |
| <b>1 Inleiding</b>                                | <b>3</b>  |
| 1.1 Aanleiding                                    | 3         |
| 1.1.1 Pre-U Blended Learning Masterclasses        | 3         |
| 1.1.2 Quantummechanica                            | 3         |
| 1.1.3 Pilot                                       | 4         |
| 1.2 Onderzoeksopzet                               | 4         |
| 1.2.1 Ontwerp vragen                              | 5         |
| 1.2.2 Opbouw verslag                              | 5         |
| <b>2 Vooronderzoek</b>                            | <b>7</b>  |
| 2.1 Randvoorwaarden Pre-U                         | 7         |
| 2.1.1 Masterclasses bij Pre-U                     | 7         |
| 2.1.2 Globale Structuur                           | 8         |
| 2.1.3 Weekstructuur                               | 8         |
| 2.1.4 Online leeromgeving Eureka                  | 9         |
| 2.1.5 Micro lectures                              | 9         |
| 2.1.6 Tijdpad                                     | 9         |
| 2.2 Didactische randvoorwaarden                   | 10        |
| 2.2.1 Quantummechanica                            | 10        |
| 2.2.2 Blended Learning                            | 12        |
| 2.3 Eisen aan ontwerp                             | 13        |
| <b>3 Ontwerp Masterclass</b>                      | <b>15</b> |
| 3.1 Vaststellen deelonderwerp                     | 15        |
| 3.2 Ontwerp algemeen                              | 15        |
| 3.2.1 Leerdoelen                                  | 15        |
| 3.2.2 Invulling globale structuur                 | 16        |
| 3.2.3 Weekstructuur                               | 16        |
| 3.2.4 Micro lectures                              | 17        |
| 3.3 Individuele lesweken                          | 17        |
| 3.3.1 Startbijeenkomst                            | 18        |
| 3.3.2 Lesweek 2: Inhoudelijke Verdieping          | 19        |
| 3.3.3 Lesweek 3: Hardware van een Quantumcomputer | 20        |
| 3.3.4 Lesweek 4: Rekenen met een Quantumcomputer  | 21        |
| 3.3.5 Lesweek 5: Toepassingen & Toekomst          | 23        |
| 3.3.6 Slotbijeenkomst                             | 24        |
| 3.3.7 Ondersteunende pagina's                     | 25        |
| <b>4 Opzet Evaluatie</b>                          | <b>27</b> |
| 4.1 Proefpersonen                                 | 27        |
| 4.2 Dataverzameling                               | 27        |
| 4.2.1 Opdrachten                                  | 27        |
| 4.2.2 Interactie                                  | 28        |
| 4.2.3 Evaluaties                                  | 28        |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>5 Resultaten &amp; Analyse</b>                 | <b>29</b> |
| 5.1 Verloop masterclass . . . . .                 | 29        |
| 5.2 Opdrachten . . . . .                          | 31        |
| 5.2.1 Posters startbijeenkomst . . . . .          | 31        |
| 5.2.2 Weekopdrachten . . . . .                    | 31        |
| 5.2.3 Posters eindopdracht . . . . .              | 32        |
| 5.2.4 Peer feedback . . . . .                     | 33        |
| 5.3 Interacties . . . . .                         | 34        |
| 5.3.1 Discussiebalk . . . . .                     | 34        |
| 5.3.2 Forum . . . . .                             | 34        |
| 5.3.3 E-mailcontact leerlingen . . . . .          | 34        |
| 5.3.4 Webconferenties . . . . .                   | 35        |
| 5.4 Evaluaties . . . . .                          | 36        |
| 5.4.1 Weekevaluaties leerlingen . . . . .         | 36        |
| 5.4.2 Eindevaluatie leerlingen . . . . .          | 36        |
| 5.4.3 Eindevaluatie docent . . . . .              | 37        |
| 5.4.4 Eindevaluatie projectteam Pre-U . . . . .   | 38        |
| 5.5 Toetsen van eisen . . . . .                   | 39        |
| 5.6 Voorgestelde wijzigingen . . . . .            | 41        |
| <b>6 Conclusie</b>                                | <b>43</b> |
| <b>7 Discussie</b>                                | <b>47</b> |
| 7.1 Kanttekeningen . . . . .                      | 47        |
| 7.2 Aanbevelingen . . . . .                       | 48        |
| <b>Bibliografie</b>                               | <b>50</b> |
| <b>A Lesmateriaal Eurekos</b>                     | <b>52</b> |
| <b>B Toestemming Deelnemers</b>                   | <b>55</b> |
| B.1 Toestemmingsverklaringsformulier . . . . .    | 55        |
| B.2 Brief Ouders . . . . .                        | 56        |
| <b>C Posters Leerlingen</b>                       | <b>57</b> |
| C.1 Posters brainstorm startbijeenkomst . . . . . | 57        |
| C.2 Posters eindopdracht . . . . .                | 59        |
| <b>D Weekevaluaties Leerlingen</b>                | <b>63</b> |
| D.1 Evaluaties lesweek 2 . . . . .                | 63        |
| D.2 Evaluaties lesweek 3 . . . . .                | 63        |
| D.3 Evaluaties lesweek 4 . . . . .                | 64        |
| D.4 Evaluaties lesweek 5 . . . . .                | 65        |
| <b>Lijst van figuren</b>                          | <b>67</b> |
| <b>Lijst van tabellen</b>                         | <b>67</b> |





# Voorwoord

Dit verslag is het resultaat van het Onderzoek van Onderwijs voor de lerarenopleiding Educatie en Communicatie in de Bètawetenschappen aan de Universiteit Twente. Vanaf het najaar 2017 tot en met januari 2019 ben ik bezig geweest met dit onderzoek en ontwerp. Het was een lange weg, maar uiteindelijk kijk ik terug op een leerzame periode en het heeft geresulteerd in een verslag en masterclass waar ik volledig achter sta en trots op ben. Dit had ik echter niet kunnen voltooien zonder de hulp van verschillende mensen. Ik beschouw *'give credit where credit is due'* als een van de belangrijkste principes van de academie en wil de betrokkenen daarom graag bedanken: Henk Pol was de beste begeleiders die ik kon wensen voor het onderzoek. Ik hield altijd iets nieuws over aan onze gesprekken en heb daarnaast geleerd dat wetenschappelijk onderzoek verdacht veel lijkt op koken. Als ik op zoek was naar een gestrekt been, al dan niet voor een schop onder mijn kont, kon ik altijd bij Jan Volbers aankloppen. Hij heeft ervoor gezorgd dat ik mijn OvO bij Pre-U heb kunnen doen. Met zijn jarenlange en omvangrijke ervaring, was hij de aangewezen persoon om het ontwerp te begeleiden en ik beschouw hem als mijn mentor. Jeroen de Vin bracht zijn geheel eigen, en vaak afwijkende, mening mee. Tegengeluid dat soms ook nodig is. Ook heeft hij veel technisch werk uit handen genomen en gezorgd dat de masterclass er goed uitziet. Lois Kiekebosch en Niels Jansen, voor jullie ondersteuning binnen het projectteam en verzorgen van de aanvullende lespagina's. Vanuit TELT werd Pre-U ondersteund door Eduardo Hermsen en Wytze Koopal. Arthur Veugelers en Martin Bosker hebben Niels en mij geholpen met informatie over micro lectures en opnames in de studio. Jelmer Boter dat hij tijd wou maken voor een praatje over QuTech, vlak voordat hij naar het vliegveld moest. Floris Zwanenburg voor de interessante rondleiding bij NanoElectronics en de extra tijdschriften. Als laatste, alle andere collega's van Pre-U. Ik kan met recht zeggen dat dit het leukste bijbaantje is dat ik tot nu toe gehad heb. Het was daarom ook een genoegen om mijn Onderzoek van Onderwijs bij Pre-U te mogen doen.

Enzo Meijer  
Enschede, 18 januari 2019



# Inleiding

Dit eerste hoofdstuk dient als inleiding op dit ontwerponderzoek. De aanleiding beschrijft de motivatie om bij Pre-U te starten met blended learning masterclasses en waarom quantummechanica hier een geschikt onderwerp voor is. In de onderzoeksopzet zal verder worden ingegaan op de wijze waarop dit ontwerponderzoek is opgebouwd, samen met probleemstelling en ontwerp vragen.

## 1.1 Aanleiding

De aanleiding voor dit ontwerp onderzoek is de wens van Pre-U voor de ontwikkeling van een blended learning masterclass, met quantummechanica als gekozen onderwerp. Waarbij de ontwikkeling deze blended learning masterclasses zal dienen als pilot voor eventuele latere masterclasses.

### 1.1.1 Pre-U Blended Learning Masterclasses

Pre-U is het Pre-University programma van de Universiteit Twente. Door middel van educatieve programma's heeft Pre-U het doel om leerlingen intensief kennis te laten maken met de UT (vakgebieden, opleidingen en de campus) waarmee ze hun talenten op het gebied van wetenschap, technologie en samenleving kunnen ontdekken en zich zo voorbereiden op studeren in het hoger onderwijs en de UT in het bijzonder. Naar aanleiding van een brief van College van Bestuur aan Pre-U is gesteld dat Pre-U zichtbaarder naar buiten moet treden. Als gevolg hiervan heeft er een naamsverandering plaats gevonden (Pre-U was voorheen Twente Academy), is er een intensievere samenwerking met de afdeling Marketing & Communicatie en heeft Pre-U een duidelijkere positionering binnen de UT gekregen als Pre-University. Tot op heden ligt de focus van Pre-U met name op leerlingen binnen de regio. De UT wil met Marketing & Communicatie de zichtbaarheid in het westen van het land vergroten, om zo uit dit deel van het land meer studenten aan te trekken. Eerder stonden er in Amsterdam, Rotterdam en Utrecht zogenaamde 'Pop-Up Universities' waarin op locatie een voorlichtingsprogramma over de UT gegeven werd. Om aan te sluiten bij de vraag naar Pre-U activiteiten buiten de regio is het plan ontstaan om tijdens het Pop-Up University te starten met blended learning masterclasses.

Een masterclass bij Pre-U is een wetenschappelijk onderwijsprogramma waarin vwo-leerlingen zich kunnen verdiepen in een specifiek onderwerp en tegelijkertijd kennis maken met de Universiteit Twente. In de visie van Pre-U wordt bij blended learning de lesvormen uit de reguliere masterclasses gecombineerd met de mogelijkheden van online onderwijs. De beoogde opzet voor de blended learning masterclass is een startbijeenkomst op locatie, gevolgd door vier online sessies en de slotbijeenkomst op de Universiteit Twente tijdens de voorlichtingsdagen. Een blended learning masterclass bestond nog niet eerder bij Pre-U en zal daarom nieuw ontwikkeld moeten worden. Daarbij hoort dat voor een nieuwe masterclass een onderwerp gekozen moet worden, bij voorkeur een die nog niet in het masterclassaanbod vertegenwoordigd is en aansluit bij het (vernieuwde) vwo-curriculum. Zodoende is de keuze gevallen op quantummechanica.

### 1.1.2 Quantummechanica

Samen met de relativiteitstheorie is quantummechanica een van de belangrijkste natuurkundige ontwikkelingen van de twintigste eeuw. In deze natuurkundige theorie wordt het gedrag van materie en energie op de kleinste schaal beschreven. Waar quantumeffecten zich ogenschijnlijk afspelen op sub-atomair niveau, zijn de effecten in de macro-wereld ook duidelijk merkbaar. Om natuurkundige verschijnselen om ons heen volledig te kunnen verklaren zal men uiteindelijk aankomen bij de quantummechanica. Denk hierbij aan de kleuren van de regenboog, elektrische stroom en het stralen van de zon. Daarnaast is het ook mogelijk om direct quantumeffecten op een macroscopisch niveau waar te nemen, de enkele voorbeelden hiervan zijn superfluiditeit en supergeleiding. Verder zijn quantumeffecten te vinden in een tal van toepassingen zoals een laser, MRI-scanner en de atoomklokken die gebruikt worden in GPS-satellieten. En ook in consumentenelektronica vind men quantum, Samsung verkoopt een QLED TV die gebruikt maakt van quantum dots. Quantumfysische

verschijnselen in elektronica zijn overigens niet nieuw. Halfgeleiders werken volgens een quantumverschijnsel en dienen als basis voor de transistor, een onderdeel dat in grote getallen aanwezig is in nagenoeg ieder elektronisch apparaat met een chip.

Een ontwikkeling waarop het moment veel onderzoek aan gedaan wordt, is die van de quantumcomputer. Een quantumcomputer is op fundamenteel niveau anders dan een klassieke computer, het stelt je in staat berekeningen uit te voeren die voor klassieke computers onmogelijk zijn en ook zullen blijven. Met de opkomst van dergelijke technologie is de verwachting dat quantumverschijnselen geleidelijk een grotere rol gaan innemen in de wetenschappelijke vooruitgang en mettertijd ook in de samenleving (de Wolf, 2017). Er is weliswaar geen vooruitzicht dat consumenten over enkele jaren een quantumcomputer thuis zullen hebben. Toch is het een onderzoeksgebied dat gevolgen kan hebben voor iedereen. Nieuwe vormen van encryptie en het kraken daarvan, met aansluitend het privacyvraagstuk zijn slechts enkele voorbeelden.

Kennis hebben van opkomende technologie waarmee men (in de toekomst) geconfronteerd zal worden, kan bijdragen aan onder andere mediawijsheid, burgerschap en digitale geletterdheid. Dit zijn tevens eigenschappen die in de 21<sup>e</sup> eeuwse vaardigheden centraal staan volgens de Stichting Leerplanontwikkeling, SLO (Thijs, Fisser, & van der Hoeven, 2014). Om verantwoorde keuzes te kunnen maken en deel te kunnen nemen in het publieke debat is het belangrijk dat leerlingen een technisch bewustzijn ontwikkelen. Met de toenemende mate waarin quantumfysische toepassingen een rol gaan spelen in het dagelijks leven, is het relevant dat leerlingen hierover onderwezen worden. Dit sluit aan bij de vernieuwing van het havo-vwo-curriculum. Sinds 2013 zijn er enkele nieuwe onderwerpen toegevoegd aan het centraal- en schoolexamen voor het vak natuurkunde op havo en vwo (Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, 2010). 'Quantumwereld' is een van die nieuwe domeinen. Hiermee heeft het onderwerp quantummechanica ook intreden gedaan in het voortgezet onderwijs in Nederland en volgt de ontwikkeling die ook al eerder in het buitenland plaats vond (Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman, & Van Joolingen, 2017).

Het onderwerp van een blended learning masterclass over quantummechanica sluit aan bij de nieuwe onderwerpen van het vwo-curriculum. Het onderwerp is breed genoeg om verdieping voor leerlingen te kunnen bieden. Tevens kan de geboden verdieping, versterking van de conceptuele begripsvorming met zich meebrengen, wat de leerlingen kan helpen in voorbereiding op de (school)examens.

### 1.1.3 Pilot

Vanuit Pre-U is er besloten om bij wijze van een pilot te starten met de ontwikkeling van twee blended learning masterclasses voor 5/6 vwo in de thema's management en natuur & techniek. De masterclass 'Ondernemerschap' is een bestaande reguliere masterclass die zal worden omgevormd tot een blended learning-variant. De tweede masterclass 'Quantummechanica' zal nieuw ontwikkeld worden en is tevens het onderwerp van dit onderzoek van onderwijs. Mocht deze pilot positief resultaat leveren, zouden er in de toekomst meer blended learning masterclasses ontwikkeld kunnen worden. Dit ontwerponderzoek kan dan als basis dienen voor verdere ontwikkeling en biedt een set van ontwerpcriteria.

De ontwikkeling van de blended learning masterclasses vindt plaats met een samengesteld projectteam. Henk Pol en Jan Volbers vervullen de rol van onderzoeksbegeleider voor dit Onderzoek van Onderwijs. Henk, vakdidacticus natuurkunde van ELAN, begeleidt het onderzoek, Jan is projectleider van Pre-U en begeleidt in de ontwikkeling van de masterclass. Niels Jansen ontwikkelt de andere blended masterclass over ondernemerschap. Tevens is er ondersteuning van Lois Kiekebosh, van Eduardo Hermsen en Wytze Koopal van Technology Enhanced Learning & Teaching (TELT) en Jeroen de Vin, ict-consultant voor de technische implementatie.

## 1.2 Onderzoeksopzet

De ontwikkeling van een blended learning masterclass is een ontwerpend onderzoek zoals deze door Van der Donk en Van Lanen (2016) beschreven wordt. Het doel is om een eerste ontwerp van de masterclass te construeren, deze te testen en op basis van de gevonden te resultaten te evalueren. De ontwerpcyclus wordt hier ten minste één keer doorlopen. Op basis van de aanleiding zullen ontwerp vragen opgesteld worden. In het vooronderzoek zal het vraagstuk verder geanalyseerd worden. Hieruit zal een set van eisen geformuleerd worden, dat als raamwerk dient waarbinnen de masterclass ontworpen zal worden. Dit ontwerp wordt vervolgens getest

waarna de resultaten geëvalueerd worden. Het eindproduct is een uitgewerkte, eerste versie van het lesmateriaal waarmee de blended learning masterclass uitgevoerd kan worden.

### 1.2.1 Ontwerp vragen

Het ontwerpen, en evalueren, van een blended learning masterclass quantummechanica staat in dit onderzoek centraal. Voor dit ontwerp ligt de uitdaging in het verwerken van een lastig ontwerp als quantummechanica in een masterclass, die in de vorm van blended learning zal worden aangeboden. Voor dit ontwerpend onderzoek geldt de volgende hoofdvraag:

#### **Hoe kan een effectieve blended learning masterclass van Pre-U over quantummechanica voor leerlingen in 5/6 vwo er uitzien?**

Om deze hoofdvraag te beantwoorden kan vanuit meerdere invalshoeken het vraagstuk benaderd worden. Enerzijds is er het ontwerp van de lesmateriaal en aan welke eisen dit moet voldoen. Anderzijds is er de evaluatie van het ontwerp. Aan de hand van twee aspecten zal het ontwerp geëvalueerd worden, de leeropbrengst en de ervaringen. Hierdoor zijn er voor dit ontwerponderzoek de volgende deelvragen opgesteld:

1. Wat zijn de eisen waaraan het ontwerp voor de masterclass moet voldoen en hoe verhouden deze zich tot wensen van Pre-U en aanbevelingen vanuit de literatuur?
2. Wat is de leeropbrengst van de leerlingen na afloop van masterclass, in hoeverre zijn de gestelde leerdoelen behaald?
3. Wat zijn de ervaringen van de leerlingen, docent en Pre-U na afloop van de masterclass?

### 1.2.2 Opbouw verslag

Na het uiteenzetten van de aanleiding en uitsplitsen van de hoofd- en deelvragen in hoofdstuk 1 Inleiding, zal in hoofdstuk 2 Vooronderzoek worden ingegaan op de behoeftes van Pre-U, samen met de randvoorwaarden vanuit de context en aanbevelingen uit de literatuur om zo tot een lijst van eisen te komen waaraan het ontwerp van de masterclass moet voldoen. Vervolgens zal in hoofdstuk 3 Ontwerp Masterclass het gerealiseerde ontwerp worden gepresenteerd en toegelicht. Hoofdstuk 4 Opzet Evaluatie geeft een beschrijving hoe het ontwerp geëvalueerd zal worden. De gevonden resultaten worden in hoofdstuk 5 gepresenteerd en besproken. Hierna volgt in hoofdstuk 6 de conclusie en in hoofdstuk 7 wordt afgesloten met een discussie bestaande uit kanttekeningen en aanbevelingen.



# Vooronderzoek

In dit hoofdstuk wordt een analyse gemaakt dat zal dienen als input voor het ontwerp. Hierin wordt eerst aandacht besteed aan de randvoorwaarden die vanuit Pre-U naar voren komen. Daarnaast wordt ook stilgestaan bij de onderwijskundige randvoorwaarden, in het bijzonder het behandelen van quantummechanica met deze doelgroep en het gebruik van blended learning als onderwijsvorm. Aan het einde wordt een lijst met concrete eisen geformuleerd waaraan de masterclass moet voldoen.

## 2.1 Randvoorwaarden Pre-U

Ondanks dat de blended learning masterclass quantummechanica nieuw ontwikkeld zal worden, betekent het niet dat deze met volledige vrijheid ontworpen kan worden. Vanuit Pre-U zijn er al reeds enkele randvoorwaarden opgesteld waaraan de masterclass moet voldoen. Mede om zo overeenstemming te creëren tussen de blended learning masterclass quantummechanica en ondernemerschap. Deze randvoorwaarden bieden enkele kaders om het ontwerp beter te kunnen richten. Zo moet de masterclass passen binnen het huidige aanbod van masterclasses van Pre-U, is de doelgroep en het tijdsframe al bekend, ligt er een voorstel voor een globale en een weekstructuur en zal het lesmateriaal worden aangeboden via de online leeromgeving Eurekos.

### 2.1.1 Masterclasses bij Pre-U

Masterclasses bij Pre-U zijn verdiepende lesprogramma's voor vwo-leerlingen die naast hun reguliere schoolvakken extra uitdaging zoeken. Alle masterclasses richten zich op een onderwerp dat niet in het huidige vwo-curriculum opgenomen is en daardoor een verdieping voor de leerlingen biedt. Masterclasses worden aangeboden voor de groepen 2/3 vwo, 4 vwo en 5/6 vwo en zijn onderverdeeld in vijf verschillende thema's, deze komen overeen met de onderzoeksthema's die de UT representeren. Het aantal bijeenkomsten waaruit de masterclass bestaat varieert van drie bijeenkomsten voor 2/3 vwo, tot zes bijeenkomsten voor 5/6 vwo.

Een masterclass wordt ontwikkeld door studenten van Pre-U, daarbij worden ze ondersteund door vakinhoudelijke specialisten en vakdidactici, dan wel betrokken docenten uit het voorgezet onderwijs. Na de ontwikkeling verzorgen studenten in duo's de masterclassbijeenkomsten in collegezalen van de Universiteit Twente. In figuur 2.1 is een overzicht gegeven van het huidige masterclass-aanbod. Ondanks dat de blended learning masterclasses op een andere wijze worden aangeboden, is het wel van belang dat deze passen in huidige aanbod, waarin verdieping centraal staat en mogelijkheid om kennis te maken met de Universiteit Twente.

Aan masterclasses bij Pre-U zijn kosten verbonden. Deelname aan een reguliere 5/6 vwo masterclass kost € 120,- per deelnemer, leerlingen van Pre-U partnerscholen betalen een gereduceerd tarief van € 90,-. Voor de blended learning masterclasses zijn de kosten vastgesteld op € 100,- per deelnemer en voor leerlingen van partnerscholen € 90,-. De kosten worden doorgaans aan de school gefactureerd. Of deze vervolgens aan de (ouders van de) leerling worden doorberekend is aan de school om te beslissen.

Omdat deze masterclass, samen met die van Ondernemerschap, zal dienen als pilot is het op voorhand niet precies duidelijk wat voor soort leerlingen zullen deelnemen. Wel kan op basis van eerdere ervaring met de reguliere masterclasses een inschatting gemaakt worden. Leerlingen die bij Pre-U deelnemen aan masterclasses komen daar mee in aanraking vanuit eigen interesse of op aanraden van de school. Het zijn leerlingen die zich naast hun schoolprogramma willen verdiepen in een extra onderwerp. Tevens zijn het leerlingen die van verder dan gebruikelijk naar de UT komen om onderwijs te volgen. Hierdoor kan rekening gehouden worden met gemotiveerde leerlingen die graag iets willen leren en zal de lesstof hier op worden afgestemd.

|         | Gezondheid           | Gedrag                                                        | Management                                       | Technisch ontwerpen                 | Natuur en techniek               | ICT en wiskunde                                             |
|---------|----------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 2/3 VWO | Tumoren kun je horen | Global viewpoints*                                            | Evenementen management<br>Start je eigen bedrijf | Ontwerp je eigen app                | Lab on a Chip<br>Nanotechnologie | Hacken<br>Priemgetallen & geheimschrift<br>Automatentheorie |
| 4 VWO   | OK van de toekomst   | Psychologie                                                   | Debating in Europe*                              | Robotica                            | In ontwikkeling                  | Wiskunde zet de toon                                        |
| 5/6 VWO | Metten aan de mens   | De psychologie achter liegen<br>Leid jouw communicatie-bureau | Ondernemerschap<br>Strategic crisis management*  | Colonizing Mars*<br>In ontwikkeling | Nanotechnologie<br>Aerodynamica  | Millennium problemen<br>In ontwikkeling                     |

\* Uitleg en materialen zijn Engels

**Figuur 2.1.** Aanbod masterclasses Pre-U voorafgaand aan de ontwikkeling van de pilot.

## 2.1.2 Globale Structuur

Voor de pilot is vanuit Pre-U gekozen een masterclasses voor 5/6 vwo te ontwikkelen. Daarbij is een globale structuur gekozen hoe de masterclass zal worden ingedeeld. Deze bestaat uit een centrale startbijeenkomst, gevolgd door vier online sessies en een centrale slotbijeenkomst op de Universiteit Twente. Een schematische planning wordt weergegeven in figuur 2.2 Deze structuur komt overeen met een gangbare vorm van blended learning die gevonden is door Boelens, De Wever, en Voet (2017). Deze structuur is gekozen zodat het overeenkomt met een reguliere 5/6 vwo masterclass van zes bijeenkomsten, waarin vier bijeenkomsten zijn vervangen door online lesweken. Tijdens de startsessie is er aandacht voor de organisatie van de masterclass en kunnen docenten en leerlingen kennis met elkaar maken. Hierna zal op afstand verder gewerkt worden aan de masterclass en houden de leerlingen en docent online contact met elkaar. Bij de slotbijeenkomst komt de groep weer samen en zal de masterclass afgerond en geëvalueerd worden.



**Figuur 2.2.** Schematische weergave van de globale masterclasstructuur.

## 2.1.3 Weekstructuur

Volgend op de andere blended learning masterclass Ondernemerschap is er gekozen voor een weekstructuur voor de online lesweken, om zo enige overeenstemming tussen de masterclasses te creëren. In deze structuur komt het nieuwe lesmateriaal wekelijks op maandagochtend online, hierin wordt nieuwe uitleg aangeboden en de opdracht voor die week uitgelegd. De leerlingen kunnen er gedurende deze week in eigen tijd mee aan de slag. Op woensdag worden de gemaakte opdrachten ingeleverd, waarna ze op vrijdag feedback ontvangen en de volgende maandag de nieuwe week weer van start gaat. Op deze wijze zullen de leerlingen eerst zelf aan de slag moeten met lesmateriaal, om vervolgens later in de week de vergelijken met het medeleerlingen. De



tijdsbesteding per sessie bedraagt 4 uur. Dit is afgeleid van de reguliere masterclasses, een bijeenkomst op de UT van drie uur met maximaal een uur huiswerk. In deze vorm zullen er vier bijeenkomsten komen te vervallen maar er wordt uitgegaan van een vergelijkbare tijdsbesteding. Of dit in de praktijk ook overeenkomt kan achteraf worden vastgesteld.

### 2.1.4 Online leeromgeving Eurekos

Gedurende de masterclass zal er gebruik worden van gemaakt van een online leeromgeving waarin de docent en leerlingen materialen kunnen uitwisselen. Deze omgeving is Eurekos het Deense bedrijf Mentorix. Een nieuw systeem waar de UT een licentie op heeft en sinds 2017 mee geëxperimenteerd wordt. Het is een online leeromgeving met vergelijkbare functionaliteiten als Blackboard en Canvas, de focus ligt alleen sterker op blended learning. Eurekos wordt onder andere ingezet voor Professional Learning & Development (PLD) de executive education voor hoogopgeleide professionals en managers aan de Universiteit Twente. Ook bij deze vorm van onderwijs wordt er gebruik gemaakt van blended learning. Naar aanleiding van gesprekken met TELT (zie: paragraaf 1.1.3) is er voor gekozen om ook voor deze blended learning masterclasses van Pre-U, gebruik van te maken van Eurekos.

In de leeromgeving van Eurekos is het mogelijk om lespagina's aan te maken en deze stapsgewijs aan te bieden, in dit geval in opeenvolgende lesweken. Binnen de omgeving is het mogelijk om individuele, groeps- en peer feedback opdrachten aan te maken. Daarnaast beschikt het ook over verschillende mogelijkheden tot interactie. Er is groepspagina met een forum, iedere lespagina heeft een aparte discussiebalk en er is een functionaliteit die eenvoudig webconferenties mogelijk maakt.

### 2.1.5 Micro lectures

Omdat een groot gedeelte van de masterclass online zal plaats vinden is het plan ontstaan om het online lesmateriaal van 'micro lectures' te voorzien. Korte lesvideo's van een paar minuten waarin een onderwerp door een docent wordt uitgelegd. Tijdens de online weken zijn er geen klassikale bijeenkomsten, daarbij mist er de ervaring van een docent die de stof (nog eens) uitlegt of vragen beantwoord. Om toch gesproken uitleg te geven kunnen micro lectures een uitkomst bieden.

Het kijken naar gesproken uitleg, al dan niet vooraf opgenomen, is een andere werkvorm dan tekst lezen en draagt daarom bij aan de afwisseling binnen de masterclass. In sommige gevallen hebben de leerlingen de keuze op welke wijze ze informatie tot zich nemen, via een video of via tekst. In andere gevallen vullen de tekst en video's elkaar aan. Verder heeft video andere mogelijkheden om de uitleg visueel te ondersteunen. Denk hierbij aan animaties, gebruik van slides, of het stap voor stap uitschrijven van de stof. Het voordeel van opgenomen video's is dat de leerling in de eigen tijd deze kan bekijken en al naar gelang vaker kan afspelen, pauzeren en terugspoelen. Bij video's die vooraf opgenomen zijn is het echter niet mogelijk om direct aan de docent vragen te stellen. De discussiebalk aan de zijkant van het scherm of het forum kan deze kwestie ondervangen. Bovendien zijn de vragen en antwoorden dan voor alle leerlingen ook terug te lezen. Ook zou een vast gezicht in de micro lectures kunnen bijdragen aan de continuïteit tussen de lesweken en zorgt het voor een professionelere uitstraling. In samenwerking met TELT zijn er voorbereidingen getroffen om in de studio dergelijke video's op te nemen. Ook voor de masterclass 'Ondernemerschap' zullen micro lectures worden ingezet.

### 2.1.6 Tijdpad

De data voor de start- en slotbijeenkomst zijn al door Pre-U vastgelegd. In eerste instantie was de startbijeenkomst op 9 februari 2018 en de slotbijeenkomst op 16 maart, tegelijkertijd met de Open Dagen van de Universiteit Twente. Dit is bewust gekozen om ze meer kennismaking met de UT te bevorderen. Vanwege tegenvallende aanmeldcijfers is startbijeenkomst zes weken opgeschoven om zo meer tijd voor aanmeldingen te houden. Hierdoor valt nu de startbijeenkomst tegelijkertijd met de Open Dagen. Dit zorgt niet voor een inhoudelijke eis aan de masterclass maar brengt wel een eis voor het ontwerpproces met zich mee. Voor aanvang van de startbijeenkomst op 16 maart 2018 moet het lesmateriaal opgeleverd zijn.

## 2.2 Didactische randvoorwaarden

Naast de randvoorwaarden die komen vanuit Pre-U en de organisatie rondom de masterclass, is het ook van belang om vanuit didactische oogpunt na te denken over de invulling van de masterclass. In dit geval gebeurt dat vanuit twee invalshoeken; de inhoud en de vorm. Voor de inhoud staat het onderwerp quantummechanica centraal en in het bijzonder het aanleren van dit onderwerp. Blended learning is de vorm waarin de masterclass wordt aangeboden en de literatuur biedt ook hier enige inzichten bij het hanteren van deze onderwijsvorm.

### 2.2.1 Quantummechanica

Richard Feynman schreef ooit de bekende zin “I think I can safely say that nobody understands quantum” (Feynman, 1965, p.147). Dit om aan te geven dat quantummechanica geen eenvoudig onderwerp is, en er goed rekening gehouden moet worden om dit onderwerp aan te leren aan leerlingen in 5/6 vwo, die weinig tot geen voorkennis hebben. Verder moet opgemerkt worden dat quantummechanica op zichzelf een zeer breed onderwerp is, waaronder vele deelonderwerpen vallen. Afhankelijk van de diepgang is het al mogelijk om per deelonderwerp, er meerdere lesweken of zelfs hele studies aan te weiden. Gezien de beschikbare tijd van zes sessies, is ‘de quantummechanica’ een te omvangsomrijk en algemeen onderwerp om te behandelen in dit tijdsbestek. Hierdoor zullen er dus keuzes gemaakt moeten welke onderwerpen centraal komen te staan in de masterclass. Door te kiezen voor deelonderwerp kan de stof voor leerlingen behapbaar gemaakt worden.

Krijtenburg-Lewerissa e.a. (2017) hebben onderzoek gedaan naar het onderwijzen van quantummechanica op vo- en bachelorniveau. Door te richten op visualisatie en conceptueel begrip is het mogelijk om quantummechanica op een jongere leeftijd te introduceren bij leerlingen. In tegenstelling tot de complexe wiskunde die nodig is om quantummechanica volledig te beschrijven. Desondanks blijft het een moeilijk onderwerp om aan te leren. Dit omdat op quantumniveau de natuur zich zo fundamenteel anders gedraagt dan de fysieke wereld om ons heen. Het wereldbeeld dat leerlingen bevatten is hoofdzakelijk ‘klassiek’, gebaseerd op onderwijs dat ze tot dan toe gehad hebben, samen met eigen ervaring door interactie met die ‘klassieke’ wereld. Dit zorgt ervoor dat quantummechanica intuïtief moeilijk te begrijpen is en een radicale verandering in het denkbeeld nodig is. De reviewstudie richt zich op misconcepten en moeilijkheden bij studenten, onderzoeksinstrumenten om begrip bij leerlingen te testen en onderwijsstrategieën om het begrip te vergroten. Hierin komt naar voren dat leerlingen toch klassieke verklaringen geven aan quantumverschijnselen, gecombineerde klassiek-quantum verklaringen of quasiquantum beschrijvingen geven. Het overzicht van de bekende moeilijkheden en valkuilen komt van pas bij de ontwerpfase. Vanwege de moeilijkheid is er een aannemelijke kans dat de leerlingen die deelnemen aan de masterclass ook dergelijke moeilijkheden of valkuilen zullen ondervinden. Verder worden er ook enkele multimedia-applicaties genoemd, die kunnen van toepassing komen in het lesmateriaal van de masterclass.

Een interessante toevoeging wordt geleverd door Johansson (2018). Hij stelt dat quantummechanica een intrigerend onderwerp is en dat zelfs een inspiratie kan zijn om natuurkunde te gaan studeren. Echter, als bij aanvang van deze studie dit onderwerp zeer ‘droog’ wordt onderwezen met een voornamelijk mathematische benadering verdwijnt het aanvankelijke enthousiasme voor dit onderwerp. Dat enthousiasme een belangrijke factor is om tot leren te komen, en bijdraagt aan de motivatie van leerlingen is hier een belangrijk gegeven. Dit geeft een extra reden om het introduceren quantummechanica niet zuiver vanuit een wiskundige invalshoek te benaderen. Door het gebruiken van voorbeelden en toepassingen ondervang je dat lessen uit droge wiskunde bestaan.

#### Quantumwereld

Quantumwereld is sinds 2013 een nieuw onderdeel in het examenprogramma, voor zowel het centraal- als het schoolexamen (Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, 2010). Een aanleiding voor een herziening van het natuurkundecurriculum, is het versterken van bètakennis en -vaardigheden van jongeren ter bevordering van de doorstroming naar bèta-technische studies en beroepen. Daarnaast zorgt het voor meer aansluiting bij het bèta-onderwijs op internationaal niveau. Naast Quantumwereld zijn er nog enkele andere onderwerpen toegevoegd aan de het curriculum, waaronder de keuze-modules relativiteitstheorie, biofysica en geofysica.

De syllabus natuurkunde vwo voor het centraal Examen 2018 geeft de volgende eindterm door het subdomein Quantumwereld:

### Subdomein F1: Quantumwereld

26. De kandidaat kan in contexten de golf-deeltjedualiteit en de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg toepassen, en de quantisatie van energieniveaus in enkele voorbeelden verklaren aan de hand van een eenvoudig quantumfysisch model. (College voor Toetsen en Examens vwo, havo, vmbo, [2016](#))

Hieruit blijkt dat genoemde eindtermen slechts een beperkt onderdeel van de quantummechanica beschrijven en dat een verscheidenheid aan onderwerpen niet verplicht is het voor het examen. Enkele voorbeelden van dergelijke onderwerpen zijn; quantum-tunneling, superpositie, spin en verstrengeling. Dit geeft aan dat er voor leerlingen extra ruimte is om te verdiepen in quantummechanica. Dit kan tevens bijdragen aan bredere begripsvorming omtrent dit onderwerp bij leerlingen, waarin de genoemde eindtermen verankerd kunnen worden in een bredere context.

Het hoofdstuk Quantumwereld komt bij veel scholen aanbod in het eerste semester van 6 vwo. Dit heeft tot gevolg dat er voor de deelnemers aan de masterclass een relatief groot verschil in voorkennis kan optreden. Leerlingen in 5 vwo die het onderwerp nog niet gehad hebben, tegenover leerlingen in 6 vwo die het onderwerp al wel behandeld hebben. Bij de genoemde voorkennis kan de kanttekening geplaatst worden, dat ook onder leerlingen in vwo 6 de voorkennis verschillen met zich mee kan brengen. De leerlingen komen van verschillende scholen, waar ze les hebben gehad van verschillende docenten, met verschillende (les)methodes. Een blik op de hoofdstukken Quantumwereld van verschillende lesmethodes voor natuurkunde in vwo-6 laat zien dat het onderwerp op verschillende wijzen wordt aangepakt. Zo verschilt het in welke volgorde onderwerpen worden aangeboden, de voorbeelden die gebruikt worden en de mate van wiskundige benadering. Deze verschillen in voorkennis vanuit de lesmethodes en lessen nemen leerlingen uit 6 vwo mee naar de masterclass. De volgende lesmethodes voor vwo 6 zijn met elkaar vergeleken: Stevin (Biezeveld, Mathot, & Brouwer, [2014](#)), Systematische Natuurkunde (Dalen e.a., [2015](#)), Newton (Flokstra e.a., [2015](#)) en Overal Natuurkunde (Sonneveld e.a., [2014](#)).

Het artikel van Koopman ([2018](#)) is een bespreking van de quantumopgaven in het vwo-examen natuurkunde van 2018. Hierin komt naar voren dat quantumwereld een moeilijk onderwerp blijft in de examens, niet alleen voor de leerlingen maar in dit geval ook in het opstellen van fysisch correcte opgaves. In acht nemend dat er meerdere efficiëntie- en opfriscursussen voor docenten zijn over dit onderwerp, is dit ook een indicatie dat het onderdeel Quantumwereld een moeilijk hoofdstuk is voor docenten om te onderwijzen. Op basis van de verschillen in voorkennis en aanwijzingen dat de Quantumwereld een lastig onderwerp is om (aan) te leren, moet er goed nagedacht worden over de te behandelen onderwerpen tijdens de masterclass.

### Quantummechanica en het constructivisme

Het is duidelijk dat quantummechanica een lastig onderwerp is. Een verklaring hiervoor kan ook gevonden worden in het constructivisme. In hun boek beschrijven van der Veen en van der Wal ([2012](#)) het constructivisme van Piaget aan de hand van de definitie voor leren die Shuel geeft. “Leren is een actief, constructief, cumulatief, zelfregulerend en doelgericht proces waarin de lerende zelf de regie voert.” Met name het constructief en cumulatief proces bieden hier een interessante inkijk. Waarbij het gaat hoe nieuwe kennis wordt ingebed in bestaande kennisstructuur.

De wereld van quantummechanica is voor de meeste leerlingen compleet nieuw. Leerlingen in 5 vwo hebben het onderwerp nog niet eerder behandeld, bij leerlingen in 6 vwo is het pas dit schooljaar aan bod gekomen en hebben ze nog niet veel tijd gehad om er ervaring mee op te doen. Ervaring die belangrijk is voor de assimilatie en accommodatie van nieuwe kennis. Waarbij bij assimilatie de nieuwe kennis gekoppeld wordt aan de reeds bestaande cognitieve structuur. Bij accommodatie zal de cognitieve structuur eerst moeten worden aangepast, alvorens nieuwe kennis kan worden opgenomen. Quantummechanica kent meerdere concepten die in de klassieke wereld niet mogelijk zijn, bijvoorbeeld superpositie en tunneling. Deze concepten zijn volledig nieuw en passen niet in het beeld dat een leerling van de wereld om ons heen heeft. Om deze nieuwe kennis op te nemen zal reeds bestaande cognitieve structuur moeten worden aangepast.

Aan de hand van deze beschrijving is het wenselijk om concepten uit de quantummechanica op een dermate wijze aan te bieden, zodat de leerling hier makkelijker betekenis aan kan verlenen. Denk hierbij aan het werken met voorbeelden, vergelijkingen, aangeven van duidelijke toepassingen en werkvormen gebruiken waarin leerlingen zelf moeten ervaren en ontdekken. Dat laatste vormt in het kader van blended learning, waarin de leerling veel op afstand doet, een extra uitdaging voor het ontwerpproces.

## 2.2.2 Blended Learning

Een greep uit verschillende artikelen doet al snel leren dat er uiteenlopende definities van de blended learning bestaan. Daarom is het belangrijk om vast te stellen wat er onder deze term, in het kader van dit ontwerp verstaan wordt. Blended Learning is een term die al sinds 1999 bestaat en sindsdien heeft de term meerdere betekenissen gekend (Friesen, 2012). Ook is sprake geweest dat het een *buzzword* zou zijn maar die status lijkt nu wel afgedaan en is blended learning een gevestigde onderwijsvorm. De meest gebruikte definities richten zich op de combinatie van online en offline onderwijs. De term wordt echter breder gebruikt. Zo vind Driscoll (2002) de volgende uiteenlopende hantering van blended learning:

1. Combining or mixing web-based technology to accomplish an educational goal.
2. Combining pedagogical approaches ('e.g. constructivism, behaviorism, cognitivism') to produce an optimal learning outcome with or without instructional technology.
3. Combining any form of instructional technology with face-to-face instructor-led training.
4. Combining instructional technology with actual job tasks.

Hieruit is af te leiden dat blended learning, meer is dan alleen de combinatie van online en offline onderwijs. Een andere interessante kijk wordt door Oliver en Trigwell (2005) geleverd. Zij stellen dat de term 'Blended Learning' verkeerd gekozen is en of de term nog ingewisseld kan worden. Zo is niet het leren zelf 'blended' maar de wijze waarop de onderwijs wordt aangeboden. Het artikel komt uit een periode dat de term minder vaststaat dan nu, toch is het een artikel dat nog steeds veel geciteerd wordt.

De meningen over blended learning zijn dus verdeeld. Op basis van een studie naar verschillende definities kwam Friesen (2012) met een nieuwe definitie van blended learning: "Blended learning designates the range of possibilities presented by combining Internet and digital media with established classroom forms that require the physical co-presence of teacher and students." Daarbij wordt er ook nog een beslissingsboom toegevoegd om vast te stellen of de cursus onder de gestelde definitie valt. Het initiële plan van Pre-U voor blended masterclasses, volgens de eerder gestelde randvoorwaarden, voldoet aan deze definitie van Friesen. In dit geval is er sprake van het 'Rotation Model' "in which online engagement is combined or rather, embedded, within a range of face-to-face forms of instruction in a cyclical manner."

### Four key Challenges

Om een aanknopingspunt te vinden in de omvangrijke literatuur over blended learning is er gekozen voor een review-artikel dat een meta-analyse maakt van verschillende onderzoeken gericht op blended learning. Op basis van geselecteerde literatuur stelt Boelens e.a. (2017) vier *key challenges* vast voor het ontwerpen van blended learning:

1. Hoe wordt flexibiliteit verwerkt?
2. Hoe wordt interactie bevorderd?
3. Hoe wordt het leerproces van de leerling ondersteund?
4. Hoe wordt een affectief leerklimaat gestimuleerd? (bijv. motivatie en waardering)

Hieronder zullen de vier *key challenges* van Boelens verder worden toegelicht:.

#### 1. Hoe wordt flexibiliteit verwerkt?

De combinatie van klassikaal onderwijs en online instructie zorgt voor meer flexibiliteit voor de leerlingen. De leerlingen hebben in meer of mindere mate, invloed op de tijd, plaats, pad of snelheid van hun leren. Ze kunnen kiezen waar of wanneer ze met lesmateriaal de slag gaan. Tevens kan het mogelijk zijn dat de leerling zelf bepaald welke onderwerpen behandeld worden en/of hoe lang hier aan besteed wordt.

#### 2. Hoe wordt interactie bevorderd?

Door de verhoogde mate van flexibiliteit zal de manier van interactie veranderen. De vergrote afstand tussen leerlingen onderling en de docent, maakt sociale interactie moeilijker. Het is voor een docent lastiger op te merken wanneer een leerling vastloopt of problemen ondervindt. Leerlingen vinden geboden flexibiliteit van blended learning prettig, maar willen geen afstand nemen van de sociale interactie en 'human touch' die ze gewend zijn uit een klassikale omgeving.

#### 3. Hoe wordt het leerproces van de leerling ondersteund?

De verhoogde mate van flexibiliteit zorgt er ook voor dat de zelfregulatie bij leerlingen belangrijker wordt. Hier gaat het om onder andere om discipline, organisatie en tijdmanagement. Voor een leerling die goed presteert, of

over de juiste zelfregulerende vaardigheden beschikt, kan blended learning goed werken. Echter een leerling die minder over deze vaardigheden beschikt, zal waarschijnlijk meer moeite hebben met blended learning en heeft daarom meer ondersteuning nodig. Het ondersteunen van het leerproces kan door middel van oriënteren en plannen, monitoren, aanpassen en evalueren.

#### 4. Hoe wordt een affectief leerklimaat gestimuleerd?

Door de vergrote afstand wordt een online omgeving minder spontaan als directe interactie ervaren. Hierdoor kan een leerling zich geïsoleerd voelen, wat een tot gebrek aan motivatie en zelfs uitval als gevolg kan hebben. Daarom is belangrijk dat er een veilig en stimulerend leerklimaat geschapt wordt, waarin de leerling graag wil leren. Hier is een grote rol voor de docent weggelegd, door bijvoorbeeld te motiveren en complimenten uit te delen.

Deze vier key challenges van Boelens bieden houvast bij het ontwerpproces, en het is daarom belangrijk dat deze terugkomen in het uiteindelijke ontwerp.

## 2.3 Eisen aan ontwerp

Op basis van de analyse in dit hoofdstuk kunnen de eisen aan de masterclass als volgt worden samengevat:

1. Past in het huidige masterclassaanbod; verdiepend lesprogramma en kennismaking met de UT.
2. Globale structuur van een startbijeenkomst, vier online sessies en een slotbijeenkomst
3. Volgt de voorgestelde weekstructuur, met een tijdsbesteding van 4 uur per leerling per week.
4. Aansluiten bij de voorkennis van leerlingen uit vwo-6, onderlinge verschillen in acht nemend.
5. Ook zonder deze voorkennis kunnen leerlingen uit vwo-5 ook aansluiten.
6. Het lesmateriaal wordt opgenomen in de online leeromgeving Eureka.
7. Het lesmateriaal wordt voorzien van micro lectures.
8. Quantummechanica inkaderen met een deelonderwerp.
9. Minimale wiskundige benadering, een conceptuele aanpak met voorbeelden en toepassingen.
10. Blended learning; klassikaal en digitaal onderwijs worden gecombineerd, actieve rol voor docent.
11. De vier key-challenges van Boelens e.a. (2017) komen terug in het ontwerp:
  - a) flexibiliteit verwerken
  - b) interactie bevorderen
  - c) leerproces ondersteunen
  - d) affectief leerklimaat stimuleren
12. Het lesmateriaal moet voor aanvang van de masterclass op 16 maart 2018 worden opgeleverd.

In het volgende hoofdstuk, zal aan de hand van deze eisen het tot stand gekomen ontwerp worden gepresenteerd en toegelicht.



# Ontwerp Masterclass

In dit hoofdstuk zal het ontwerp van de blended learning masterclass gepresenteerd worden. Hierbij zal eerst de keuze voor het deelonderwerp verder worden uitgelegd. Vervolgens wordt er ingegaan op de algemene structuur van de masterclass, daarna zullen de individuele lesweken worden behandeld.

## 3.1 Vaststellen deelonderwerp

In het vooronderzoek kwam naar voren dat quantummechanica op zichzelf een erg breed onderwerp is om aan te bieden. Het kiezen van een deelonderwerp maakt het voor leerlingen behapbaar. Verder is er ook de wens voor een minimale wiskundige benadering. De aanpak moet vooral gericht zijn op de concepten van quantummechanica, geïllustreerd met voorbeelden en toepassingen. Ook de speelt de voorkennis een rol, voor zowel leerlingen uit 5 vwo, als uit 6 vwo moet het onderwerp goed te volgen zijn. En bij voorbaat een onderwerp dat niet in 6 vwo aanbod komt. Dit draagt tevens bij aan het doel van verdiepende onderwerpen waar masterclasses bij Pre-U voor staan.

Op basis van deze randvoorwaarden is 'De Quantumcomputer' gekozen als deelonderwerp van deze blended learning masterclass. Dit onderwerp voldoet aan bovenstaande gestelde eisen. Daarnaast is de ontwikkeling van de quantumcomputer een onderwerp dat steeds vaker in de media naar voren komt. Ondanks dat een volledige quantumcomputer nog niet gerealiseerd is, de verwachting is dat dit de komende jaren wel zal gebeuren en dit kan verstrekkende gevolgen met zich meebrengen. Hierdoor kan van het belang zijn dat leerlingen leren wat een quantumcomputer is en wat ze in de toekomst kunnen verwachten. In verschillende media is al veel te vinden over quantumcomputers. er enige *hype* over dit onderwerp, deze kan nogal verschillende met de daadwerkelijke stand van zaken van het technologisch onderzoek (Biercuk, 2017) Het verschil hiertussen is niet altijd even duidelijk en de masterclass stelt zich al de doel om leerlingen hier te informeren wat een quantumcomputer echt is. Een de andere reden om voor dit onderwerp te kiezen, is IBM-Q. Een online quantumcomputer van IBM in de cloud en open voor het publiek om mee te experimenteren. In paragraaf 3.3.4 zal hier verder over uitgeweid worden.

## 3.2 Ontwerp algemeen

Nu het onderwerp van de masterclass is vastgesteld zal het ontwerp verder worden toegelicht. Voordat de individuele lesweken besproken worden zal eerste het algemene ontwerp worden behandeld. Hierin komen zaken aan bod die over de hele looptijd van de masterclass van belang zijn. Eerste zullen de algemene leerdoelen uiteengezet worden. Daarna zal de globale structuur worden toegelicht met de verschillende onderwerpen per week, en daarnaast de weekstructuur volgens iedere lesweek opgebouwd is. Ook zal de keuze voor online lesvideo's worden toegelicht.

### 3.2.1 Leerdoelen

Het doel van de masterclass is om leerlingen uit 5 en 6 vwo een introductie te geven in quantummechanica en in het bijzonder de quantumcomputer. Hierbij gaat zowel om een natuurkundig inzicht in concepten van quantummechanica als ook de werking en toepassing van een quantumcomputer. Op basis hiervan zijn er voor deze masterclass de volgende leerdoelen opgesteld.



## Leerdoelen Algemeen

De leerling...

- kent de natuurkundige concepten die aan een quantumcomputer ten grondslag liggen; spin, superpositie en verstrengeling en kan deze in eigen woorden uitleggen.
- weet de verschillen tussen een klassieke computer en quantumcomputer en kan deze ook aangeven.
- weet hoe een quantumcomputer door middel van quantumlogische poorten informatie verwerkt en kan dit demonstreren aan de hand van IBM-Q.
- kan aan de hand van een voorbeeld de toepassing van de quantumcomputer toelichten.
- kan de bevindingen uit de masterclass vertalen naar een wetenschappelijke poster en deze presenteren.

### 3.2.2 Invulling globale structuur

Vanuit Pre-U stond er al een globale structuur vast; vier online lesweken omsloten door een fysieke start- en slotbijeenkomst op locatie. Nu het deelonderwerp van de masterclass bekend is, kan er ook invulling worden gegeven aan de individuele lesweken. Deze is als volgt en wordt hieronder verder toegelicht.

1. Startbijeenkomst
2. Lesweek 2: Inhoudelijke Verdieping
3. Lesweek 3: Hardware van een Quantumcomputer
4. Lesweek 4: Rekenen met Quantumcomputer
5. Lesweek 5: Toepassingen en Toekomst
6. Slotbijeenkomst

Tijdens de startbijeenkomst wordt er kennis gemaakt, samen met een inleiding over quantummechanica en de masterclass. Gedurende de vier online lesweken worden verschillende onderwerpen van de quantumcomputer verder uitgewerkt. Dit begint bij een inhoudelijke verdieping als benodigde basiskennis, daarna volgt de hardware en software van de quantumcomputer en in de laatste week wordt er afgesloten met de mogelijke toepassingen en een toekomstbeeld. Iedere week zijn er bij het lesmateriaal enkele opdrachten waar de leerlingen aan werken. Naast deze wekelijkse opdrachten wordt er ook gewerkt aan een eindopdracht; een wetenschappelijke poster waarin de leerlingen hun bevindingen van de afgelopen vier lesweken samenvatten. Deze posters worden tijdens de slotbijeenkomst gepresenteerd. Door het opzetten van een eindopdracht wordt de masterclass voorzien van een einddoel waar de leerlingen naar toe werken. Het afronden van de eindopdracht is een duidelijke afsluiting van masterclass. De weekopdrachten zorgen ervoor dat de leerlingen met de stof kunnen oefenen, daarnaast kan de docent vaststellen of de leerdoelen behaald zijn aan de hand van de opdrachten. Verder dienen de weekopdrachten ook als input dit gebruikt kunnen worden om de eindopdracht uit te voeren.

### 3.2.3 Weekstructuur

Buiten de start- en slotbijeenkomst is er voor gekozen om voor online lesweken een vaste weekstructuur aan te bieden. Dit biedt voor zowel de leerling als de docent overzicht. Op maandagochtend komt het lesmateriaal voor die week online, hierin staat alle informatie die voor deze week nodig is. Dit zijn teksten met uitleg, lesvideo's, uitleg over de opdrachten en algemene mededelingen. De leerlingen hebben dan tot woensdagavond om aan de weekopdrachten en de posteropdracht te werken. Dit gebeurt in eerste instantie zelfstandig, de docent en medestudenten zijn bereikbaar via Eurekos. Als de opdrachten zijn ingeleverd beoordelen de leerlingen elkaars werk via peer feedback. Deze feedback wordt op de vrijdagmiddag ingeleverd. Door middel van peer feedback ontstaat er de mogelijkheid dat leerlingen van elkaar kunnen leren, wanneer zij het elkaars werk met elkaar vergelijken. Tevens is er via de peer feedback een vorm van interactie, waardoor de leerlingen niet enkel zelfstandig aan de masterclass werken. Dit draagt ook bij aan de key challenges van Boelens. Na de peer feedback van de leerlingen kijkt de docent ook naar de opdrachten en kan algemene of specifieke feedback leveren. In figuur 3.1 staat een schematisch overzicht van de globale weekstructuur. Per week staat er een tijdsbesteding van vier uur gepland. Daarbij is het idee dat er ongeveer drie uur aan het lezen van het materiaal en de week- en posteropdracht besteed wordt, voor de peer feedback is ongeveer een uur tijd ingepland. Wanneer de leerlingen werken aan de masterclass werken staat vrij, zolang ze zich aan de deadlines houden.





**Figuur 3.1.** Schematisch overzicht van de globale weekstructuur.

### 3.2.4 Micro lectures

Aanvankelijk was het plan om naast het geschreven lesmateriaal ook zelf lesvideo's, micro lectures, op te nemen, waarin steeds in enkele minuten verschillende onderwerpen uit de masterclass worden toegelicht. Echter in de tijdsplanning bleek het niet haalbaar om deze video's op te nemen. Het schrijven van een script en het maken van opnames in de studio is een tijdrovende bezigheid, waar niet voldoende tijd voor was.

Om toch te tegemoet te komen aan de eis het verwerken van micro lectures, is er een oplossing gevonden met reeds beschikbare video's. Het internet, en met name YouTube, biedt een rijke bron aan video-lesmateriaal. Op verschillende kanalen zijn gepassioneerde videomakers te vinden, die uitleg geven over de meest uiteenlopende onderwerpen en ook quantumcomputing is hier een van. Daarbij zijn veel van deze video's ook nog uitgebreid geanimeerd, die op deze wijze extra overzicht en uitleg bieden. Dergelijke animaties zouden ook niet haalbaar geweest zijn voor de eigen video's. Hierdoor is er voor gekozen om een selectie van deze video's te verwerken in de masterclass. Op verschillende lespagina's zijn lesvideo's van YouTube te vinden, in de rest van het ontwerp zullen deze video's kort worden toegelicht en naar verwezen worden. Naast het verwerken van deze reeds beschikbare lesvideo's, zijn er in samenwerking met een student uit het UT-honoursprogramma ook nog twee eigen lesvideo's ontwikkeld, ook deze worden later verder toegelicht.

## 3.3 Individuele lesweken

Het hoofdbestandsdeel van de masterclass bestaat uit de lesmaterialen voor de verschillende lesweken en zullen in deze sectie worden gepresenteerd. De start- en slotbijeenkomst vinden plaats op de Universiteit Twente, en worden ondersteund met een PowerPoint-presentatie. De online lesweken 2 tot en met 5 zijn opgenomen in de online leeromgeving Eurekos.

In een reguliere masterclass bestaat de les uit een bijeenkomst met aansluitend huiswerk. In het geval de blended masterclasses wordt een deel van bijeenkomsten vervangen door online lesweken. Deze lesweken houden echter tot op zekere hoogte de structuur van een masterclassbijeenkomst, of een les in het algemeen aan. Alonso, López, Manrique, en Viñes (2005) beschrijven het belang van een heldere structuur in e-learning, mede omdat de student veel zelfstandig moet doen. In de online leeromgeving moet de structuur van de masterclass ook duidelijk naar voren komen. De masterclass in Eurekos begint met een startpagina met algemene uitleg, via hier kan naar de verschillende lesweken genavigeerd worden. Iedere lesweek bestaat tevens uit een startpagina met een korte introductie van de week, de bijbehorende leerdoelen en mededelingen. Van daaruit kan er doorgelinkt worden naar de subpagina's met uitleg. Per deelonderwerp is er een nieuwe subpagina aangemaakt om zo de hoeveelheid informatie per pagina behapbaar te houden en duidelijk te scheiden. Op de afsluitende pagina staat een uitleg van de opdrachten en links naar de opdrachtenpagina waar het werk ingeleverd kan worden.

De structuur van de online leeromgeving is in deze sectie grotendeels aangehouden. Bestaande uit de achtereenvolgende lesweken voorzien van een omschrijving en de leerdoelen. De dikke gedrukte tussenkopjes komen overeen met de lespagina's met uitleg, of in het geval de bijeenkomsten, de lesonderdelen. Gezien de omvang van het lesmateriaal zijn slechts enkele lespagina's zijn ter illustratie opgenomen in bijlage A. De masterclass is grotendeels een online leerervaring waarbij navigatie door verschillende webpagina's een grote rol speelt. Dergelijke webpagina's laten zich moeilijk vertalen naar gedrukte vorm. Zodoende is er een offline uittreksel

van de website samengesteld. Dit bestand is te openen via een internetbrowser en kan bij de auteur worden aangevraagd.

### 3.3.1 Startbijeenkomst

De startbijeenkomst is de aanvang van de blended learning masterclass over de quantumcomputer. De leerlingen maken kennis met de docent en elkaar, ze brainstormen wat ze al over het onderwerp weten en krijgen een korte inleiding over quantummechanica. Daarnaast zal ook de organisatie van de masterclass besproken worden.

#### Leerdoelen Startbijeenkomst

De leerling ...

- is bekend met de opzet van de masterclass en weet wat er van hem of haar verwacht wordt.
- is zich bewust van de eigen voorkennis over het onderwerp quantumwereld.
- kan de voorkennis structureren aan de hand van een mindmap.
- kan in simpele bewoording uitleggen dat de quantumwereld zich anders gedraagt dan de macrowereld.

#### Kennismaking

Boelens e.a. (2017) geeft het belang aan van onderlinge samenwerking bij de leerlingen als uitdaging om bij Blended Learning tot succesvol leren te komen. Zodoende wordt er tijdens de startbijeenkomst ruim de tijd genomen om kennis te maken. Aan de hand van verschillende kennismakingsspelletjes leren de leerlingen elkaars naam kennen, daarnaast wordt ook gezocht naar verschillende overeenkomsten tussen de leerlingen opdat dit ook meer een band zal vormen. Het idee achter deze kennismaking is dat na afloop van de startbijeenkomst de leerlingen geen vreemden meer voor elkaar zijn. Vanaf dat moment zullen ze vooral digitaal met elkaar contact hebben en elkaars werk beoordelen. Door dat de leerlingen elkaar nu hopelijk beter kennen is verwachting dat zij online ook makkelijker contact zullen leggen, elkaar helpen met vragen en onderling feedback geven.

#### Poster Brainstorm

Deze masterclass is voor zowel leerlingen uit 5 als 6 vwo. Dat maakt dat er een verschil in voorkennis is, daarnaast komen de leerlingen van verschillende scholen wat ook voor een verschil in (voor)kennis kan zorgen. Om een idee te krijgen wat de leerlingen bij aanvang van de masterclass al weten over quantumwereld en de quantumcomputer, gaan de leerlingen brainstormen en kunnen ze aan de hand van een mindmap hun voorkennis structureren. Deze poster zullen vervolgens besproken en vergeleken worden.

#### Inleiding Quantummechanica

Tijdens deze inleiding wordt aan de hand van bekende experimenten een overzicht gegeven wat quantumfysica globaal inhoudt. Zo wordt er onder andere stil gestaan bij het foto-elektrisch effect, tweespletenexperiment, golf-deeltje-dualiteit, Schrödingers kat, tunneling en energieniveaus.

Het belangrijkste van deze inleiding is dat de leerling een idee krijgt wat quantummechanica inhoudt, de schaal waarop dit zich afspeelt en de verschillen met de macro-wereld. De leerling hoeft niet in staat te zijn deze experimenten uitvoerig te beschrijven. Het is met name gericht om leerlingen enthousiast te maken voor de quantummechanica en aangeven dat het een onderdeel van de natuurkunde is waar ongebruikelijke fenomenen plaats vinden die je kan toepassen voor nieuwe doeleinden, waar de quantumcomputer een voorbeeld van is.

#### Uitleg Masterclass

Na de inhoudelijke uitleg wordt de verdere organisatie van de masterclass behandeld. Er wordt een overzicht gegeven van de te komen lesweken en wat er van de leerlingen verwacht wordt. De weekopdrachten en posterpresentatie worden besproken. Ook wordt er aandacht besteed aan de peer-feedback opdrachten, zo wordt besproken hoe de leerlingen elkaar van opbouwende feedback kunnen voorzien. Ook is er een beknopte doorloop van de online leeromgeving die aangeeft waar men de online lessen en opdrachten kan vinden en inleveren. Afsluitend ontvangen de leerlingen een envelop die ze pas in de volgende lesweek mogen openen.

### 3.3.2 Lesweek 2: Inhoudelijke Verdieping

Na de gezamenlijke startbijeenkomst beginnen de leerlingen hun eerste online lesweek met een inhoudelijke verdieping. Hierin worden de belangrijkste concepten die ten grondslag liggen aan een quantumcomputer uitgelegd. Daarbij is er voor gekozen om tijdens deze masterclass vooral te richten op spin, superpositie en verstrengeling. Dit zijn fundamentele concepten uit quantummechanica. Ze illustreren duidelijk hoe quantumwereld verschilt van de macrowereld en zijn belangrijk in de realisatie van een quantumcomputer. Deze concepten worden geïllustreerd door twee experimenten; het Stern-Gerlach-experiment en het polarisatie-experiment. Naast de uitleg zijn er enkele opdrachten waarin de stof verder onderzocht en verwerkt kan worden.

#### Leerdoelen Lesweek 2

De leerling ...

- raakt bekend met de begrippen spin, superpositie en verstrengeling en kan deze in eigen woorden uitleggen.
- kan aan de hand van een applet uitleggen wat het Stern-Gerlach experiment inhoudt en hoe het aangeeft dat spin gekwantificeerd is.
- leert wat de polarisatie van licht is en kan aan de hand van het polarisatie-experiment de eigenschappen van de quantumtoestanden illustreren.
- kan de lesinhoud van lesweek 2 vertalen naar een sectie op de poster voor de eindopdracht.

#### Spin, Superpositie en Verstrengeling

In de komende lesweken zal de quantumcomputer voornamelijk worden uitgelegd aan de hand van een qubit. Om de mogelijkheden van een qubit te kunnen verklaren moet men bekend zijn met de concepten van spin, superpositie en verstrengeling. Andere inhoudelijke onderwerpen voor een quantumcomputer, zoals decoherentie, zijn ook belangrijk maar zijn te veel voor deze masterclass en worden slechts kort aangestipt of niet behandeld.

Voor spin wordt er aangegeven dat dit een intrinsieke eigenschap is, net als massa en lading. Ook de achtergrond van spin, het spin-impulsmoment wordt uitgelegd. Waarbij het belangrijk is dat een deeltje, zoals een elektron, niet fysiek rondspint, maar deze eigenschap van nature heeft. Verder komen er twee vormen van spin vaak voor: *spin up* en *spin down*. Voor superpositie draait het erom dat eigenschappen van deeltjes meerdere waarden tegelijkertijd kunnen hebben, bijvoorbeeld een deeltje dat zich op twee plaatsen bevindt en dit in de quantummechanica niet vreemd is. Pas als na een meting zal 'kiest' het deeltje een plaats en tot die tijd is het onzeker. Om superpositie te illustreren wordt ook gebruik gemaakt van een animatie van 'Quantum Made Simple' (Physics Reimagined, 2018a).

Bij verstrengeling komen de spin en superpositie van deeltjes samen. Verstrengelde deeltjes delen hun informatie waardoor het niet mogelijk is om de deeltjes los van elkaar te zien. En dat de toestand van deeltje niet afzonderlijk beschreven kan worden zonder de ander. Wanneer bij een verstrengeld deeltjespaar de spin van één deeltje vastgesteld wordt, weet men automatisch dat de spin van het andere deeltje tegengesteld is.

In samenwerking met Esli Diepenbroek, student Chemical Engineering, zijn er twee lesvideo's ontwikkeld over quantumeigenschappen. Deze video's waren een opdracht in het kader van een 'personal pursuit' bij het UT Honours Programma. Deze blended learning masterclass bood een passende context om die video's in te verwerken. In de eerste video worden spin en superpositie uitgelegd en in de tweede video verstrengeling. Omdat het dit nieuwe, lastige onderwerpen zijn voor leerlingen, kunnen ze gebaat zijn bij extra uitleg. Daarom worden er op het einde van pagina nog twee links naar andere lesvideos gegeven, waarin de stof nogmaals op een andere manier wordt uitgelegd door The Science Asylum (2017) en Veritasium (2015).

#### Stern-Gerlach-experiment

Het Stern-Gerlach experiment is een goed voorbeeld dat de spins van elektronen gekwantificeerd zijn; spin up en spin down. De werking van het experiment wordt uitgelegd, samen met een video van 'Quantum Made Simple' (Physics Reimagined, 2018b). Vervolgens gaan de leerlingen het experiment zelf simuleren met een applet van PhET Colorado (University of Colorado, 2018). Aan de hand van een geïntegreerde quiz doorlopen de leerlingen het Stern-Gerlach-experiment. Stap voor stap ontdekken ze hoe spin en de oriëntatie van de magneet elkaar beïnvloeden. Ook kijken ze wat er gebeurt als er meerdere magneten achter elkaar staan.

De quiz sluit af met een opstelling waarin de middelste magneet  $90^\circ$  gedraaid is. Hierin doet de situatie zich voor, dat na de eerste magneet atomen in de  $z^-$  geblokkeerd worden. De tweede magneet, in de x-richting, laat zowel  $x^+$  als  $x^-$  door. Vervolgens laat derde magneet, wederom in de z-richting nu atomen in beide richtingen  $z^-$  en  $z^+$  door. Ondanks dat de atomen in de  $z^-$  richting door de eerste magneet nog geblokkeerd worden. Deze ogenschijnlijke vreemde uitkomst wordt nog niet direct verklaard, maar vormt de opmaat voor het volgende onderdeel, het polarisatie-experiment.

### Polarisatie-experiment

Tijdens de startbijeenkomst hebben de leerlingen ieder een envelop ontvangen. Deze mogen ze nu openen en hierin vinden ze drie lineaire polarisatiefilters. Aan de hand van deze filters zal de opvallende uitkomst van het Stern-Gerlach-experiment verder worden geïllustreerd. Eerst volgt er een korte uitleg over de polarisatie van licht, daarna wordt stilgestaan bij polarisatiefilters en hoe deze de polarisatie van het licht beïnvloeden samen met enkele toepassingen van deze filters.

Vervolgens gaan de leerlingen zelf experimenteren met de filters. Zo kunnen ze kijken hoe licht van een lcd-scherm van een laptop veranderd als je er een polarisatiefilter voor houdt. Daarna wordt er gevraagd wat er gebeurt als je twee filters neemt en een daarvan een kwartslag draait. Het inkomende licht is zowel horizontaal, als verticaal gepolariseerd, dus samen blokkeren de filters al het inkomende licht. Als laatste wordt nu het derde filter *tussen* de andere twee geplaatst, onder een hoek van  $45^\circ$ . Men zal zien dat onder invloed van het derde filter er nu wel weer licht voor doorgelaten, ondanks de andere twee filters die samen al het licht tegenhouden. Een voordeel van het gebruik van de polarisatiefilters is dat het de leerlingen de mogelijkheid biedt authentieke ervaringen op te doen. Het is geen simulatie of video. ze hebben iets fysieks in handen en zien de effecten voor hun ogen gebeuren. Hierna is het de opdracht om dit fenomeen te verklaren.

### Weekopdrachten

Voor Lesweek 2 zijn er twee opdrachten. De inleveropdracht over polarisatie en spin en de posteropdracht. Voor de inleveropdracht wordt gevraagd een verklaring te geven voor de uitkomsten van het polarisatie-experiment. Hoe kan het, dat na toevoegen van een derde filter er toch weer licht door de filters komt? Voor deze opdracht zullen de leerlingen zelf op onderzoek moeten gaan. Daarbij kunnen gebruik maken van de materialen op de leeromgeving of andere bronnen online zoeken. Het is wel van belang dat deze bronnen vermeld worden. Hiervoor wordt er ook verwezen naar een aparte pagina met extra uitleg over het gebruik van bronnen, zie ook paragraaf 3.3.7. De vorm waarin de opdracht ingeleverd wordt staat vrij. Dit mag in een tekstdocument, maar een tekening, animatie, video is ook toegestaan. Vervolgens is er een verdiepende uitdaging, waarin de leerling de verklaring voor het polarisatie-experiment kunnen gebruiken om ook uitkomsten van aangeschakelde magneten in Stern-Gerlach-experiment te verklaren. Daarnaast zal er ook gestart worden met de poster. De leerlingen vatten de lesstof over spin, superpositie en verstrengeling samen, zodat dit een eerste deelonderwerp op de poster maakt.

## 3.3.3 Lesweek 3: Hardware van een Quantumcomputer

Nadat in de tweede online lesweek een theoretische basis gelegd is aan de hand van spin, superpositie en verstrengeling, zal in de derde lesweek de quantumcomputer verder worden geïntroduceerd. Er wordt gestart met uitleg van een qubit en daarna hoe je door qubits te verstrengelen de grote rekenkracht van een quantumcomputer kan bereiken. In deze week de eerste webconferentie plaats vinden. Ook volgen er weer een aantal weekopdrachten.

#### Leerdoelen Lesweek 3

De leerling ...

- leert wat een qubit is.
- kan aan de hand van een qubit uitleggen hoe een quantumcomputer werkt.
- kan het verschil aangeven tussen een klassieke computer en een quantumcomputer.
- kan de lesinhoud van lesweek 3 vertalen naar een sectie op de poster voor de eindopdracht.

## De Qubit

Voor de uitleg over qubits wordt eerst kort stil gestaan bij klassieke bits. Het voornaamste is dat alle digitale informatie terug te voeren is naar een combinatie van 0 en 1. Enige voorkennis van het binaire stelsel vanuit signaalverwerking bij natuurkunde of informatica is handig, maar niet noodzakelijk. Vervolgens wordt duidelijk gemaakt dat door middel van superpositie een qubit tegelijkertijd voor 0 en 1 kan coderen. En tot het moment van meten de qubit zich in beide toestanden bevindt. De waarschijnlijkheid-amplitudes  $\alpha$  en  $\beta$  geven de kans aan om de qubit in toestand 0 of 1 aan te treffen. De echte rekenkracht van een quantumcomputer vindt plaats wanneer de qubits met elkaar verstrengeld worden. Voor twee qubits zijn er vier waarden nodig om het systeem beschrijven, voor drie qubits zijn dat er acht. De mogelijke toestanden van de qubits nemen dan exponentieel toe ten opzichte van het aantal qubits. Dit maakt dat het mogelijkheden, en daarmee de rekenkracht, exponentieel toeneemt ten op zicht van klassieke bits. Als laatste wordt een voorbeeld gegeven hoe qubits gerealiseerd kunnen worden. Dit gebeurt aan de hand van een video van Veritasium ([2013b](#)).

## De Quantumcomputer

Na de uitleg van qubits wordt er aandacht besteed aan de fysieke realisatie van een quantumcomputer. Hierin wordt uitgelegd hoe losse qubits samen een quantumcomputer vormen. Naast de geschreven uitleg zijn er twee video's die de werking van een quantumcomputer verder toelichten. Een tweede video van Veritasium ([2013a](#)) vertelt hoe een quantumcomputer werkt. In de video van IBM-research legt Dr. Talia Gershon uit hoe IBM een prototype quantumcomputer heeft gerealiseerd en hoe met IBM-Q quantumcomputers voor het publiek toegankelijk zijn (IBM Research, [2017](#)).

## Webconferentie

In de derde week zit men op de helft van de masterclass, sinds de startbijeenkomst is er enkel tekstueel contact geweest tussen de leerlingen en de docent. Om beter contact te houden is er voor gekozen om in de derde week een webconferentie te organiseren waarin docent en leerlingen elkaar kunnen zien en spreken. Tijdens deze sessie wordt er teruggekeken op de afgelopen lesweek en is er de mogelijkheid om met elkaar de huidige lesweek te bespreken. Daarnaast is het een moment waarin de opgedane groepsdynamiek vanuit de startbijeenkomst voortgezet kan worden. Er is gekozen om tijdens de webcamsessie geen nieuwe informatie te geven. Omdat er vanuit de masterclass geen vaste contactmomenten zijn vastgelegd is het onzeker in hoeverre alle leerlingen kunnen deelnemen. Via de online leeromgeving zal een tijdstip bekend worden gemaakt waarop de webconferentie zal plaatsvinden. Eurekos bevat een ingebouwde functionaliteit van 'Jitsi Meet' waarin eenvoudig een conferentie via de webcam gefaciliteerd kan worden.

## Weekopdrachten

De weekopdrachten van week 3 bestaan uit een viertal kortere inleveropdrachten, samen met het werken aan een deelonderwerp van de poster. Voor de eerste inleveropdracht zoeken de leerlingen uit op welke manier een qubit gemaakt kan worden. Hier moet naar voren komen dat de qubit geen fysiek object is. Een quantummechanisch systeem dat twee toestanden bevat kan een qubit voorstellen en dit kan op verschillende wijze gerealiseerd worden. In de tweede opdracht wordt een klassieke computer vergeleken met een quantumcomputer. De leerlingen berekenen hoeveel qubits er nodig zijn om de snelste klassieke computer te evenaren. In de derde opdracht wordt hier verder op ingegaan als de leerlingen moeten uitleggen wat *quantum supremacy* inhoudt. Als laatste wordt er vooruitgeblikt naar de volgende week, waarin het rekenen met een quantumcomputer centraal staat. In die week zullen de leerlingen zelf aan de slag gaan met IBM-Q. De opdracht van deze week laat leerlingen alvast oriënteren op de quantumcomputer van IBM, doordat ze hier zelf informatie over moeten verzamelen. De weekopdrachten zijn er op gericht de gestelde leerdoelen van deze week te behalen. De leerlingen leren wat een qubit is, aan de hand hiervan kunnen ze uitleggen hoe een quantumcomputer werkt en hoe deze verschilt van een klassieke computer. Na de weekopdrachten gaan de leerlingen weer aan de slag met een deel van de poster voor de eindopdracht, waarin een lesstof van lesweek 3 vertaald wordt naar een sectie op de poster.

## 3.3.4 Lesweek 4: Rekenen met een Quantumcomputer

In de vierde lesweek wordt er gefocust op hoe een quantumcomputer berekeningen uitvoert. Hiervoor is er eerst een korte introductie over de Bloch-vector, daarna volgt er uitleg over de verwerking van informatie aan de hand van (quantum)logische poorten. Al laatste komt IBM-Q aan bod, de quantumcomputer van IBM die via de cloud voor gebruikers vrij toegankelijk is. De leerlingen zullen dan ook zelf met deze quantumcomputer gaan experimenteren.

## Leerdoelen Lesweek 4

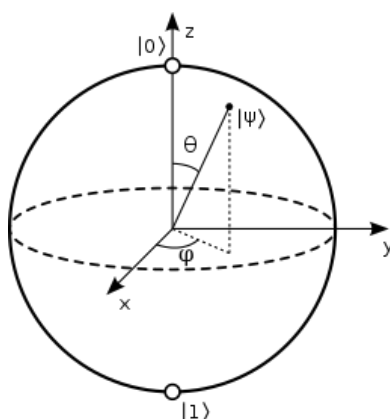
De leerling ...

- weet hoe de toestand van een qubit wordt weergegeven aan de hand van de Bloch-vector.
- kent de functie van verschillende quantumlogische poorten.
- kan eenvoudige berekeningen uitvoeren op de IBM-Q quantumcomputer.
- kan de resultaten van IBM-Q interpreteren.
- kan de lesinhoud van lesweek 4 vertalen naar een sectie op de poster voor de eindopdracht.

### Bloch-vector

In eerdere weken is er al aandacht besteed aan de toestand van een qubit. Hierbij hebben de leerlingen geleerd dat een qubit in spin up of spin down kan verkeren, maar in een toestand daar tussenin. Tijdens deze lesweek zal er ook aandacht besteden aan het *veranderen* van deze toestanden.

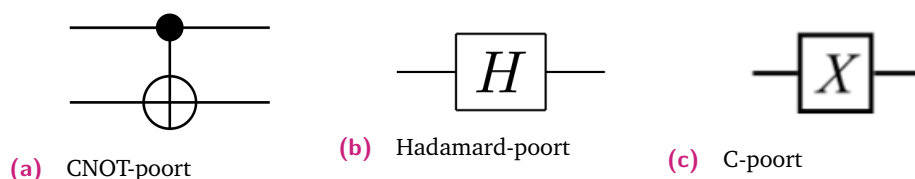
Zonder wiskundige formules wordt het principe van de Bloch-vector uitgelegd, als representatie voor toestand van de qubit. De toestanden  $|0\rangle$  en  $|1\rangle$  bevinden zich boven en onderaan de z-as. Door middel van de hoeken  $\varphi$  en  $\theta$  kan de qubit zich elders op het oppervlakte van de bol bevinden, waarmee de qubit in superpositie is. Dit wordt geïllustreerd in figuur 3.2. Voor leerlingen op het niveau deze masterclass gaat te ver om de imaginaire component uit te leggen, of berekeningen met Bloch-vector uit te voeren. Toch is het een veelgebruikte manier om qubits weer te geven en aan de hand van deze uitleg krijgen de leerlingen een idee hoe de Bloch-vector qubits weergeeft. Wel moet er rekening mee worden gehouden dat de Bloch-vector slechts een representatie van de qubits toestand is en niet hoe een qubit er fysiek uit ziet.



**Figuur 3.2.** Visuele representatie van een qubit aan de hand van de Bloch-vector.

### Quantumlogische poorten

Aan de hand van een video van Frame of Essence (2014) wordt eerst uitgelegd hoe een klassieke computer informatie, bits, verwerkt aan de hand van logische poorten en vervolgens hoe ditzelfde concept ook voor quantumcomputers geldt. De klassieke poorten voldoen echter niet, vandaar dat er gebruik wordt gemaakt van quantumlogische poorten. Na deze video worden de meestvoorkomende quantumlogische poorten kort toegelicht; de X-poort, Hadamard-poort, X-poort en CNOT-poort. Ook is er beknopte uitleg wat het uitvoeren van een meting betekent in een quantumstelsel. De uitleg op de lespagina is slechts een beknopte uitleg van de meest gebruikte poorten. Als de leerlingen aan de slag gaan met *Beginners guide* van IBM zal het gebruik van deze quantumlogische poorten verder worden toegelicht en gedemonstreerd.



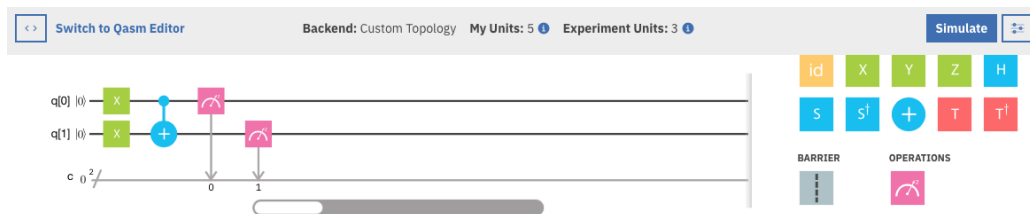
**Figuur 3.3.** Meestvoorkomende quantumlogische poorten.



## IBM-Q

In 2016 is IBM gestart met een project waarin een 5-qubit quantumcomputer in de cloud draait die voor het publiek toegankelijk is. IBM-Q wordt gebruikt voor wetenschappelijk onderzoek wereldwijd, maar in feite kan iedereen een account aanmaken en opdrachten naar de quantumcomputer sturen. De composer van IBM-Q is geen applet waarin een simulatie draait maar een fysieke quantumcomputer die werkelijke resultaten genereert. Hiermee voorzie je leerlingen van een authentieke ervaring. Het is geen applet die de werkelijkheid simuleert, maar een fysieke quantumcomputer die ook niet altijd dezelfde resultaten geeft. Een authentieke leerervaring kan bijdragen aan betere begripsvorming van het onderwerp en geen realistischer beeld van wetenschappelijk onderzoek in de praktijk (Braund & Reiss, 2006).

IBM heeft zelf een *Beginners Guide* geschreven die in relatief eenvoudige taal de basisconcepten van quantumcomputing uitlegt (IBM Research and the IBM QX team, 2017). Daarnaast biedt het ook enkele opdrachten waarin zelf eenvoudige berekeningen met de quantumcomputer worden uitgevoerd. De leerlingen gaan hier zelf mee aan de slag als een van de weekopdrachten.



**Figuur 3.4.** Screenshot IBM-Q editor.

### Weekopdrachten

De eerste opdracht van de week bestaat uit twee oefenopgaven, waarin twee circuits voorzien zijn van verschillende quantumlogische poorten. Hiervan zullen de leerlingen de uitkomsten moeten berekenen voor verschillende inputs en toelichten waarom deze circuits 'SWAP' en 'verstrengelaar' worden genoemd. Deze opgave dient als oefening voordat de leerlingen met composer van IBM-Q werken. Op deze wijze hebben ze eerst op papier de werking van verschillende quantumlogische poorten onderzocht, zodat deze niet willekeurig in de online composer gebruikt worden. Deze opdracht sluit aan bij het tweede leerdoel van de week, waarin de leerling de functie van de quantumlogische poorten kent.

Voor de tweede opgave gaan de leerlingen zelf experimenteren met IBM-Q aan de hand van de *Beginners Guide*. Uit deze handleiding kunnen ze opgaves maken en ook zelf nieuwe circuits uitproberen. Om voor de docent te checken hoe ver de leerlingen zijn gekomen en wat hun ervaringen zijn met IBM-Q, worden de leerlingen gevraagd een kort verslag te schrijven. Hierin geven ze aan hoe ver gekomen zijn in de *Beginners Guide*, wat ze het meest interessant vonden en wat moeilijk. Als de leerlingen zelf circuits in de composer gemaakt hebben kunnen ze deze toevoegen. Op deze wijze kunnen de leerlingen voornamelijk zelf aan de slag met quantumcomputer van IBM, maar krijgt de docent nog wel inzicht in hun leerproces. In de opdrachten de *Beginners Guide* komen alle leerdoelen van deze week terug. Aan de hand van de Bloch-vector worden qubits geïllustreerd en worden operaties van quantumlogische poorten inzichtelijk gemaakt. In andere opdrachten worden er eenvoudige berekeningen uitgevoerd met IBM-Q en zullen de resultaten hiervan geïnterpreteerd moeten worden. Als laatste zullen de bevindingen uit lesweek 4 vertaald worden naar een derde sectie op de poster voor de eindopdracht.

### 3.3.5 Lesweek 5: Toepassingen & Toekomst

Vanuit de voorgaande lesweken voldoende kennis opgedaan om in de laatste lesweek te kijken naar toepassingen van de quantumcomputer. Echter sinds de volledige ontwikkeling van de quantumcomputer nog aan het begin staat en op dit moment de klassieke computer nog niet kan overtreffen, is het ook waardevol om na te gaan wat de toekomst kan brengen wanneer quantumcomputers in een verder gevorderd stadium zijn.

## Leerdoelen Lesweek 5

De leerling ...

- is bekend met verschillende toepassingen van de quantumcomputer en hoe deze in toekomst een rol kunnen spelen.
- kan een enkele toepassing van de quantumcomputer in eigen woorden samenvatten in een kort verslag.
- kan de lesinhoud van lesweek 5 vertalen naar een sectie op de poster voor de eindopdracht.

### Toepassingen

Er wordt gestart met een tweede video van Frame of Essence (2015) waarin een herhaling van voorgaande lesweek zit hoe quantumalgoritmes werken en wat precies mogelijkheden en beperkingen zijn. Aan de hand van een aantal verschillende toepassingen worden deze mogelijkheden kort toegelicht. Dit is onder andere quantumteleportatie met experiment van Hensen e.a. (2015), het quantuminternet met een TEDtalk van Stephanie Wehner (TEDx Talks, 2014) en een artikel van Castelvechi (2018). Daarnaast wordt ook breken en opstellen van cryptografie behandeld. Hierbij is een artikel van Kennislink door van de Craats en Bosma (1998) bijgevoegd en nog een derde video van Frame of Essence (2017). De informatie op de lespagina over verschillende voorbeelden is kort en slechts inleidend. Wel zijn er meerdere bronnen toegevoegd die de leerlingen ter verdieping kunnen lezen, deze dienen tevens als materiaal voor de inleveropdracht.

### Toekomst

Op de laatste inhoudelijke lespagina wordt een blik in toekomst geworpen. Onderzoekers staan op dit moment voor uitdagingen om de volledige supercomputer te realiseren. Dit bestaat zowel uit de hardware; de engineering om stabiele quantumcomputer te bouwen met voldoende qubits en de software; het ontwerpen en testen van quantumalgoritmes die op deze quantumcomputers kunnen draaien. Verder is het voor een groot gedeelte onduidelijk wat de toekomst zal brengen. Er wordt een parallel getrokken met de ontwikkeling van de klassieke computer omstreeks 1943, waarin de verwachting was er wereldwijd slechts vraag zou zijn naar een paar modellen, tegenwoordig bezit nagenoeg iedereen er een. Ook is de vraag naar de ethische kwesties, zal technologische vooruitgang altijd ten goede worden gebruikt worden? Of is er ook een keerzijde? Het kraken van de huidige encryptiemethoden kan grote gevolgen hebben voor onder andere privacy.

Als laatste wordt er aandacht besteed dat quantumcomputing de neiging heeft een modewoord te worden. In de media kan de quantumcomputer onterecht worden afgeschilderd als een alles-kunnende supercomputer. Zodoende is het ook belangrijk de mythes rondom de quantumcomputer weg te nemen, de video met een TEDtalk van Scott Anderson legt dit verder uit (TEDx Talks, 2017).

### Weekopdrachten

Voor de laatste online lesweek is er slechts één inleveropdracht. De leerlingen kiezen een van de eerder genoemde toepassingen en gebruiken deze als onderwerp voor een kort verslag over de toepassing en toekomst van de quantumcomputer. Het verslag moet de lengte van ongeveer een A4 hebben, daarbij zullen ze zelf aanvullende informatie over dit onderwerp moeten zoeken en kunnen gebruik ze maken van de aangeleverde bronnen. Naast de inleveropdracht wordt ook de poster voor de eindopdracht afgemaakt worden. Deze wordt ingeleverd en waarna ze voor de laatste keer (peer)feedback zullen ontvangen.

## 3.3.6 Slotbijeenkomst

De slotbijeenkomst is de laatste sessie van de masterclass. Hierin zullen de leerlingen hun posters aan elkaar presenteren, krijgen ze een presentatie van Jelmer Boter, promovendus bij QuTech, volgen ze een rondleiding bij de vakgroep NanoElectronics, ontvangen ze een certificaat en sluiten ze af met een evaluatie van de masterclass.

## Leerdoelen Slotbijeenkomst

De leerling ...

- kan een zelfgemaakte wetenschappelijke poster presenteren en bediscussiëren met medeleerlingen en de docent.
- krijgt door middel van een presentatie en rondleiding inzicht wat binnen de academische wereld mogelijkheden zijn om onderzoek te doen naar quantumcomputers.



### **Posterpresentaties**

De posters die de leerlingen als eindopdracht hebben ingeleverd zijn op A1-formaat geprint en worden in het lokaal op gehangen. De leerling presenteert kort zijn of haar poster. Waarna de leerlingen de leerlingen met elkaar in gesprek gaan, er is mogelijkheid om vragen te stellen en de verschillen tussen de posters met elkaar te bespreken. Na afloop van de masterclass krijgen de leerlingen de poster mee, die ze op school kunnen ophangen. Om zo ook medeleerlingen te informeren over de quantumcomputer.

### **Presentatie QuTech**

Het onderzoekscentrum QuTech is een samenwerking tussen de Universiteit Delft en TNO en een voorloper in het onderzoek naar quantumtechnologie. In 2015 stond QuTech in de belangstelling van de internationale pers, nadat ze in staat waren om twee elektronen over een afstand van 1.3 km met elkaar te verstrengelen (Hensen e.a., 2015).

Jelmer Boter is een UT-alumnus en PhD-student bij QuTech. Hij zal de leerlingen meer vertellen over verstrengeling, quantumteleportatie en de verschillende soorten onderzoek bij QuTech. Ook is er voor de leerlingen de mogelijkheid om vragen te stellen. Naast de inhoudelijke informatie biedt de presentatie voor de leerlingen een inzicht wat de mogelijkheden zijn na een studie aan de universiteit.

### **Rondleiding NanoElectronics**

Na de presentatie over QuTech krijgen de leerlingen een rondleiding bij de vakgroep NanoElectronics. Floris Zwanenburg, associate professor, geeft eerst een korte presentatie over de vakgroep NanoElectronics en het onderzoek dat ze doen. Er wordt in gegaan op de hype omtrent quantumcomputers en wat realistische vooruitzichten voor zijn. Ook is er voor de leerlingen een themanummer van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde ‘quantuminformatie: van fundament tot toepassing’. Aansluitend krijgen de leerlingen een rondleiding door de verschillende labs van de vakgroep. Zo wordt onder andere de verschillende soorten koeling uitgelegd en bekijken de leerlingen enkele chips onder microscoop.

## **3.3.7 Ondersteunende pagina's**

Naast de lespagina's van de verschillende lesweken zijn er ook nog een drietal ondersteunde pagina's met materialen die de leerlingen als naslag kunnen gebruiken.

### **Wetenschappelijke poster maken**

De eindopdracht voor de leerlingen betreft het maken van een poster over de quantumcomputer in wetenschappelijke stijl. Ondanks dat leerlingen vaker posters maken op school, kan dit type poster nieuw zijn. De pagina 'Wetenschappelijke poster maken' geeft uitleg over de inhoud van een wetenschappelijke poster, do's en don't's, een duidelijk stappenplan, en een uitgebreid voorbeeld hoe het niet moet, waarin veelvoorkomende fouten behandeld worden.

### **Peer feedback**

De leerlingen beoordelen elkaars werk door middel van peer feedback. Op deze pagina wordt dit proces nog een keer extra uitgelegd. Hier voor is er aandacht voor opbouwende feedback en dat deze werkvorm erop gericht is om van elkaar te leren. Komen leerlingen tot verschillende antwoorden worden ze aangemoedigd om na te gaan waar de verschillen zitten en hoe dit komt.

### **Bronvermelding**

Voor zowel de weekopdrachten als eindopdracht zullen de leerlingen naast het aangeboden lesmateriaal zelf informatie opzoeken. Als ze dit verwerken in een van de opdrachten zullen ze de bron moeten vermelden. Omdat de masterclass een oriënterend lesprogramma op de universiteit is, worden de leerlingen gevraagd wetenschappelijke bronvermelding te gebruiken. Op deze ondersteunde pagina staat uitleg over het gebruik van bronnen. Verder staan er links naar twee webpagina's met extra uitleg over verwijzingen in tekst (Swaen, 2014b), het maken van een literatuurlijst (Swaen, 2014a) en een lesvideo waarin het belang bronnengebruik wordt aangegeven (HanzeMediatheek Hanzehogeschool Groningen, 2017).



Het in het voorgaande hoofdstuk gepresenteerde ontwerp zal worden geëvalueerd. Het doel van de evaluatie is om de drie deelvragen uit hoofdstuk 1.2.1 te beantwoorden. Onderdeel van de pilotstudie is dat na het realiseren van het ontwerp, de masterclass bij Pre-U een keer uitgevoerd wordt. Het werk van de leerlingen leidt tot verschillende bronnen waarmee de leeropbrengst en de ervaringen bepaald kunnen worden. Daarnaast zijn er de evaluaties van het projectteam en de docent. Nadat de leeropbrengst en de ervaringen bepaald zijn, zal als laatste het ontwerp getoetst worden aan de gestelde eisen uit paragraaf 2.3. Alle eisen worden stuk voor stuk langs gelopen waarbij op basis van alle informatie, vastgesteld wordt of aan die eis voldaan is.

## 4.1 Proefpersonen

De leerlingen die meedoen aan de pilot van deze eerste blended learning masterclass zijn tevens proefpersonen voor dit Onderzoek van Onderwijs. Via de website van Pre-U is de aanmelding voor de masterclass geopend en kunnen leerlingen zich aanmelden. Na aanmelding worden zij op de hoogte gebracht van verdere details over de masterclass. Hierbij worden ze ook geïnformeerd dat masterclass deel uit maakt van een onderzoek. Tijdens de startbijeenkomst krijgen de leerlingen een toestemmingsverklaring (informed consent) waarmee ze toestemming geven dat hun resultaten uit de masterclass worden gebruikt voor dit onderzoek. De persoonlijke gegevens van leerlingen zullen in dit onderzoek anoniem worden verwerkt. Dit formulier is opgenomen in bijlage B.1. Omdat de leerlingen minderjarig zijn, worden de ouders van de leerlingen via een brief op de hoogte gesteld. Hierin wordt aangegeven dat zij instemmen om hun kind deel te laten nemen aan de dit onderzoek, mits zij geen bezwaar maken en dat ze ten alle tijden het recht hebben hun zoon of dochter uit te sluiten van deelname. Deze brief is opgenomen in bijlage B.2.

## 4.2 Dataverzameling

Om de leeropbrengst en de ervaringen te evalueren wordt er gebruikt gemaakt van verschillende categorieën bronnen. Een bestudering van de gemaakte opdrachten geeft inzicht in de leeropbrengst van de leerlingen en geeft aan in hoeverre de gestelde leerdoelen behaald zijn. Een bestudering van de verschillende evaluaties geeft aan hoe de leerlingen, docent en Pre-U de masterclass ervaren hebben. Er is echter nog een derde categorie, de interactie met leerlingen tijdens de masterclass. Tijdens de verschillende vormen van interactie kunnen zowel ervaringen of signalen over het leerproces naar boven komen. Zodoende wordt deze broncategorie aan de andere twee toegevoegd. Een overzicht van de verschillende databronnen en categorieën is te vinden in tabel 4.1.

| Categorie   | Opdrachten               | Interactie                         | Evaluaties                      |
|-------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Bepaald     | <i>Leeropbrengst</i>     | <i>Leeropbrengst en Ervaringen</i> | <i>Ervaringen</i>               |
| <b>Bron</b> | Posters startbijeenkomst | Discussiebalk                      | Weekevaluaties leerlingen       |
|             | Weekopdrachten           | E-mailcontact                      | Eindevaluatie leerlingen        |
|             | Posters eindopdracht     | Webconferentie                     | Eindevaluatie projectteam Pre-U |
|             | Peer feedback            | Forum                              | Eindevaluatie docent            |

**Tabel 4.1.** Overzicht van de verschillende databronnen ingedeeld per categorie en wat ze meten.

### 4.2.1 Opdrachten

Gedurende de masterclass maken de leerlingen verschillende opdrachten. Bij de startbijeenkomst wordt er gebrainstormd en maken de leerlingen een poster met hun voorkennis. Gedurende de online weken worden er weekopdrachten gemaakt die worden ingeleverd, waarna er peer feedback door de leerlingen plaats vindt en feedback van de docent. Ook is er een eindopdracht, de wetenschappelijke poster. Deze wordt gedurende de

online weken opgebouwd en tijdens de slotbijeenkomst gepresenteerd. Het ingeleverde werk van de leerlingen wordt nagekeken en aan de hand daarvan bepaald of de leerdoelen behaald zijn. De precieze invulling van deze opdrachten is reeds besproken in hoofdstuk 3 en zal hier verder niet worden behandeld.

## 4.2.2 Interactie

### Discussiebalk

Op iedere lespagina is aan de rechterkant een discussiebalk aanwezig. Hier kunnen leerlingen en docent berichten plaatsen. Deze berichten zijn steeds specifiek voor die pagina. Leerlingen kunnen hier vragen achterlaten en een discussie starten. Voor het onderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten vragen: inhoudelijke vragen over de lesstof plaats, organisatorische vragen over de masterclass en praktische vragen over het gebruik van de online leeromgeving. In de resultaten wordt nagegaan in hoeverre de discussiebalk gebruikt is en wat voor soort vragen leerlingen vaak hebben.

### Forum

Op de teampagina kunnen leerlingen samen met de docenten berichten plaatsen en bestanden met elkaar uitwisselen. Het 'prikbord' vervult de rol van forum, hier kunnen uitgebreidere discussies plaats vinden.

### Webconferentie

De webconferenties zijn de enige momenten tijdens de online weken waarin de leerlingen en docent direct, synchroon, contact met elkaar hebben. Tijdens deze sessie kunnen vragen over de lesstof uitvoeriger worden besproken. De belangrijkste punten uit deze sessie worden gebruikt voor de evaluatie.

### E-mailcontact

Naast de interactie op de online leeromgeving is er ook e-mailcontact met leerlingen. Ook uit deze e-mails kunnen lessen getrokken worden hoe de masterclass wordt ervaren en waar eventuele knelpunten met de lesstof liggen.

## 4.2.3 Evaluaties

### Weekevaluaties leerlingen

Naast de weekopdrachten worden de leerlingen gevraagd ook een weekevaluatie te geven. Deze evaluatie staat als opdracht op de opdrachtenpagina en kan daar worden ingeleverd. De weekevaluatie bestaat iedere week uit de volgende vragen:

1. Wat vind je van het lesmateriaal?
  - De uitleg
  - De opdrachten
  - Het niveau
2. Hoe kom je uit met de tijdsbesteding?
3. Heb je nog andere op- of aanmerkingen over deze lesweek?

De belangrijkste punten uit deze evaluaties worden besproken in de resultaten.

### Eindevaluatie leerlingen

Na afloop van de slotbijeenkomst blikken de leerlingen samen met Jan Volbers en de docent terug op de masterclass. Hierbij wordt gevraagd wat ze goed vonden aan de masterclass en wat er in het vervolg beter zou kunnen. Tijdens deze evaluatie worden er aantekeningen gemaakt en de belangrijkste punten worden opgenomen in het hoofdstuk met resultaten.

### Eindevaluatie docent

Omdat ik naast het realiseren van het ontwerp ook de masterclass begeleid heb, zal ik kort terugblikken op de masterclass en daarin mijn ervaringen als docent delen ter evaluatie.

### Eindevaluatie projectteam Pre-U

Het projectteam van de pilot zal samen komen als de slotbijeenkomst geweest is. Hier zal onder andere ook de eindevaluatie van de leerlingen besproken worden en de masterclass verder worden geëvalueerd.

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de evaluatie van de blended learning masterclass. Eerst volgt een globaal overzicht hoe de masterclass verlopen is. Daarna worden de drie categorieën meetinstrumenten behandeld; opdrachten, interacties en evaluaties. Als laatste zal op basis van de gevonden resultaten de eisen waaraan de masterclass moest voldoen getoetst worden.

## 5.1 Verloop masterclass

De pilot vond plaats tussen 16 maart en 4 mei 2018. In totaal waren er zeven aanmeldingen voor de masterclass. Van één leerling is er geen toestemmingsverklaring ontvangen, deze persoon wordt verder uitgesloten in deze evaluatie. De persoonlijke gegevens van de andere leerlingen worden anoniem verwerkt en de leerlingen zullen worden aangeduid als 'leerling 1' tot en met 'leerling 6'. Ondanks dat de masterclass door zowel leerlingen uit 5 als 6 vwo gevolgd kon worden, deden er onder proefpersonen geen leerlingen uit 6 vwo mee en daarmee bestond de groep enkel uit leerlingen uit 5 vwo. Verder waren de leerlingen afkomstig van scholen uit verschillende delen van Nederland. Zowel uit de regio; twee leerlingen uit Enschede en een uit Oldenzaal, als daarbuiten; twee leerlingen uit Ede en een uit Hellevoetsluis.

De startbijeenkomst verliep zoals gepland, met alle leerlingen aanwezig. Tijdens de bijeenkomst hebben de leerlingen en docent uitgebreid kennis gemaakt, is er gebrainstormd waarna de voorkennis op posters is gezet. Verder was een introductie over quantummechanica en bekende experimenten die daarbij horen en is organisatie van de masterclass besproken.

Na de startbijeenkomst gingen de online lesweken van start. Het meest opvallende hier was de inzet van de leerlingen. Gedurende de lesweken werden de opdrachten steeds minder ingeleverd. De opdrachten werden vaak na de deadline ingeleverd of zelfs niet. Door het te laat of niet inleveren van opdrachten kwam ook de werkwijze van peer feedback onder druk te staan. Enerzijds waren er leerlingen die geen peer feedback opstuurde, anderzijds waren er leerlingen die wel peer feedback wouden leveren, maar geen opdracht van de medeleerling hadden ontvangen.

In week 4, nadat er twee online weken verstreken waren, liepen de meeste leerlingen achter op het werk dat ze moesten doen. Er is toen besloten om een tussenweek in te lassen. De globale planning van de masterclass stond uitloop toe. Zodoende kwam er in week 4 geen nieuwe lesweek online, maar werd de tussenweek ingelast waarin leerlingen de tijd krijgen om het werk uit de voorgaande weken in te halen. Door de docent is een inventarisatie gemaakt van het ingeleverde werk tot dat moment. Op basis daarvan hebben alle leerlingen een persoonlijke mail gekregen waarin hun voortgang besproken werd en welke opdrachten, feedback en evaluaties nog open stonden. De tussenweek had tot gevolg dat een week later de meeste weekopdrachten ingeleverd waren en er door de leerlingen meer peer feedback geleverd was. Het werk aan de poster voor de eindopdracht liep nog steeds achter.

Vanwege het uitblijven van voldoende peer feedback is er besloten de laatste twee online weken anders in te delen. Op verzoek van de leerlingen werden de deadlines in de weekplanning verruimd, waarbij nu ook het weekend deel uitmaakte van de lesweek. Daarnaast werden de weekopdrachten individuele opdrachten, waarbij de leerlingen enkel feedback van de docent kregen. Voor de eindopdracht kon een week voor de slotbijeenkomst een conceptversie worden ingeleverd, ook hier gaf de docent feedback. Uiteindelijk hebben twee leerlingen de eindopdracht ingeleverd. In tabel 5.1 en 5.2 is een overzicht te zien welke leerlingen de weekopdrachten en posteropdrachten hebben ingeleverd. Bij aanvang van de masterclass waren de meeste leerlingen nog actief met de weekopdrachten, maar naarmate de lesweken vorderde nam dit af. Voor posteropdracht werd er zeer weinig ingeleverd.

Van deze twee leerlingen was de verwachting dat ze naar de slotbijeenkomst zouden komen. Leerling 2 en 6 hadden alle weekopdrachten en de posteropdracht ingeleverd. Daarnaast waren er op de slotdag nog twee andere leerlingen aanwezig, wat een totaal van vier maakt. Verder was er nog een afmelding en van de

| Leerling:                       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5   | 6 |
|---------------------------------|---|---|---|---|-----|---|
| W2: Polarisatie & Spin          |   | ✓ | ✓ | ✓ | ✓   | ✓ |
| W3: Qubits & de Quantumcomputer |   | ✓ | ✓ | ✓ | ✓   | ✓ |
| W4: Quantumlogische poorten     |   | ✓ |   | ✓ | (✓) | ✓ |
| W4: Verslag IBM Q               |   | ✓ |   | ✓ |     | ✓ |
| W5: Toepassingen & Toekomst     |   | ✓ |   |   | (✓) | ✓ |

**Tabel 5.1.** Overzicht van de weekopdrachten die de leerlingen hebben ingeleverd. De laatste inzendingen van leerling 5 waren na afloop van de masterclass.

| Leerling:         | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|
| Week 2            |   |   | ✓ |   |   |   |
| Week 3            |   |   |   | ✓ | ✓ |   |
| Week 4            |   | * |   | ✓ |   |   |
| Week 5            |   |   |   |   |   |   |
| Week 6 concept    |   | ✓ |   |   |   |   |
| Week 6 definitief |   | ✓ |   |   |   | ✓ |

**Tabel 5.2.** Overzicht van de posteropdracht ingeleverd per lesweek. \* De inzending van Leerling 2 in week 4 betrof een bestandsformaat die niet standaard geopend kon worden.

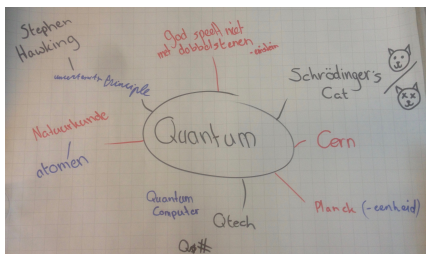
laatste leerling is niets meer vernomen. De slotbijeenkomst verliep, ondanks de lagere opkomst en slechts twee posters, zoals gepland. De leerlingen deden enthousiast mee bij de posterpresentatie en de webconferentie van Jelmer Boter van QuTech. Ook de rondleiding van Floris Zwanenburg bij vakgroep NanoElectronics werd goed ontvangen. Er was uitleg van associate professor Floris Zwanenburg, de leerlingen ontvingen een speciale uitgave van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde gewijd aan de quantumcomputers en er werden verschillende labs bekeken. Na afloop is er met de vier aanwezige leerlingen geëvalueerd.

Leerling 3 en 5 waren aanwezig tijdens de slotbijeenkomst, ondanks dat ze niet alle weekopdrachten en de eindopdracht hadden gemaakt. Zij gaven aan de ze nog wel graag de masterclass wilden afronden en of het lesmateriaal online zou blijven staan. Voorwaarden voor het afronden van de masterclass zijn met de docent overlegd en uiteindelijk heeft leerling 5 nog enkele weekopdrachten ingeleverd.

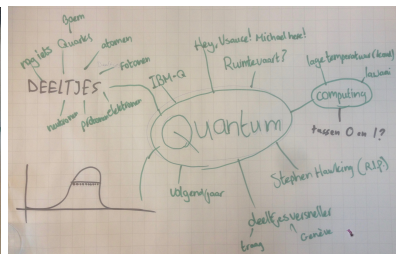
## 5.2 Opdrachten

### 5.2.1 Posters startbijeenkomst

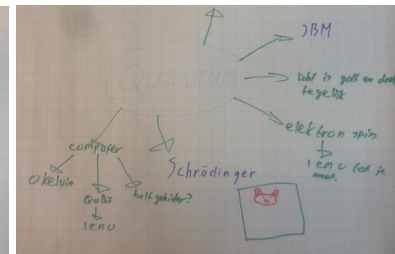
Tijdens de startbijeenkomst hebben de leerlingen in duo's een brainstorm gedaan over wat zij op dat moment wisten over quantummechanica. De uitkomsten hiervan hebben ze opgeschreven die daarna met elkaar werden vergeleken. De resultaten zijn te zien in figuur 5.1. Hierin komt naar voren dat de leerlingen in globale zin een idee hebben wat quantummechanica inhoudt. Zo wordt het onzekerheidsprincipe genoemd, Schrödinger en 'licht is een golf en deeltje tegelijkertijd'. Verder wordt quantum op meerdere posters ook gekoppeld aan (elementaire) deeltjesfysica. De leerlingen noemen onder andere 'atomen, quarks, CERN.' De quantumcomputer wordt op alle drie de posters ook genoemd. Mede omdat tijdens de startbijeenkomst dit als onderwerp van de masterclass benoemd is. Twee posters noemen al 'tussen 0 en 1' en zelfs het bedrijf Qutech. Verder wordt Stephen Hawking ook op twee posters genoemd, de natuurkundige was in de week van de startbijeenkomst veel in het nieuws vanwege zijn overlijden. Over het algemeen hebben de leerlingen een zeer globaal idee van quantummechanica, dit is vooral gebaseerd op eigen ervaringen of wat ze eerder gehoord hebben. Het betreft allen leerlingen uit 5 vwo en hebben het onderwerp nog niet formeel behandeld op school.



(a) Poster leerling 3 en 4.



(b) Poster leerling 2 en 5.



(c) Poster leerling 1 en 6.

**Figuur 5.1.** Posters van de brainstorm tijdens de startbijeenkomst. Een grotere weergave van de posters is te vinden in appendix C.1.

### 5.2.2 Weekopdrachten

#### Week 2

In de weekopdracht wordt gevraagd een verklaring te geven voor het experiment met drie polarisatiefilters. Als extra uitdaging wordt gevraagd deze verklaring te koppelen aan het Stern-Gerlach-experiment. Deze opdracht is door alle leerlingen, behalve leerling 1 ingeleverd.

De leerlingen komen met verschillende verklaringen voor dit fenomeen. In drie gevallen is er sprake van een klassieke verklaring waarin aan de hand van de projectie van het licht, de intensiteit per filter afneemt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de wet van Malus, die intensiteit ten opzichte van de bron berekent aan de hand van de hoek van het polarisatiefilter. Leerling 5 noemt dat klassiek gezien dit niet mogelijk is en noemt verborgen variabelen als een verklaring. Alleen leerlingen 4 kiest een verklaring op basis van kansen, waarbij er per filter een kans van 50 % bestaat dat het licht wordt doorgelaten. Bij geen een van de vijf inzendingen wordt er een koppeling gemaakt met het experiment van Stern-Gerlach en wordt de opdracht verklaard aan de hand van quantummechanica. Dat er ook een klassieke verklaring mogelijk is kan leerlingen op het verkeerde spoor zetten. In het vervolg kan het handig zijn de leerlingen van te voren meer sturing of hints te geven om tot een meer quantummechanische verklaring te komen.

#### Week 3

Voor week 3 ging de inleveropdracht over qubits en de quantumcomputer. Deze opdracht is uiteindelijk door alle leerlingen ingeleverd, behalve leerling 1. De opdracht bestaat uit vier onderdelen: 1) nagaan op welke verschillende wijze qubits gerealiseerd kunnen worden, 2) het verschil in rekenkracht tussen een klassieke computer en een quantumcomputer, 3) aangeven wat er met quantum supremacy bedoeld wordt en 4) een verkenning van IBM-Q als voorbereiding op de volgende lesweek.

In de inzendingen komt naar voren dat de leerlingen een aardig goed beeld hebben van hoe een quantumcomputer werkt en op welke wijze deze verschilt van een klassieke computer. Verschillende leerlingen noemen verschillende



soorten qubits, maar allen zijn het voorkomende vormen van qubits. Of de leerlingen écht begrijpen hoe dat dit fysisch werkt is niet geheel duidelijk. Maar kennis op dat niveau is ook niet binnen het doel van deze masterclass. Ondanks dat verschillende (super)computers als uitgangspunt voor de berekening klassiek vs. quantum genomen worden komen leerlingen allen op een juist antwoord uit. Het belangrijkste inzicht is dat door de exponentiële toename veel minder qubits nodig zijn. In het geval van quantum supremacy zijn er twee leerlingen die aangeven dat enkel voldoende qubits niet genoeg is voor quantum supremacy. Zij plaatsen een kritische noot, waarin het de foutmarge en decoherentie uiteindelijk de beperkende factoren voor een quantumcomputer zijn. Voor de IBM-Q hebben alle leerlingen rondgekeken op de website van IBM. De hoeveelheid informatie die ze vervolgens verwerken wisselt, maar in aanloop naar de volgende week hebben de leerlingen een idee wat IBM-Q inhoudt.

#### Week 4

In week 4 was de opdracht gesplitst in twee delen. Het oefenen met enkele quantum logic gates en daarnaast het schrijven van een kort verslag waarin de leerlingen hun oefeningen met IBM-Q beschrijven. Leerlingen 2, 4 en 6 hebben beide opdrachten ingeleverd, leerling 5 alleen de opdracht over de quantum gates.

In de opdracht met de quantum logic gates hebben de leerlingen geen moeite met de ‘swap’ waarin drie CNOT-poorten achter elkaar staan. Ze zien allen dat voor verschillende inputs de qubits verwisseld worden. De ‘verstrengelaar’ is lastiger voor leerlingen. Alleen leerling 2 weet deze berekening goed uit te voeren. De andere leggen wel uit dat deze combinatie van poorten de qubit in verstrengelde toestand brengt, mede omdat deze naam als hint voor de opdracht dient. Uit de antwoorden lijkt het echter dat de leerlingen nog niet echt goed begrijpen wat verstrengeling inhoudt.

De opdracht voor IBM-Q was dat leerlingen zelfstandig het eerste deel van de *beginners guide* doorwerkte. Om te na te gaan of ze dit gedaan hadden werd gevraagd een kort verslag te schrijven. Leerling vier geeft een bondige samenvatting van de *beginners guide* zelf. Het is niet duidelijk hoeveel hij zelf met IBM-Q heeft gewerkt, maar wel komt naar voren dat hij de behandelde stof goed begrijpt. Leerling 6 kon het begin IBM-Q goed volgen en vond het een leuke opdracht. Vanaf systemen met verstrengeling werd het te moeilijk, wat overeenkomt met de andere inzending van deze week.

Een speciale vermelding is voor leerling 2. Het blijkt dat hij bij aanvang van de masterclass in de eerste online week al de hele *beginners guide* had voltooid en daarna is overgestapt naar de *full user guide*. Hierin is hij naar eigen zeggen tot het Deutsch-Jozsa Algoritme gekomen is, vanaf daar werd de wiskunde te complex. Wat niet vreemd is, omdat dit wiskunde van bachelor-, dan wel masterniveau is. Naast de testsystemen van IBM-Q heeft leerling 2 ook nog eigen codes in de composer gemaakt en geprobeerd andere logische poorten te vertalen naar quantum logische poorten. Het is duidelijk dat leerling 2 de stof uit week 4 meer dan voldoende beheerste.

#### Week 5

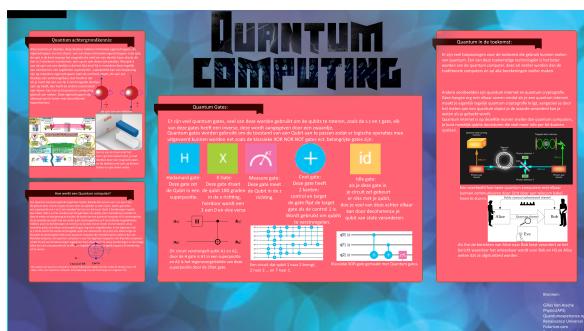
De opdracht ‘Toepassingen & Toekomst’ van de quantumcomputer is door leerlingen 2, 5 en 6 ingeleverd. Zij kregen de opdracht een keuzeonderwerp verder toe te lichten in een verslag.

In verschillende verslagen wordt op een populairwetenschappelijke wijze de toekomst van de quantumcomputer benaderd. In hoeverre deze voorspellingen overeen komen met de praktijk is moeilijk te stellen. Dit kan deels te maken hebben met de bronnen die de leerlingen gebruikt hebben, twee leerlingen hebben deze echter niet in de opdracht vermeld. Toch hebben alle drie de leerlingen nagedacht over verschillende toepassingen van quantumcomputers en wat dit in de toekomst kan betekenen, dit kunnen vervolgens goed in eigen woorden duidelijk maken aan de lezer. De verslagen zijn niet bijzonder kritisch of objectief zoals men dit vanuit de wetenschap zou verwachten. Echter vanuit het perspectief van een leerling in vwo 5 is de opdracht goed gemaakt.

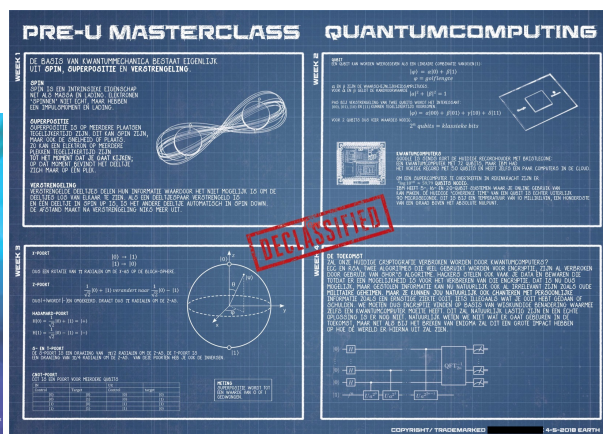
### 5.2.3 Posters eindopdracht

Naast de wekelijkse inleveropdrachten zouden de leerlingen ook iedere week een deel van de poster maken. De wekelijkse posteropdracht diende als samenvatting van de desbetreffende week en zou ook de werkdruk verdelen over meerdere weken. Gedurende de weken werd er echter gering aan de poster gewerkt door de leerlingen, zoals te zien in tabel 5.2. Uiteindelijk hebben leerlingen 2 en 6 de poster voor de eindopdracht ingeleverd, deze zijn te zien in figuur 5.2 en 5.3. Een grotere versie en een beoordeling aan de hand van rubric van de posters is te vinden in bijlage C.2.





Figuur 5.2. Poster eindopdracht leerling 2.



Figuur 5.3. Poster eindopdracht leerling 6.

Aan de poster van leerling 2 is goed te merken dat alles in eigen woorden is verwoord. De verschillende onderdelen op de poster worden op een juiste wijze toegelicht. Deze poster is visueel minder aantrekkelijk dan die van leerling 6, maar is voor het publiek, medeleerlingen uit de natuurkundeklas waarschijnlijk beter te begrijpen.

De poster van leerling 6 geeft een compleet overzicht van de masterclass. Wel zijn er sommige zinnen gekopieerd vanuit het lesmateriaal of staan er formules zonder uitleg. Hierdoor is het moeilijker in te schatten of leerling het goed begreep. Tijdens de posterpresentatie kwam hier wel meer duidelijkheid over. Leerling 6 kon verklaren wat er op de poster staat, maar vond het moeilijk om bij doorvragen de aspecten verder te verklaren. Verder is er nog een ander opvallend punt. Doordat de focus van de masterclass ligt op de concepten spin, superpositie en verstrengeling, geeft leerling 6 aan dat dit de basis van de quantummechanica is.

## 5.2.4 Peer feedback

Zoals eerder naar voren kwam, verliep de peer feedback niet zoals verwacht. Toch is er door een aantal leerlingen peer feedback geleverd op de eerste twee weekopdrachten. Later is er besloten over te gaan op individuele opdrachten. De feedback die gegeven wordt is wisselend van kwaliteit, bij sommige leerlingen is het erg kort en blijft het oppervlakkig. Andere leerlingen zijn uitgebreider en geven bij de feedback ook duidelijke verbeterpunten. Wanneer naar hun inziens een onderdeel niet goed genoeg is uitgewerkt laten ze dit ook duidelijk merken. Onderlinge verschillen worden ook aangegeven. In de eindevaluatie zal later naar voren komen dat leerlingen het lastig vonden om elkaar feedback te geven, wanneer zij zichzelf geen expert in het vakgebied voelen.

De feedback die gegeven werd is voldoende en laat zien dat een waardevolle werkvorm kan zijn in de masterclass. De leerlingen leren van elkaar en er is ook interactie onderling. De reden om over te stappen naar individuele opdrachten was voornamelijk praktisch. Door het te laat of niet inleveren van opdrachten liep de structuur van peer feedback geven vast. Binnen Eurekos was niet mogelijk om peer feedback-opdrachten eenvoudig aan te passen of te wisselen van 'reviewer'. Ook was het in geval van de posteropdrachten niet mogelijk een inzending een lesweek over te slaan. Dat maakte dat de leeromgeving onduidelijk werd waarin leerlingen voor verschillende lesweken, verschillende opdrachten open hadden staan.

## 5.3 Interacties

### 5.3.1 Discussiebalk

De discussiebalk aan de rechterkant van iedere pagina werd spaarzaam gebruikt. Gedurende de masterclass zijn er totaal elf berichten geplaatst verdeeld over zes pagina's. In totaal zijn er 30 pagina's op de online leeromgeving. Het eerste bericht was de docent zelf, met een vraag aan de leerlingen. Van de resterende tien berichten zijn er drie vragen inhoudelijk van aard, drie vragen omtrent de organisatie en vier praktische vragen.

#### Inhoudelijke vragen

De inhoudelijke vragen gingen over de lesstof. Een hiervan bleek een wijziging op een fout in het lesmateriaal, die vervolgens aangepast is. Een andere vraag was ter verduidelijking van een van de weekopdrachten. De laatste vraag ging dieper in op de stof:

“Weet iemand of het van te voren te voorspellen is welke foton wel en welke foton niet door het filter gaat. Als het filter een hoek van 45 graden maakt ten opzichte van de polarisatie van het licht”

Deze vraag werd beantwoord door een medeleerling met een mogelijke verklaring. Er volgde echter geen discussie tussen leerlingen om zo samen tot het juiste antwoord te komen.

#### Organisatorische vragen

Deze drie vragen, of opmerkingen waren gericht op het organisatie van de masterclass. Leerling 3 deelde mee dat hij het werk later in zou leveren, vroeg naar de te geven peer feedback en planning van de eerste webconferentie

#### Praktische vragen

De vier praktische vragen in de discussiebalk waren gericht op het hoe en waar uploaden van de bestanden bij de verschillende opdrachten, het gebruik van templates voor de poster, of de plek waar de leerlingen peer feedback op elkaar geven. Dit laat zien dat de werkwijze en navigatie nog niet voor alle leerlingen even duidelijk waren.

#### Respons op de vragen

De vragen zijn in bijna alle gevallen beantwoord door de docent van de masterclass. Het doel van de discussiebalk was, dat het als plek diende waarin leerlingen en docenten met elkaar de lesstof konden bespreken. Echter door het geringe aantal inhoudelijke vragen kwam dit niet op gang. Toch blijkt het een nuttige functionaliteit waarmee vragen van andere aard gesteld kunnen worden en is het een middel om interactie te bevorderen.

### 5.3.2 Forum

Naast de discussiebalk was er ook het forum waar leerlingen en de docent berichten achter konden laten. Echter deze teampagina, zoals deze in Eureka's heet, is uiteindelijk amper gebruikt. In het begin zijn er door de docent nog algemene berichten geplaatst van organisatorische aard, op geen van deze berichten werd gereageerd en de leerlingen plaatsten zelf ook geen berichten. Zodoende is gedurende de masterclass het forum niet meer gebruikt. Het achterblijven in het gebruik van het forum kan verklaard worden, dat leerlingen naast de discussiebalk geen verdere behoefte zagen om op deze plek berichten achter te laten. Bij een grotere, dan wel actievere groep, kan het forum nog steeds een toegevoegde waarde leveren.

### 5.3.3 E-mailcontact leerlingen

Naast de vragen via de discussiebalk was er ook contact met de leerlingen via e-mail. Hierbij betrof het vaak uitgebreidere vragen die niet eenvoudig in de discussiebalk pasten, en tevens ook minder geschikt om met de rest van de groep te delen. In het e-mailcontact kwam naar voren waarom leerlingen niet in staat waren de opdrachten (op tijd) in te leveren. Andere verplichtingen voor schoolwerk speelde hier vaak een rol in. Vanuit Pre-U en de docent is de opvatting dat schoolwerk voor gaat aan verdiepend werk zoals een masterclass. Zodoende werd er begrip getoond wanneer leerlingen om deze reden te laat hun werk inleverden. Met leerling 1, die uiteindelijk niets heeft ingeleverd, is meerdere malen e-mailcontact geweest. Ook hier was zijn huiswerk voor school de reden van uitstel. Hij gaf aan het werk later te zullen inhalen, maar dit is niet gebeurd. Leerling 4 heeft zich via de e-mail afgemeld voor de slotbijeenkomst, waarin hij aangaf erg tevreden te zijn over masterclass. Complimenten aan de docent en het lesmateriaal, het was wegens persoonlijke omstandigheden dat hij de masterclass niet kon afronden en lag niet aan de masterclass zelf.

### 5.3.4 Webconferenties

In de derde online week is er voor gekozen om de webconferentie te houden met de leerlingen. Enerzijds zou dit het contact tussen de leerlingen en de docent kunnen stimuleren en was er tevens de ruimte om vragen te stellen. De webconferentie is gepland met behulp van een datumprikker. Bij de eerste webconferentie op 30 maart waren er 5 leerlingen aanwezig, alleen leerling 1 neemt niet deel aan het overleg. De leerlingen gaven aan de dat eerste week goed verlopen was en de eerste opdracht goed te doen. Bij de tweede opdrachten hadden enkele leerlingen wat meer moeite. De opdracht is minder omljnd en de leerlingen zullen via het internet zelf onderzoek moeten doen. Het vinden van juiste informatie bleek lastig, hier zijn met elkaar wat tips uitgewisseld.

Vanuit de leerlingen was er slechts een inhoudelijke vraag. Dit ging over de verschillende soorten qubits. In de discussie kwam naar voren dat de leerling dacht dat een qubit een fysiek object is. In de praktijk is het een systeem dat in twee toestanden kan bestaan, die coderen voor 0 en 1. De wijze waarop deze twee toestanden geconstrueerd worden, maakt dat het verschillende qubits zijn.

Verder kwam naar voren dat het navigeren op de online leeromgeving niet eenvoudig blijkt te zijn. Zodoende is er tijdens de webconferentie nog een keer aandacht besteed aan het gebruik van Eurekos, het inleveren van opdrachten en de werkwijze van peer feedback. De leerlingen waren enthousiast over de eerste webconferentie en vonden het een behulpzame sessie. Op basis hier van is besloten de webconferentie vaker te houden.

Iedere week werd leerlingen de mogelijkheid geboden om vragen te stellen. Deze 'vragenuurtjes' werden niet meer gepland op basis van beschikbaarheid via een datumprikker, maar bij aanvang van de nieuwe lesweek werd deze opgenomen in de weekplanning. Na de eerste sessie zijn er nog zes andere vragenuurtjes geweest. Meestal was dit op woensdagmiddag van 16.00 tot 17.00 uur. Maar ook op maandag en vrijdag vonden deze plaats. Opvallend is dat geen enkele leerling gebruik van heeft gemaakt van deze webconferenties. De docent was tijdens dit vragenuurtje online in de chatroom, in geen van de zes sessies heeft er een leerling ingelogd.

## 5.4 Evaluaties

Er zijn een viertal wijzen waarop de masterclass geëvalueerd is en die zullen hieronder besproken worden: 1) de wekelijkse evaluatie van de leerlingen na iedere online lesweek, 2) de eindevaluatie van de leerlingen tijdens de slotbijeenkomst, 3) de eindevaluatie van de docent en 4) de eindevaluatie van het projectteam van Pre-U.

### 5.4.1 Weekevaluaties leerlingen

De weekevaluaties werden niet iedere week ingeleverd. Ook bij herhaaldelijk vragen leverde dit van sommige leerlingen geen evaluatie op. Toch is er iedere week tenminste een inzending geweest. Deze weekevaluaties zijn terug te vinden in bijlage D. De opvallendste zaken worden hier besproken.

#### Week 2

De evaluatie van week 2 is ingeleverd door leerlingen 2, 4, 5 en 6. Het niveau van de opdrachten is volgens de leerlingen goed. De opdracht met de polarisatiefilters wordt als leuk en uitdagend ervaren. Verder komt bij alle leerlingen naar voren dat ze moeten wennen aan de online leeromgeving. Het navigeren gaat soms moeilijk, het is niet precies duidelijk hoe opdrachten ingeleverd moesten worden of aan wie ze peer feedback moesten leveren.

#### Week 3

De evaluatie is enkel ingeleverd door leerling 6. De uitleg over qubits was kort maar wel voldoende en de lesvideo's over de quantumcomputer waren informatief. Doordat de invulling het opdrachten vrij waren, waarin veel moet opzocht moest vond leerling 6 dit heel leuk. Qua niveau sloot het goed aan en de tijdsbesteding kwam goed uit. Maar door het open karakter kan het ook wel lastig zijn om er te lang mee bezig te blijven.

#### Week 4

Leerlingen 2, 5 en 6 hebben de evaluatie van week 4 ingeleverd. Voor de opdrachten verschilt het per leerling hoe moeilijk ze deze week vonden. Leerling 2 vond het eenvoudig en heeft zelfs meer gedaan dan het voorgeschreven materiaal. Leerling 5 was tevreden over de opdrachten en vond alleen het begin met IBM-Q even wennen, maar daarna ging het soepel. Leerling 6 had meer moeite met de theoretische opdrachten en vond deze moeilijk. De opdracht met de *Beginners Guide* van IBM-Q werd goed ontvangen en als een leuke opdracht omschreven. Vooral omdat de leerlingen zelf kunnen experimenten met een quantumcomputer. Ook leerlingen met interesse in programmeren hebben hier de gelegenheid om zich te ontwikkelen.

#### Week 5

Ook in week 5 waren het leerlingen 2, 5 en 6 die de evaluatie hebben ingeleverd. Twee leerlingen geven aan dat deze week minder diepgang had dan de andere weken. De meningen hierover verschillen. Leerling 2 vond dit de minst leuke lesweek, nog steeds interessant maar had graag meer diepgang gezien. Leerlingen 5 en 6 waren enthousiast over de opdracht en voelden zich uitgedaagd, doordat zelf een beeld moesten vorm over toekomst en toepassingen van quantumcomputers. Leerling 2 was snel klaar met opdracht, verder wordt er niet veel gesproken over de tijdsbesteding.

### 5.4.2 Eindevaluatie leerlingen

De eindevaluatie met de leerlingen was het afsluitende onderdeel van slotbijeenkomst. Hier waren vier leerlingen aanwezig: 2, 3, 5 en 6. De belangrijkste punten uit de eindevaluatie zijn hier samengevat.

Qua tijdsbesteding was het wisselend hoe goed dit voor leerlingen beviel. Enerzijds werd er aangegeven dat ze makkelijk met de tijd uitkwamen. Leerling 2 besteedde gemiddeld een á twee uur per week, voor leerling 5 was dit twee á drie uur per week. Anderzijds besteedde leerling 3 en 6 duidelijk meer tijd per week. Hoeveel dit precies was konden ze niet duidelijk zeggen. Door het open karakter van de opdrachten bleek het voor leerling 6 moeilijk om binnen gesteld tijd te blijven. Via het internet kan je nieuwe informatie blijven zoeken en ook aan de poster kan je meer tijd besteden dan voorgeschreven. Leerling 3 heeft in het verleden ook andere, reguliere, masterclasses bij Pre-U gevolgd en vond opzet van blended learning waarin thuis meer gewerkt moest worden, samen met de vrijheid om die tijd zelf in te delen erg prettig. Dit werd door andere aanwezige leerlingen beaamd.

Bij navraag waarom de leerling na de eerste webconferentie aan geen enkele andere hebben deelgenomen, kwam naar voren dat leerlingen niet goed op de hoogte waren van deze sessies. Wanneer de leerlingen aan het

begin van de week de e-mail met mededelingen binnenkregen, gingen ze er niet vanuit dat hier veel belangrijke informatie in stond. Ze lazen de e-mail niet (grondig) en klikte vaak direct door naar de online leeromgeving. Het systeem van Eurekos heeft de mogelijkheid om zelf ook notificaties via de mail te versturen. Deze zijn voorzien van dezelfde opmaak als de mails die de docent via het systeem verstuurde. Zo ontstond bij leerlingen het beeld dat het bericht van de docent ook enkel een notificatie was en daarom minder van belang. Zodoende waren de leerlingen niet goed op hoogte van belangrijke aanwijzingen voor die lesweek en wat van hen verwacht werd. De verstuurde mails stonden ook als bericht op het dashboard in Eurekos, maar deze blijken ook slecht gelezen te worden.

Binnen de masterclass waren er voor de leerlingen ook wat onduidelijkheden. Zo was niet altijd eenvoudig om materialen op de Eurekos te vinden en door de website te navigeren. Het inleveren van opdrachten ging ook niet altijd eenvoudig. Het lezen van de wekelijkse informatiemail zou hierbij geholpen hebben. Voor de peer feedback werd aangegeven dat de leerlingen zich vaak niet zeker genoeg vonden om feedback te leveren. De leerling wist zelf niet of hij/zij de opdracht goed gemaakt had en vond zichzelf daarom niet in de positie om feedback te leveren op medeleerlingen. Ook kwam het verzoek of al het lesmateriaal van alle lesweken online zou kunnen staan bij aanvang van de masterclass. Op deze manier kunnen de leerlingen vooruitblikken op de komende weken en zo beter het grotere geheel van de masterclass zien.

Verder konden de deadlines ook strenger. Het feit dat er geen consequenties verbonden waren aan het te laat inleveren, maakt dat dat leerlingen hier lichtvaardig mee omgingen. Daarnaast was de wens om de deadlines in plaats van 18.00 uur te verplaatsen naar 23.59 uur. Ook zou de lesweek in plaats van tot vrijdag, tot zondag kunnen lopen. Vanuit school zijn de leerlingen ook gewend dat ze eventueel in het weekend huiswerk moeten maken. Door de deadline naar zondag te verplaatsen laat je de keuze aan de leerlingen of in het weekend tijd aan de masterclass willen besteden.

Als laatste gaven de leerlingen aan de dat ze voornamelijk de online lesweken als de daadwerkelijke masterclass ervoeren. De start- en slotbijeenkomst stonden hier enigszins los van. Ondanks dat de masterclass niet zo ingericht was, was de ervaring voor de leerlingen toch anders. Ook was de koppeling met Universiteit Twente niet altijd even duidelijk. In het vervolg kunnen de offline en online lesweken meer met elkaar geïntegreerd worden, waarin ook een duidelijkere connectie met de UT is.

### 5.4.3 Eindevaluatie docent

In dit Onderzoek van Onderwijs neem ik verschillende rollen in. Dat is die van onderzoeker en ontwerper maar tijdens het draaien van de masterclass ook die van de docent. In deze sectie bespreek ik de ervaringen die ik als docent tijdens de masterclass heb opgedaan.

Ik kan terugkijken op een succesvolle pilot van de eerste blended learning masterclass. Blended learning vraagt om een andere manier van lesgeven, waar zowel de leerlingen als de docent aan moeten wennen. Maar ik ben van mening dat dit uiteindelijk goed gelukt is. Vanwege communicatie die grotendeels asynchroon verloopt, zit je als docent vaak te wachten op respons van leerlingen. Dit kan verschillende vormen hebben; een reactie op een e-mail of een bericht op het forum, of het invullen van een datumprikker. Maar ook het inleveren van de opdrachten zelf. Wanneer leerlingen snel reageren is het prima. Maar als dergelijke reacties uitblijven moet je er nog een keer achteraan. Dergelijke gedrag is niet vreemd voor de omgang met leerlingen in het onderwijs, echter binnen deze masterclass ben je grotendeels aangewezen op asynchroon contact. Als docent miste ik een klassikaal moment waarin iedereen aanwezig is. Dit kan je gebruiken voor belangrijke mededelingen, nagaan of de leerlingen de lesstof begrijpen en aansporen om aan het werk te gaan. Met name leerlingen die minder zelfstandig zijn kunnen profiteren van wat extra aanmoediging. Het plannen van een vast contactmoment in de week, gaat wellicht ten koste van de vrijheid binnen blended learning. Maar ik geloof dat dit de leerlingen en de docent ten goede zal komen.

Achteraf kan gesteld worden dat de wekelijkse werkwijze niet geheel duidelijk was voor de leerlingen. Een weekopdracht en een deel van de poster maken is nog te overzien. Maar daarna voor beide type opdrachten peer feedback leveren, aan verschillende leerlingen in een online systeem dat niet overzichtelijk is, maakt het moeilijk. Gedurende de masterclass de deadlines aanpassen en overgaan op individuele opdrachten heeft geholpen de masterclass overzichtelijker te maken. Bij de peer-feedback van de weekopdrachten miste een moment van verwerking. De opdracht was ingeleverd, sommige leerlingen kregen feedback. Daarna was er wel een mogelijkheid om na het weekend de opdracht opnieuw in te leveren. Dit heb ik echter niet duidelijk

gecommuniceerd en daarnaast was de nieuwe lesweek ook al begonnen. Zodoende werd de feedback niet echt verwerkt.

Tevens deel ik de mening van de leerlingen dat de online leeromgeving Eureka niet bijzonder gebruiksvriendelijk is. In voorbereiding naar de masterclass, waarin het lesmateriaal in Eureka werd geïmplementeerd liep ik, samen met Jeroen de Vin, tegen technische moeilijkheden. En ook tijdens de masterclass werkt Eureka soms omslachtig en zitten er meerdere bugs in het systeem. Ondanks dat Eureka al vaker gebruikt wordt, bleek dat met deze blended learning masterclass de volledige functionaliteiten van het systeem getest werden. Vragen en bugs zijn doorgespeeld naar de UT-verantwoordelijke voor dit systeem, maar van hier uit kon er op weinig technische ondersteuning gerekend worden. Toch lijkt Eureka een geschikt systeem voor blended learning masterclasses, maar in het vervolg zal er meer technische ondersteuning moeten plaats vinden. Als de UT besluit niet meer aandacht te besteden aan Eureka kan het lonen om verder te kijken naar andere systemen.

#### 5.4.4 Eindevaluatie projectteam Pre-U

Na afloop heeft het projectteam van Pre-U, met afwezigheid van TELT en Jeroen de Vin, ook teruggeblikt op de blended learning masterclass quantumcomputing. Hierin is de eindevaluatie van de leerlingen besproken, alsmede de feedback vanuit de docent/ontwerper. Er wordt positief teruggekeken op de eerste uitvoering van de masterclass. Er zijn voldoende verbeterpunten maar men is zich bewust dat het een pilot betreft en juist deze punten in de toekomst voor een betere blended learning masterclass zullen zorgen.

Het projectteam onderschrijft de evaluatiepunten die vanuit de leerling en de docent/ontwerper naar voren komen. Uiteindelijk zal men tijdens de eindevaluatie van het projectteam voornamelijk de verbeterpunten verder uitwerken om zo tot enkele wijzigingen te komen die voor een volgende blended masterclass quantummechanica doorgevoerd kunnen worden. Hier gaat het bijvoorbeeld om het aanpassen van de globale en weekstructuur, het betrekken van vakgroep NanoElectronics en het invoeren van een vast contactmoment. Deze voorgestelde wijzigingen zullen in paragraaf 5.6 uitgebreider besproken worden.

Voordat een volgende blended learning masterclass van start gaat, zal eerst de blended learning masterclass ondernemerschap plaats vinden. Tijdens de eindevaluatie is gekeken welke verbeterpunten ook voor deze masterclass relevant zijn. Dit zijn de algemene verbeterpunten aangaande blended learning om de leerlingen betrokken te houden. De masterclass ondernemerschap kent wel een andere weekstructuur, deze voorgestelde wijzigingen zijn daardoor niet van toepassing.



## 5.5 Toetsen van eisen

Op basis van het vooronderzoek in hoofdstuk 2 werden twaalf eisen opgesteld waaraan het ontwerp van de blended learning masterclass quantummechanica moest voldoen. Op basis van het ontwerp uit hoofdstuk 3 en de resultaten uit hoofdstuk 5, zullen de eisen getoetst worden. Bij het langslopen van de eisen zijn meerdere invalshoeken. Enerzijds kan er vastgesteld worden of aan de ontwerpeis voldaan is, anderzijds is er de vraag of na het doorlopen van de ontwerpcyclus, de ontwerpeis nog steeds juist is en of deze aangepast moet worden. Bij het toetsen van de eisen zullen beide aspecten, waar nodig, behandeld worden.

### 1. Past in het huidige masterclassaanbod; verdiepend lesprogramma en kennismaking met de UT.

Als geheel past de masterclass goed in het huidige masterclassaanbod van Pre-U. De quantumcomputer is een vergelijkbaar type onderwerp ten opzichte van de andere masterclasses en biedt voldoende ruimte aan leerlingen om zich te verdiepen naast hun reguliere lesstof. Bij de start- en slotbijeenkomst kan de leerling kennismaken met de UT. Daarbij moet opgemerkt worden, dat tijdens de online lesweken de leerlingen aangeven een minder duidelijke koppeling met de UT te zien. Dit zou verder versterkt kunnen worden.

### 2. Globale structuur van een startbijeenkomst, vier online sessies en een slotbijeenkomst.

De globale structuur is gerealiseerd in het ontwerp van de masterclass. Ondanks dat in het ontwerp de start- en slotbijeenkomst, inhoudelijk deel uitmaken van de masterclass en niet enkel 'organisatorische' bijeenkomsten zijn, ervoeren de leerlingen dit bij de eindevaluatie anders. De bijeenkomsten en online weken zouden meer geïntegreerd kunnen worden.

### 3. Volgt de voorgestelde weekstructuur, met een tijdsbesteding van 4 uur per leerling per week.

De masterclass volgt de voorgestelde weekstructuur en is getest. Maandagochtend kwamen de materialen voor die lesweek online, woensdagavond was de deadline voor de opdrachten en vrijdagmiddag voor de peer feedback. De tijdsbesteding per leerlingen is wisselend, sommigen kwamen goed uit met de tijd of besteedde minder dan vier uur per week. Hierbij moet opgemerkt worden, dat deze leerlingen tijdens de week nog niet bezig waren met de posteropdracht. Andere leerlingen besteedde meer dan vier uur per week. Vanwege het open karakter van de opdrachten was het moeilijk om te beslissen wanneer ze voldoende informatie verzameld hadden en de opdracht klaar was. Meer sturing van tevoren kan hierbij helpen.

Vanuit de evaluaties kwam naar voren dat de weekstructuur aangepast kan worden. Zo gaven leerlingen aan leerlingen liever deadlines tot 23.59 uur hebben en de mogelijkheid om ook in het weekend te werken. Dit tweede is later in de masterclass ook ingevoerd. Op basis van de evaluaties is er een voorstel voor een nieuwe weekstructuur. Deze wordt hieronder in paragraaf 5.6 in besproken.

### 4. Aansluiten bij de voorkennis van leerlingen uit vwo 6, onderlinge verschillen in acht nemend.

Aan de pilot hebben geen leerlingen uit vwo 6 deelgenomen, zodoende is het niet mogelijk om met deze doelgroep te evalueren of de masterclass aansloot bij hun voorkennis. Wel kan er op basis van het ontwerp een inschatting gemaakt worden. De keuze van het deelonderwerp maakt dat de masterclass naast het vwo-curriculum staat. De lesstof uit vwo 6 komt niet overeen met de behandelde onderwerpen uit de masterclass, wel kan de opgedane voorkennis bijdragen om de concepten uit de masterclass beter te begrijpen.

### 5. Ook zonder deze voorkennis kunnen leerlingen uit vwo 5 aansluiten.

Op basis van de ingeleverde opdrachten en ervaringen van de leerlingen kan gesteld worden dat het instapniveau van de leerlingen goed aansloot om deel te kunnen nemen aan de masterclass.

### 6. Het lesmateriaal wordt opgenomen in de online leeromgeving Eureka.

In het kort, aan deze eis is voldaan. Het lesmateriaal is opgenomen in Eureka. Echter door de masterclass een keer uit te voeren komen er meerdere inzichten naar boven hoe de online leeromgeving in de praktijk gehanteerd wordt. Zowel de leerlingen als docent geven aan dat het navigatie en gebruik lastig is. Hier zal bij de startbijeenkomst meer aandacht aan besteed moeten worden, ook zou meer technische ondersteuning vanuit de UT helpen om het systeem gebruiksvriendelijker te maken.

## 7. Het lesmateriaal wordt voorzien van micro lectures.

Vanwege tijdsgebrek is het niet gelukt het om zelf micro lectures op te nemen. Dit is verder al toegelicht in paragraaf 3.2.4. In plaats micro lectures is er voor gekozen bestaande lesvideo's, vaak van YouTube, in te zetten als lesmateriaal. Daarnaast zijn er ook twee micro lectures in samenwerking met student Esli Diepenbroek verzorgd. Voor een volgende uitvoering van de masterclass is het nog wel mogelijk om zelf videomateriaal op te nemen en te implementeren. Echter omdat met de huidige oplossing de masterclass ook goed uitgevoerd is, hoeven eigen micro lectures geen eis te zijn aan het ontwerp, mits er geschikte alternatieven voorhanden zijn. Wel zou eigen videomateriaal kunnen bijdragen aan meer verbinding tussen de docent en de leerlingen en professionelere uitstraling met zich meebrengen.

## 8. Quantummechanica afbakenen met een deelonderwerp.

Door quantummechanica te illustreren aan de hand van de quantumcomputer is het gelukt om het onderwerp af te bakenen met een deelonderwerp. Het onderwerp leent zich goed om de concepten spin, superpositie en verstrengeling uit leggen. Daarnaast is het een duidelijke toepassing die laat zien hoe quantummechanica in de praktijk toegepast kan worden en mogelijkheden biedt die vanuit een klassieke wereld niet mogelijk zijn.

## 9. Minimale wiskundige benadering; conceptuele aanpak met voorbeelden en toepassingen.

Het is gelukt om een conceptuele aanpak toe te passen in de lesstof. In de inhoudelijke verdieping ligt de focus op spin, superpositie en verstrengeling. Deze worden aan de hand van het Stern-Gerlach-experiment en de qubit duidelijk gemaakt. De quantumcomputer is op zichzelf ook al een toepassing wat er met de concepten uit te quantummechanica mogelijk is. De wiskundige benadering is zoveel mogelijk beperkt, de wiskunde die gebruikt is sluit zoveel mogelijk aan bij het niveau van 5-6 vwo.

## 10. Blended learning; klassikaal en digitaal onderwijs combineren, actieve rol voor docent.

Op basis van de definitie en beslissingsboom van Friesen (2012) kan gesteld worden dat er in deze masterclass sprake is van blended learning, ook komt het gerealiseerde ontwerp overeen met de wensen van Pre-U voor blended learning.

## 11. De vier key-challenges van Boelens komen terug in het ontwerp.

### 1. Flexibiliteit verwerken

De flexibiliteit in *tijd* in deze masterclass wordt geboden doordat leerlingen tijdens de online lesweken zelf kunnen bepalen wanneer ze de opdrachten maken. Hierbij zijn ze wel gebonden aan deadlines wanneer het werk af moet zijn. Verder zijn ze tijdens online lesweken ook vrij in de *plaats* waar ze aan opdrachten werken. Er is minder flexibiliteit in het *pad* en *tempo* dat de leerlingen hanteren. De masterclass heeft een vaste structuur met lesweken die elkaar opvolgen.

### 2. Interactie bevorderen

Voor deze masterclass is er sterk ingezet op het bevorderen van interactie. Bij de startbijeenkomst wordt aandacht besteed aan kennismaking om zo een groepsgevoel te creëren dat tijdens de online weken bijdraagt in de samenwerking. Interactie bij de opdrachten zit in de peer feedback doordat de leerlingen elkaar werk beoordelen. Doordat de opdrachten niet (op tijd) werden ingeleverd kwam de peer feedback echter niet opgang. De discussiebalk, forum en webconferenties waren er ook op gericht interactie te bevorderen. Ook hier werd echter spaarzaam gebruik van gemaakt. Toch heeft er wel interactie tussen de leerlingen en docent plaats gevonden, dit had echter meer kunnen zijn.

### 3. Leerproces ondersteunen

Om het leerproces te ondersteunen is er tijdens de startbijeenkomst georiënteerd op de masterclass en is er aandacht besteed aan de organisatie. Achteraf blijkt dat dit nog beter had gekund. Verder stuurde docent iedere week een informatiemail waarin werd aangegeven wat er van de leerlingen verwacht werd, deze werd helaas slecht gelezen. Gedurende de masterclass is de voortgang door de docent gemonitord. Toen bleek dat de meeste leerlingen met het werk achterliepen, is er besloten de tussenweek in te lassen. Bij het uitblijven van goede peer feedback is er overgestapt op individuele opdrachten met feedback van de docent.

### 4. Affectief leerklimaat stimuleren

Om binnen de masterclass een affectief leerklimaat te stimuleren is het wenselijk dat leerlingen zich op hun gemak voelen. Dit was onder andere een uitgangspunt voor de startbijeenkomst. De teksten op de online leeromgeving zijn ook in actieve toon geschreven zodat de leerling meer betrokken voelt ten opzichte van een passieve tekst. In het contact met de docent en gegeven feedback is er gebruik gemaakt van een positieve toon waarin de leerlingen worden gecompimenteerd en aangespoord.



## 12. Het lesmateriaal moet voor aanvang van de masterclass op 16 maart worden opgeleverd.

De datum voor de startbijeenkomst lag vast, dit betekende dat vóór aanvang van de masterclass het lesmateriaal klaar moest zijn. De startbijeenkomst was al eens opgeschoven, in verband met te weinig aanmeldingen in eerste instantie. Ondanks deze uitstel is het niet gelukt om voor aanvang de startbijeenkomst op 16 maart al het lesmateriaal klaar te hebben. De startbijeenkomst en eerste lesweek waren op dat moment al wel af. Vervolgens zijn tijdens de lesweken de materialen voor de volgende weken doorontwikkeld en opgeleverd, dit heeft uiteindelijk geen nadelige gevolgen gehad voor het verloop van de masterclass.

## 5.6 Voorgestelde wijzigingen

In dit hoofdstuk is het ontwerp van de blended learning masterclass geëvalueerd. Hierin kwamen naar aanleiding van de verbeterpunten verschillende voorstellen voor eventuele wijzigingen naar voren. Deze zullen in deze sectie verder besproken worden. Voor een volgende uitvoering van de masterclass zullen deze voorgestelde wijzigingen nog wel verder in detail moeten worden uitgewerkt.

### Nieuwe naam

Vanaf het begin van de ontwikkeling ging het om een blended learning masterclass over quantummechanica en dit was ook tevens de titel. Nu de masterclass ontwikkeld is en inhoud bekend is, blijkt de titel 'Quantummechanica' te breed voor de masterclass. De nieuwe titel 'De Quantumcomputer' dekt de inhoud beter en zal voor volgende masterclasses gebruikt worden.

### Communicatie

Voortaan zullen aankondigingen via de reguliere e-mail verstuurd worden, in plaats vanuit het systeem van Eurekos. Het blijkt dat e-mails vanuit Eurekos weinig tot niet gelezen worden, wellicht omdat deze veel lijken op notificaties die Eurekos automatisch stuurt. Aankondigingen vanuit de docent worden hopelijk beter gelezen, maar de verantwoordelijkheid ligt bij de leerling.

### Webconferentie

Om de betrokkenheid en het onderlinge contact te vergroten wordt er op een vast moment in de week een webconferentie gehouden. Tijdens deze sessie kan er teruggeblikt worden op de voorgaande week en algemene feedback door de docent gegeven, ook kan er vooruitgeblikt worden op de huidige lesweek. Een voorstel is om deze op dinsdag of woensdag te laten plaats vinden. De leerlingen hebben dan de kans gehad om eerst zelf naar het lesmateriaal voor die week te kijken en op basis daarvan vragen te formuleren. De docent kan waar nodig ook nog extra uitleg geven. Ook kan deze sessie als extra herinnering werken, om met de opdrachten aan de te gaan.

### Startbijeenkomst

Het is duidelijk geworden dat de startbijeenkomst essentieel is voor het goed verlopen van de masterclass. Tijdens deze bijeenkomst moet er meer aandacht aan de online leeromgeving gegeven worden. Gezamenlijk wordt er door Eurekos genavigeerd en oefenen de leerling met het inleveren van een proefopdracht. Dit kan bijvoorbeeld de poster van de brainstorm zijn. Daarnaast is er meer aandacht voor peer feedback, hiermee zal ook geoefend worden tijdens de startbijeenkomst.

### Globale structuur

De nieuwe globale structuur begint hetzelfde, met een startbijeenkomst en vier online lesweken. Echter in plaats van de eindopdracht parallel te laten lopen in de online lesweken, wordt deze nu na de vier inhoudelijke weken geplaatst en is de eindopdracht aan het einde van de masterclass. Na het inhoudelijke deel, krijgen de leerlingen instructie over de eindopdracht en peer feedback. Na een week wordt de conceptversie van de eindopdracht ingeleverd, hierna volgt een week waarin peer feedback plaats vindt en mogelijkheid tot het aanpassen van de eindopdracht. Daarna volgt de laatste week met de definitieve deadline en de slotbijeenkomst op de UT. Een overzicht van de nieuwe globale structuur is te zien in tabel 5.3.

### Weekstructuur

In de nieuwe weekstructuur staat alle content al online, behalve de opdrachten. Leerlingen kunnen alvast vooruit kijken en zien waar ze de komende weken mee te maken krijgen. De weekopdrachten worden wel per lesweek bekend gemaakt op maandagochtend. Opdat de leerlingen niet te ver vooruitwerken. Op dinsdag of woensdag is er vast een uur webconferentie ingepland. Bij het inleveren van de weekopdrachten kunnen de leerlingen kiezen voor tussentijdse feedback van de docent. Voor tussentijdse feedback kan de leerling de opdracht donderdag om 23.59 uur inleveren, de definitieve deadline is op zondag 23.59 uur.

| Lesweek | 1              | 2 t/m 5                                    | 6                     | 7                                       | 8                                        |
|---------|----------------|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Inhoud  | Start op de UT | Online les 1 t/m 4                         | Start<br>Eindopdracht | Deadline concept<br>Start peer feedback | Definitieve deadline<br>Afsluiting op UT |
| Tijd    | 3 uur          | 2 - 3 uur zelfstandig<br>1 uur videobellen | n.t.b.                | n.t.b.                                  | 3 uur                                    |

**Tabel 5.3.** Overzicht van een nieuwe globale structuur voor de masterclass.

### Samenwerking NanoElectronics

Eerder kwam er al naar voren om in het vervolg zelf micro lectures op te nemen, om Eurekos meer van eigen videomateriaal te voorzien. Daarnaast kwam ook naar voren dat tijdens online lesweken de koppeling met Universiteit Twente niet heel duidelijk is. Meer samenwerking met de vakgroep NanoElectronics zou hier aan kunnen bijdragen. Zo zouden enkele lesvideo's in het lab kunnen worden opgenomen of een professor, dan wel PhD-student, die uitleg geeft en een opdracht introduceert. Tijdens de rondleiding ontvingen de leerlingen een speciale uitgave van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde geweid aan quantumcomputers. Het zou interessant zijn om deze al aan tijdens de startbijeenkomst uit te delen. Op deze wijze hebben de leerlingen extra materiaal dat ze kunnen raadplegen tijdens masterclass.

# Conclusie

Vanuit Pre-U bestond de wens voor een blended learning masterclass waarbij quantummechanica als onderwerp gekozen werd. Op basis van een vooronderzoek is deze masterclass vervolgens gerealiseerd en aan de hand van een pilot geëvalueerd. Het eindresultaat is een lespakket waarmee de masterclass bij Pre-U uitgevoerd kan worden. In dit hoofdstuk wordt teruggeblikt op het ontwerpend onderzoek en conclusies getrokken.

Voor dit ontwerpend onderzoek geldt de volgende hoofdvraag:

## **Hoe kan een effectieve blended learning masterclass van Pre-U over quantummechanica voor leerlingen in 5/6 vwo er uitzien?**

Het antwoord op de deze hoofdvraag laat zich moeilijk in een korte omschrijving vatten. Dit verslag in het geheel draagt bij aan dit antwoord. Het uiteindelijke lesmateriaal is daarvan het meest tastbare voorbeeld. Om toch tot een gedetailleerder antwoord te komen zullen de deelvragen afzonderlijk beantwoord worden.

### **1. Wat zijn de eisen waaraan het ontwerp voor de masterclass moet voldoen en hoe verhouden deze zich tot wensen van Pre-U en aanbevelingen vanuit de literatuur?**

Naar aanleiding van de wensen van het Pre-U, de gestelde randvoorwaarden en aanbevelingen vanuit de literatuur zijn er een twaalfstal eisen opgesteld waaraan de masterclass moest voldoen. Duidelijk is dat de visie van Pre-U op blended learning in de juiste richting is. Door middel van literatuur, zoals de key challenges van Boelens e.a. (2017) en de definitie van Friesen (2012), kon de invulling van blended learning in de masterclass verder worden aangescherpt. Voor het onderwerp quantummechanica waren er vanuit Pre-U geen specifieke wensen, hiervoor is voornamelijk de literatuur geraadpleegd samen met de ervaring van de ontwerper. De lijst met eisen is terug te vinden in paragraaf 2.3. De eisen diende als uitgangspunt voor het ontwerpproces van de masterclass. Op basis van de gevonden resultaten zijn deze eisen getoetst. Hierin komt naar voren dat aan de meeste eisen voldaan is. Echter bij de meeste eisen is er wel een kanttekening geplaatst die tot verbetering van het ontwerp kan leiden. Het toetsen van de eisen kan als volgt worden samengevat:

De masterclass past in het huidige aanbod bij Pre-U en het is een verdiepend lesprogramma. Om de kennismaking met UT te bevorderen kan deze meer geïntegreerd worden in de online weken. De globale structuur van een startbijeenkomst, vier online sessies en een slotbijeenkomst werkt. De online en offline weken kunnen wel meer met elkaar verbonden worden. De weekstructuur kan verbeterd worden door de deadlines te verruimen en het weekend in de lesweek te betrekken. De tijdsbesteding verschilt per leerling maar komt overeen met het gestelde doel van 4 uur per week. Leerlingen die hier moeite mee hebben, zouden meer sturing kunnen krijgen. Op basis van een inschatting kan gesteld worden dat de masterclass aansluit de voorkennis van leerlingen uit vwo 6, dit is echter nog niet getest met deelnemers. Voor leerlingen uit vwo 5 is de aansluiting op basis van hun voorkennis goed. De online leeromgeving Eureka voldoet om een blended learning masterclass aan te bieden, wel zijn er aandachtspunten omtrent de implementatie en gebruik tijdens de masterclass. Een uitgebreidere uitleg aan de leerlingen aan het begin en meer technische ondersteuning zou Eureka gebruiksvriendelijker kunnen maken. Het opnemen van de micro lectures, is de enige eis waaraan niet voldaan is. In online lesvideo's en een samenwerking met een student uit het honoursprogramma, is echter een goed alternatief gevonden. Eigen micro-lectures kunnen alsnog later aan het lesmateriaal worden toegevoegd. Dit is echter niet noodzakelijk voor het slagen van de masterclass. Door de quantumcomputer als deelonderwerp te kiezen was het mogelijk de quantummechanica af te bakenen en tevens, via een conceptuele aanpak, met voorbeelden en toepassingen aan te leren. Volgens de gekozen definitie kan vastgesteld worden dat de masterclass als blended learning geldt en de vier key challenges van Boelens komen terug in het ontwerp. De laatste eis betrof de deadline voor het opleveren van het lesmateriaal. Deze is niet strikt gehaald, maar heeft uiteindelijk geen gevolgen gehad voor de uitvoer van masterclass.

Op basis van de toetsing kan geconcludeerd worden dat de meeste eisen voldaan zijn en deze ook juist gekozen zijn. Echter aan de hand van invulling van de eisen zijn er wel enkele verbeterpunten te benoemen. Deze zijn ook besproken in het vorige hoofdstuk. Voor een enkele eis kan gesteld worden, dat deze achteraf niet juist (geformuleerd) is. Zo blijkt eigen videomateriaal niet noodzakelijk te zijn voor de masterclass. Er zijn alternatieven ingezet en hiermee is de masterclass succesvol uitgevoerd. Wel blijft de aanname dat eigen videomateriaal kan bijdragen aan continuïteit tussen de lesweken en voor een professionelere uitstraling zorgt.

## **2. Wat is de leeropbrengst van de leerlingen na afloop van masterclass, in hoeverre zijn de gestelde leerdoelen behaald?**

Aan de hand van een brainstorm en posters is de voorkennis van de leerlingen vastgesteld. Voor aanvang van de masterclass hadden de leerlingen uit 5 vwo een beperkt beeld van quantummechanica inhiel. Ze waren bekend met het begrip, maar wisten niet precies wat inhiel. Het onderwerp was nog niet formeel behandeld tijdens de natuurkundelessen. Daarnaast waren sommige leerlingen al bekend met het concept van een quantumcomputer, andere nog niet. Tijdens de online lesweken is quantummechanica geïllustreerd aan de hand van de quantumcomputer. Er werd aandacht besteed aan de quantummechanische principes die ten grondslag aan de quantumcomputer liggen en de hardware van een quantumcomputer, waarbij de qubit zorgt voor een overtreffende rekenkracht ten opzichte van de klassieke computer. De rekenkracht werd nader onderzocht doordat leerlingen eenvoudige algoritmes hebben getest in IBM-Q. In de laatste week werden verschillende toepassingen behandeld en zijn deze door de leerlingen verder uitgewerkt. Na afloop van de masterclass waren twee leerlingen in staat een posterpresentatie te geven over de quantumcomputer, aan de hand van inhoud van de online lesweken.

Op basis van het werk van de leerlingen kan vastgesteld worden dat de algemene leerdoelen uit paragraaf 3.2.1 behaald zijn. De leerlingen kunnen de begrippen in spin, superpositie en verstrengeling in eigen woorden uitleggen. Het begrip van verstrengeling blijkt voor sommige leerlingen nog wel een moeilijk concept te zijn. Aan de hand van de exponentiële rekenkracht die gepaard gaat met qubits kunnen de leerlingen aangeven wat het verschil tussen een klassieke computer en een quantumcomputer is. Ze zijn bekend met enkele quantumlogische poorten en kunnen deze demonstreren aan de hand van IBM-Q. In de laatste online lesweek is er een eigen gekozen toepassing verder toegelicht. Als afsluiting hebben de leerlingen hun bevindingen van de masterclass vertaald naar een wetenschappelijke poster en deze gepresenteerd.

## **3. Wat zijn de ervaringen van de leerlingen, docent en Pre-U na afloop van de masterclass?**

In de evaluaties en interacties komt naar voren dat de leerlingen de masterclass en bijhorende opdrachten leuk vinden. Een goed gegeven, aangezien een enthousiasme een belangrijke voorwaarde is om tot leren te komen. Ook Pre-U en de docent kijken tevreden terug op de masterclass.

Een belangrijk voordeel dat de leerlingen dat de leerlingen noemen, is de vrijheid die blended learning met zich mee brengt. Door het ontbreken van vaste bijeenkomsten kunnen ze zelf bepalen waar en wanneer ze aan de masterclass werken. De docent geeft echter aan dat hij wel een vast contactmoment in de week mist, waarin hij eenvoudig eventuele onduidelijkheden kan behandelen en daarnaast de leerlingen kan motiveren. Doordat de weekopdrachten open zijn, kunnen leerlingen zelf kiezen hoe ver ze zich willen verdiepen in een onderwerp. Dit wordt als positief ervaren. Het verschilt per leerling hoe ver ze hierin gaan. Sommige leerlingen hebben juist ook moeite met deze vrijheid, waarin het lastig kan zijn om een opdracht af te ronden. De peer-feedback opdrachten bleken voor de leerlingen moeilijker te zijn, in het bijzonder wanneer leerlingen niet bekend zijn met deze werkvorm. Zo gaven de leerlingen aan dat uitleg vooraf niet voldoende was, ook hadden ze het idee dat ze de stof niet goed genoeg begrepen om goede feedback op elkaar te kunnen leveren. Hier zal in het vervolg meer aandacht besteed moeten worden. Ook vanuit de docent en Pre-U kwam naar voren dat deze werk vorm niet voldoende uitgewerkt was om succesvol te zijn.

Wat de organisatie van de masterclass betreft gaven de leerlingen aan dat de deadlines strakker gehandhaafd konden worden. Doordat de deadlines minder streng waren, gingen de leerlingen er ook losser mee om. Een aanpassing van de weekstructuur met deadlines aan het eind van de dag en bijvoegen van het weekend in de lesweek, zouden volgens de leerlingen ook kunnen bijdragen aan het tijdig inleveren van de opdrachten.

Via de interactie en de evaluaties komt de online leeromgeving Eurekos vaak als aandachtspunt naar voren. De keuze vanuit Pre-U, op aanraden van TELT, om met Eurekos te werken is een verantwoorde keuze geweest. De UT heeft een licentie op het systeem, het biedt een leeromgeving die Pre-U niet zelf op korte termijn kan realiseren en Eurekos is specifiek gericht op blended learning. De praktijk leert echter wel dat de omgang met het systeem niet vanzelfsprekend is. Gebruikers hebben moeite met navigeren en opdrachten inleveren. Ook waren er enkele moeilijkheden bij de technische implementatie en heeft het systeem ook enkele bugs.

Samenvattend kan gesteld worden dat de pilot van de eerste blended learning masterclass geslaagd is. Het is een nieuwe vorm van onderwijs waarbij Pre-U nog geen ervaring mee was. Door op een systematische manier de ontwerp vraag aan te pakken, heeft dit onderzoek van onderwijs er aan bijgedragen meer inzicht te creëren hoe blended learning bij de masterclasses van Pre-U kan worden ingezet. Daarnaast heeft het onderwerp van quantummechanica een toevoeging geleverd aan het masterclassaanbod. De lijst van eisen biedt houvast voor zowel randvoorwaarden gesteld door Pre-U en aanwijzingen vanuit de literatuur. Zowel voor het blended learning, als vakspecifiek voor het onderwijzen van quantummechanica. De leeropbrengst laat zien dat de leerlingen na afloop meer weten over de quantumcomputer en bekend zijn met de onderliggende principes uit de quantummechanica. Tevens zijn de ervaringen van de leerlingen, de docent en Pre-u positief over de masterclass, maar komen uit de evaluaties ook verschillende verbeterpunten naar voren. Het zijn juist deze verbeterpunten die van belang zijn. Het betreft immers een pilot. Alle verkregen inzichten kunnen een bijdrage leveren om blended learning masterclasses bij Pre-U naar een hoger niveau te tillen.



Als laatste hoofdstuk zullen de resultaten uit dit onderzoek van onderwijs bediscussieerd worden. Zo zijn er enkele kanttekening te plaatsen door de breedte van het onderzoek zoals deze is uitgevoerd. Er wordt teruggekeken hoe masterclass aansluit bij de oorspronkelijke doelen van Pre-U en hoe blended learning in de context van non-formeel onderwijs geplaatst kan worden. Afsluitend zijn er aanbevelingen voor volgende ontwikkelingen aan deze masterclasses en blended learning bij Pre-U in het algemeen.

## 7.1 Kanttekeningen

Bij aanvang was er binnen Pre-U nog geen enkele ervaring met het opzetten van blended learning. Dit maakt dit onderzoek van onderwijs een omvangrijk project, omdat er zonder eerdere basis een volledig ontwerp gerealiseerd moest worden. Daarnaast betrof het een pilot, zodat het ontwerp ook in de praktijk getest kon worden. Zodoende is er besloten dit onderzoek breed op te zetten waarin alle aspecten van het ontwerpproces aan bod komen. Dit resulteerde in een afgerond ontwerp dat tijdens de pilot getest kon worden. Echter door de brede focus van het onderzoek zou er geargumenteed kunnen worden dat enkele onderdelen grondiger uitgevoerd konden worden. Denk bijvoorbeeld aan het opzetten van de peer-feedback opdrachten, beter kwalitatief analyseren van de ervaringen van de leerlingen, door bijvoorbeeld het coderen van audio-opnames, of een uitgebreidere evaluatie van de online leeromgeving. Vanwege de omvang van de opdracht kon hier niet aan voldaan worden. Het heeft echter niet tot een belemmering van de pilot geleid. Er is een goede indruk verkregen wat blended learning masterclasses bij Pre-U inhouden. Vanuit de opdrachten en evaluaties zijn er voldoende aandachtspunten om de masterclass te kunnen verbeteren. Ook hebben er tijdens de uitvoer van masterclass enkele wijzigingen plaatsgevonden: de tussenweek is ingelast, de peer feedback-opdrachten zijn vanaf lesweek 4 geschrapt en de deadlines zijn verruimd naar het weekend. Uiteindelijk is hierdoor het oorspronkelijk ontwerp niet volledig getest. Dit heeft echter geen nadelige gevolgen voor de masterclass gehad. Aangezien de tussentijdse wijziging in het belang waren voor het verlopen van de masterclass en het verdere verloop dit ook uitwees.

Door het kleine aantal leerlingen dat deelgenomen heeft, bestaat de kans er in de evaluatie een eenzijdig beeld naar voren komt. In een ideale situatie hadden er ook meer dan zes leerlingen de masterclass gevolgd. Echter doordat de groep kleiner was, was het mogelijk om op een kwalitatieve wijze te evalueren. Deze kwalitatieve aanpak biedt ook meer inzicht in de goede punten en verbeterpunten van de masterclass, ten opzichte van een kwantitatieve evaluatie.

Voor dit Onderzoek van Onderwijs waren er twee componenten nieuw voor ontwikkeling van een masterclass: blended learning en quantummechanica. Naar beide is vooronderzoek gedaan en dat heeft geresulteerd in een ontwerp. In de evaluatie hiervan komen zowel de ervaringen van blended learning naar voren als de leeropbrengst bij quantummechanica. Echter een objectieve blik laat zien dat bij de evaluaties, en daaraanvolgend, de voorgestelde wijzigingen zich vooral richten op het verbeteren van de masterclass in praktische zin, gericht op blended learning. Dit betekent niet dat de vakdidactiek voor quantummechanica perfect is. Echter in de evaluaties komen geen duidelijke signalen voor wijzigingen aan het lesmateriaal naar voren. Dit kan deels verklaard worden aan de hand van betrokken partijen: De betrokken leerlingen werden voor het eerst geïntroduceerd in dit ontwerp, ze hebben geen uitgebreide voorkennis en zullen de gepresenteerde informatie in de masterclass voor waar aannemen. Ook binnen het projectteam was er, met uitzondering van de ontwerper, niet veel expertise op het gebied van quantummechanica. Dan rest ontwerper zelf nog. Deze heeft uiteraard wel goed nagedacht over de vakdidactiek en deze zo goed mogelijk toegepast, alleen is het voor deze ook moeilijker om objectief vast te stellen waar eventuele verbeteringen aan het lesmateriaal doorgevoerd kunnen worden. Bij andere reguliere masterclasses bij Pre-U worden de studentontwikkelaars ondersteunt door vakinhoudelijke specialisten en vakdidactici, dan wel betrokken docenten uit het voorgezet onderwijs. Los van de gesprekken tussen de ontwerper en begeleider Henk Pol en een adviserend gesprek met VO-docent Sander Wenderich is er niet inhoudelijk door een expert uitgebreid naar lesmateriaal gekeken. Om de masterclass ook inhoudelijk sterker te maken is dit wel wenselijk

Een van de aanleidingen binnen Pre-U om met blended learning masterclasses te starten, was om meer leerlingen van buiten de regio te betrekken bij de projecten van Pre-U en ze kennis te laten maken met de UT. Bij een interne evaluatie van de Pre-U-staff is besloten om de blended learning masterclasses niet verder in te zetten om leerlingen van buiten de regio aan te trekken. De tegenvallende aanmeldcijfers voor de beide blended learning masterclasses spelen hier een rol in. Het blijkt moeilijker dan verwacht om voldoende aanmeldingen te ontvangen. Dit deels te wijten aan het feit dat er minder goed contact is met scholen buiten de regio en het direct bereiken van leerlingen, zonder bemiddeling van de school, erg moeilijk is. Ook blijkt dat via andere projecten van Pre-U, eenvoudiger leerlingen van buiten de regio bereikt worden. Toch zullen de blended learning masterclasses een onderdeel van Pre-U blijven en zijn deze masterclasses opgenomen in het reguliere aanbod. Want ook voor leerlingen die wel in de regio wonen, blijkt dat zes bijeenkomsten op de UT als drempel ervaren wordt om een masterclass te volgen. Voor leerlingen uit, bijvoorbeeld, Haaksbergen of Almelo kan in dit geval een blended learning masterclass uitkomst bieden.

Los van de kleine groep aanmelding is het ook opvallend dat niet alle leerlingen het einde van de masterclass halen. Slechts twee van de zes leerlingen binnen dit onderzoek hebben alle weekopdrachten en de eindopdracht ingeleverd. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in het type onderwijs dat masterclasses bij Pre-U zijn. Gedurende deze pilot is blended learning benaderd als een nieuwe vorm van onderwijs dat toegepast kan worden in de masterclasses van Pre-U. Blended learning komt voort uit formeel onderwijs, waarin online middelen worden ingezet om, onder andere, meer flexibiliteit te implementeren. Echter masterclasses bij Pre-U kunnen niet aangemerkt worden als formeel onderwijs, maar als non-formeel onderwijs. Een masterclass is een verdiepend lesprogramma voor leerlingen die iets extra willen naast hun vwo-curriculum, daarnaast is een masterclass ook facultatief. Het moment dat leerlingen voor een reguliere masterclass zes bijeenkomsten op de universiteit bijwonen draagt dit bij aan de beleving van formeel onderwijs. De huidige opzet van de blended masterclass heeft dit een stuk minder, wanneer de leerlingen vier weken zelfstandig online werken. Hierdoor zijn de online weken ook te vergelijken met een MOOC, Massive Open Online Course. Het verschil bij MOOC's is dat de gehele cursus online gegeven wordt, de mate van interactie en persoonlijke feedback vanuit de docent kan variëren. De deelname en betrokkenheid, tegenover uitval is een bekend aandachtspunt bij MOOC's. Zo schrijven Jung en Lee (2018) dat gemiddeld 3% tot 6% van de deelnemers een MOOC voltooid. Kijkend hoe binnen deze masterclass verschillende leerlingen uitvallen naarmate de lesweken vorderen, is dit vergelijkbaar met een trend die ook in MOOC's te zien is. Ook gaven de leerlingen aan met name de online weken als het hoofdbestandsdeel van masterclass te ervaren. Op basis hiervan kan het nuttig zijn, om naast de aandachtspunten over blended learning, ook lessen te trekken over het succesvol inzetten van MOOC's.

Er is wel nog een ander verschil tussen blended learning masterclasses en MOOC's en dat zijn de kosten. Aan een masterclass bij Pre-U zijn kosten verbonden, terwijl MOOC's veelal gratis zijn. Het is wel mogelijk dat er op het einde nog enkel voor een optioneel certificaat betaald moet worden. Omdat er voor de masterclass wel betaald wordt, zou je kunnen argumenteren dat deze kosten voor een extra motivatie kunnen zorgen. Er is immers voor betaald en is dus zonde om het niet af te maken. Het feit doet zich alleen voor dat Pre-U heeft besloten om voor deze masterclass uiteindelijk geen kosten in rekening te brengen omdat het een pilot betreft. Echter op het moment van de masterclass was dit niet bekend bij de leerlingen (en ouders). Dit bericht kwam pas nadat de masterclass was afgerond. Maar gezien de lagere betrokkenheid van enkele leerlingen lijkt het dat deze, veronderstelde, kosten geen rol hebben gespeeld. Dit is echt niet onderzocht.

## 7.2 Aanbevelingen

Op basis van dit Onderzoek van Onderwijs zijn er ook enkele aanbevelingen voor volgende werk, ter verbetering van de blended learning masterclasses bij Pre-U. Een eerste aanbeveling is dan ook gelijk: Het blijven doorontwikkelen van de blended masterclasses. Een ontwerp zal beter worden naarmate de ontwerpcyclus vaker doorlopen wordt. Met deze pilot is er een eerste versie gerealiseerd. Om tot succesvolle blended masterclasses te komen is het belangrijk om te blijven ontwikkelen. Dit geldt voor deze specifieke masterclass over quantummechanica, evenals toekomstige blended learning masterclasses bij Pre-U. Dit Onderzoek van Onderwijs kan hier aan bijdragen. Zo bevat het naast de vakspecifieke componenten over quantummechanica, inzichten over blended learning masterclasses in het algemeen. Denk hierbij aan een deel van het vooronderzoek, de lijst met eisen, evaluaties en voorgestelde wijzigingen.



Bij het doorontwikkelen van deze masterclass of bij de opzet van nieuwe blended masterclasses, is het van belang dat de ontwikkelaars goed op de hoogte zijn wat blended learning inhoudt. Dit is niet enkel online onderwijs aanbieden via een digitale leeromgeving. De meerwaarde is te vinden wanneer klassikaal en digitaal onderwijs op een juiste wijze gecombineerd worden. De vier *key challenges* van Boelens helpen bij het opzetten van een effectieve blended learning masterclass. Daarnaast kan de algemene didactiek van MOOC's ook inzichten bieden om de online lesweken te verbeteren. Zorg voor een goede kennismaking tijdens de startbijeenkomst en creëer een groepsgevoel. En ook tijdens de online weken moet er voldoende ruimte zijn voor interactie met leerlingen en het geven van feedback. De ervaringen uit deze masterclass laten zien dat de betrokkenheid van leerlingen een belangrijk punt van aandacht is. Een vast contactmoment in de week met een webconferentie zou hier aan kunnen bijdragen. Ook de discussiebalk lijkt een goed platform om vragen uit te wisselen. In dit geval betrof het voornamelijk praktische vragen, maar het zou goed zijn als hier ook inhoudelijk vragen worden gesteld. Zodat de leerlingen van elkaar kunnen leren. De docent zou dit kunnen stimuleren.

Tevens moet er bij het doorontwikkelen rekening worden gehouden met tijdbesteding. Het (her)ontwerpen van een blended learning kost tijd. Voor het ontwerp van deze masterclass is het ook helaas niet gelukt om al het materiaal op tijd af te krijgen. Uiteindelijk werd tijdens het uitvoeren van de lesweken parallel het materiaal voor de volgende lesweken afgemaakt. Wanneer dit door dezelfde persoon gebeurt, is dit niet aan te raden. Vandaar zijn er enkele onderdelen om rekening mee te houden voor de tijdsinvestering: Vanzelfsprekend is er de tijd die nodig is om het lesmateriaal te ontwikkelen, het verdiepen in blended learning en eventueel MOOC's kan extra tijd kosten. Nadat het lesmateriaal ontwikkeld is, zal dit moeten worden overgezet naar de online leeromgeving. Ook deze stap kost extra tijd, mede omdat Eurekos niet altijd even gebruiksvriendelijk is. Het overzetten van tekst naar de lespagina's is eenvoudig te doen, maar het aanmaken van interactieve elementen zoals een quiz is een stuk tijdrovender. Ook het verzorgen van eigen videomateriaal kost veel tijd. Eerst is er het schrijven van scripts voor de video en eventueel het maken van ondersteunde slides. Daarna moet het videomateriaal worden opgenomen. Hierbij moet rekening gehouden worden met meerde opnames per video, voordat deze de gewenste kwaliteit heeft. Het team van TELT kan ondersteunen bij voorbereiden en opnemen van videomateriaal.

In de kanttekeningen kwam al naar voor dat er op het inhoudelijk vlak niet uitgebreid is meegekeken met een expert naar het lesmateriaal. Quantummechanica is een lastig onderwerp om aan te leren aan leerlingen in het VO. Deze pilot is een eerste versie om dit onderwerp te verwerken bij een masterclass van Pre-U. In de evaluaties komen geen belangrijke signalen naar voren wijzigingen aan het lesmateriaal. Maar vanuit een professionele houding is het altijd het een streven om te verbeteren. Het inschakelen van een expert om feedback te geven op dit lesmateriaal zou daarin een goede stap zijn. Eerder werd de vakgroep van NanoElectronics genoemd om mee samen te werken voor eventuele lesvideo's. Ook voor een inhoudelijke blik op het lesmateriaal zouden dit een goede adviseur kunnen zijn.

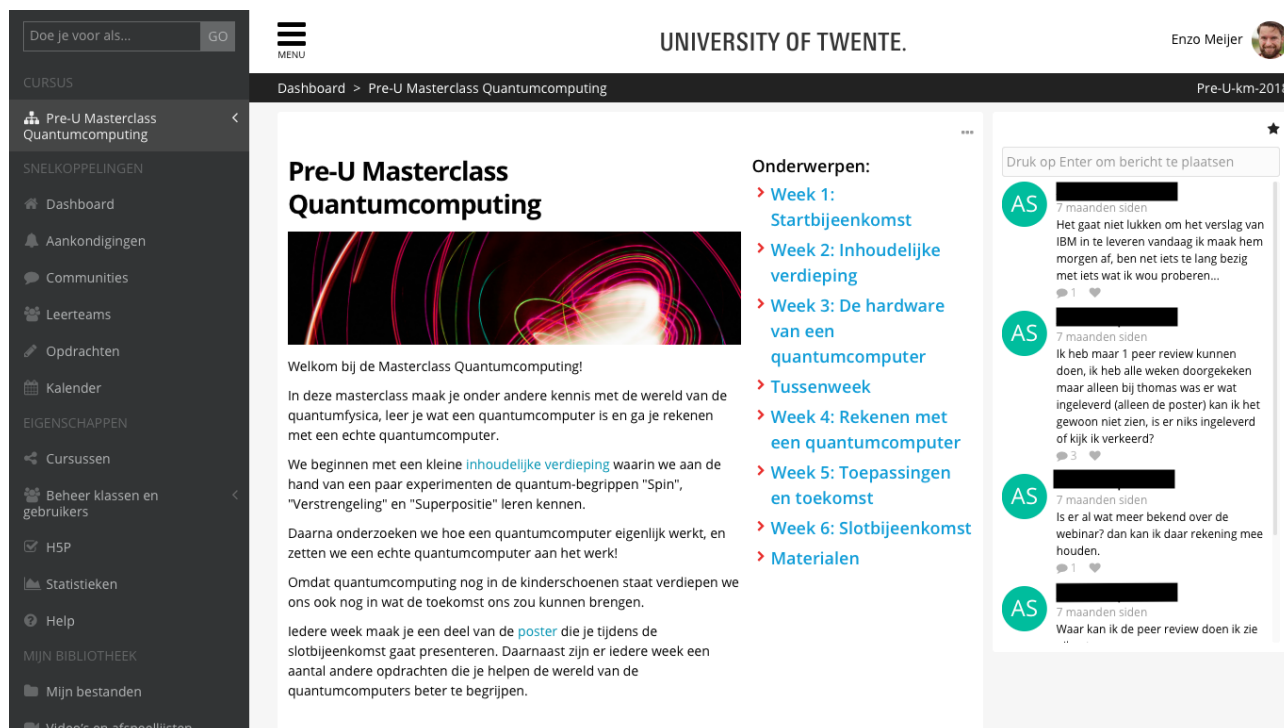
Verder kwamen er in de evaluaties meerdere ideeën naar voren die de masterclass zouden kunnen verbeteren. Dit heeft uiteindelijk geleid tot enkele voorgestelde wijzigingen voor een volgende uitvoering van de masterclass. Een aanbeveling is om deze wijzigingen eerst verder in detail uit te werken, alvorens deze door te voeren in het ontwerp. Dit geldt voor zowel deze masterclass als nieuwe blended learning masterclasses bij Pre-U. Ook in het kader van Eurekos moet er kritisch gekeken worden hoe deze leeromgeving verbeterd kan worden. Betere ondersteuning vanuit TELT, ofwel de ontwikkelaar zelf, zou wenselijk zijn om meer te kunnen informeren naar de mogelijkheden van het systeem, het doorgeven van bugs en op de hoogte te blijven van updates.

# Bibliografie

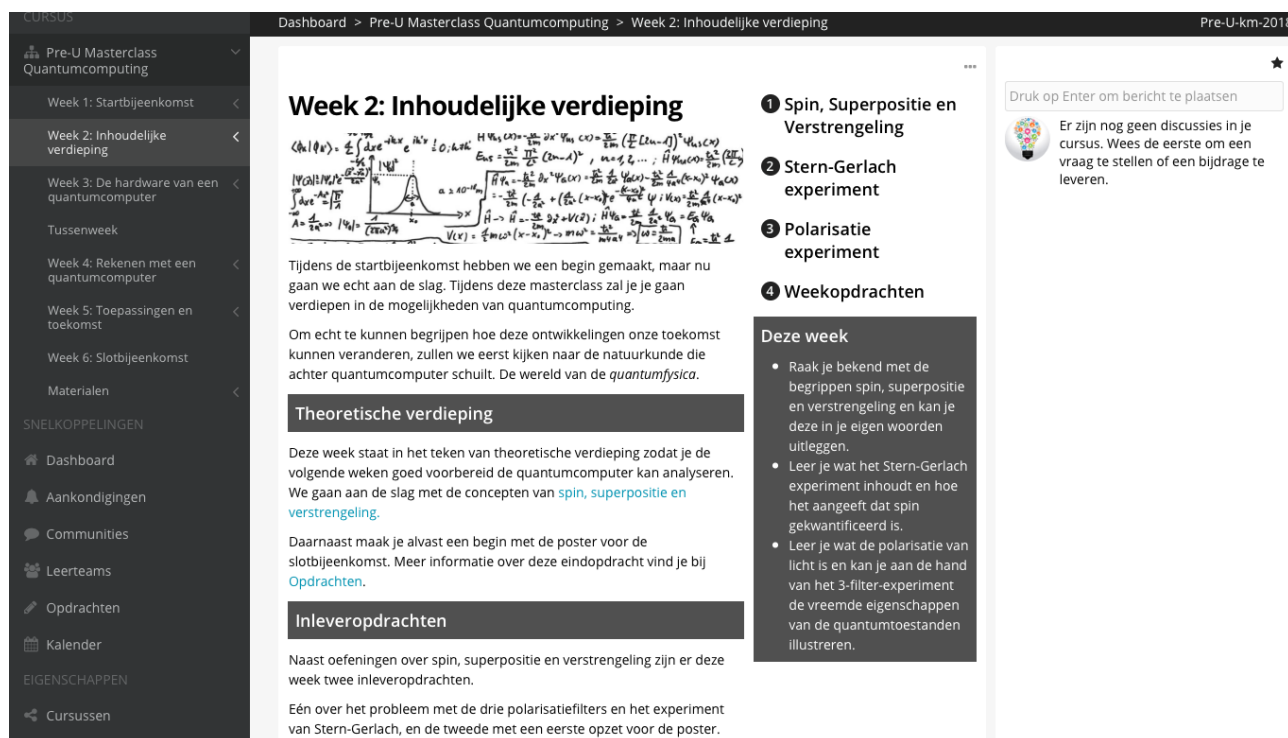
- Alonso, F., López, G., Manrique, D., & Viñes, J. M. (2005). An instructional model for web-based e-learning education with a blended learning process approach. *British Journal of Educational Technology*, 36(2), 217–235. doi:[10.1111/j.1467-8535.2005.00454.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2005.00454.x)
- Biezeveld, H., Mathot, L., & Brouwer, R. (2014). *Stevin: natuurkunde voor de bovenbouw*. Hubert Biezeveld.
- Boelens, R., De Wever, B., & Voet, M. (2017). Four key challenges to the design of blended learning: A systematic literature review. *Educational Research Review*, 22, 1–18. doi:[10.1016/j.edurev.2017.06.001](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2017.06.001)
- Braund, M. & Reiss, M. (2006). Towards a More Authentic Science Curriculum: The contribution of out-of-school learning. *International Journal of Science Education*, 28(12), 1373–1388. doi:[10.1080/09500690500498419](https://doi.org/10.1080/09500690500498419)
- Castelvecchi, D. (2018). The entangled web. *Nature*, 554(7692), 289–292. doi:[10.1038/d41586-018-01835-3](https://doi.org/10.1038/d41586-018-01835-3)
- College voor Toetsen en Examens vwo, havo, vmbo. (2016). *Natuurkunde vwo - Syllabus Centraal Examen 2018* (tech. rap. Nr. april 2016). College voor Toetsen en Examens. Utrecht.
- Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo. (2010). *Nieuwe natuurkunde, advies-examenprogramma's voor havo en vwo*. Nederlandse Natuurkundige Vereniging. Amsterdam.
- Dalen, B. v., Dongen, J. v., Jong, R. d., Keurentjes, J. A. H., Nijhof, E.-J., & Vink, H. (2015). *Systematische Natuurkunde* (H. Ottink, Red.). ThiemeMeulenhoff.
- de Wolf, R. (2017). The potential impact of quantum computers on society. *Ethics and Information Technology*, 19(4), 1–6. doi:[10.1007/s10676-017-9439-z](https://doi.org/10.1007/s10676-017-9439-z)
- Driscoll, M. (2002). Blended learning: Let's get beyond the hype. *E-learning*, 3(3), 54.
- Feynman, R. P. (1965). *The character of physical law*. M.I.T. Press Cambridge.
- Flokstra, J., Groenewold, A., Hooyman, K., Kootwijk, C., Kortland, K., Over, P., & Siersma, P. (2015). *Newton: natuurkunde voor de bovenbouw*. ThiemeMeulenhoff.
- Friesen, N. (2012). Defining Blended Learning. *Learning Spaces*, (August), 10.
- Hensen, B., Bernien, H., Dreaú, A. E., Reiserer, A., Kalb, N., Blok, M. S., . . . Hanson, R. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*, 526(7575), 682–686. doi:[10.1038/nature15759](https://doi.org/10.1038/nature15759). eprint: [1508.05949](https://arxiv.org/abs/1508.05949)
- Johansson, A. (2018). Undergraduate quantum mechanics: Lost opportunities for engaging motivated students? *European Journal of Physics*, 39(2). doi:[10.1088/1361-6404/aa9b42](https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa9b42)
- Jung, Y. & Lee, J. (2018). Learning Engagement and Persistence in Massive Open Online Courses (MOOCS). *Computers and Education*, 122(February), 9–22. doi:[10.1016/j.compedu.2018.02.013](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.02.013)
- Koopman, L. (2018). Quantumwereld in de Ruimte. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 84(11), 48–51.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & Van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1). doi:[10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109). eprint: [1701.01472](https://arxiv.org/abs/1701.01472)
- Oliver, M. & Trigwell, K. (2005). Can 'Blended Learning' Be Redeemed? *E-Learning*, 2(1), 17. doi:[10.2304/elea.2005.2.1.2](https://doi.org/10.2304/elea.2005.2.1.2)
- Sonneveld, W., Bouwens, R., Doorschot, P., Reisen, J. v., Vennix, A., & Frankemölle, J. (2014). *Overal Natuurkunde* (4de ed.). Noordhoff Uitgevers.
- Thijs, A., Fisser, P., & van der Hoeven, M. (2014). *21e Eeuwse Vaardigheden in Het Curriculum Van Het Funderend Onderwijs*. SLO. Enschede.
- Van der Donk, C. & Van Lanen, B. (2016). *Praktijkonderzoek in de school*. Bussum: Couthino.
- van der Veen, T. & van der Wal, J. (2012). *Van leertheorie naar onderwijspraktijk*. Groningen: Noordhoff Uitgevers.

## Online media

- Biercuk, M. J. (2017, augustus). Hype and cash are muddying public understanding of quantum computing. Verkregen 15 januari 2019, van <https://theconversation.com/hype-and-cash-are-muddying-public-understanding-of-quantum-computing-82647>
- Frame of Essence. (2014, mei). Building the Bits and Qubits. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=F8U1d2Hqark>
- Frame of Essence. (2015, oktober). You don't know how Quantum Computers work! Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=ZoT82NDpcvQ>
- Frame of Essence. (2017, mei). Will Quantum Computers break encryption? Verkregen 1 november 2018, van [https://www.youtube.com/watch?v=6H\\_9l9N3IXU](https://www.youtube.com/watch?v=6H_9l9N3IXU)
- HanzeMediatheek Hanzehogeschool Groningen. (2017, juni). Bronnen. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=Se-EZoyR1Vs>
- IBM Research. (2017). A Beginner's Guide to Quantum Computing. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=S52rxZG-zi0>
- IBM Research and the IBM QX team. (2017). Beginners Guide. Verkregen 1 november 2018, van <https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/tutorial?sectionId=beginners-guide&page=introduction>
- Physics Reimagined. (2018a). quantum superposition of states and decoherence. Verkregen 1 november 2018, van <http://toutestquantique.fr/en/superposition/>
- Physics Reimagined. (2018b). spin : Stern and Gerlach experiment. Verkregen 1 november 2018, van <http://toutestquantique.fr/en/spin/>
- Swaen, B. (2014a, augustus). Literatuurlijst volgens de APA-regels. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.scribbr.nl/apa-stijl/literatuurlijst-volgens-de-apa-regels/>
- Swaen, B. (2014b, augustus). Verwijzingen in de tekst volgens de APA-regels. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.scribbr.nl/apa-stijl/verwijzingen-de-tekst-volgens-de-apa-regels/>
- TEDx Talks. (2014, december). The Quantum Internet | Stephanie Wehner | TEDxVienna. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=XzPi29O6DAc>
- TEDx Talks. (2017, november). What Quantum Computing Isn't | Scott Aaronson | TEDxDresden. Verkregen 1 november 2018, van [https://www.youtube.com/watch?v=JvIbrDR1G\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=JvIbrDR1G_c)
- The Science Asylum. (2017, september). What is Quantum Spin? Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=sB1EPGmpzyg>
- University of Colorado. (2018). Stern-Gerlach Experiment. Verkregen 1 november 2018, van <https://phet.colorado.edu/nl/simulation/stern-gerlach>
- van de Craats, J. & Bosma, W. (1998, juni). Hoe werkt RSA? Verkregen 1 november 2018, van <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/hoe-werkt-rsa/>
- Veritasium. (2013a, juni). How Does a Quantum Computer Work? Verkregen 1 november 2018, van [https://www.youtube.com/watch?v=g\\_IaVepNDT4](https://www.youtube.com/watch?v=g_IaVepNDT4)
- Veritasium. (2013b, juli). How To Make a Quantum Bit. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=zNzzGgr2mhk>
- Veritasium. (2015, januari). Quantum Entanglement & Spooky Action at a Distance. Verkregen 1 november 2018, van <https://www.youtube.com/watch?v=ZuvK-od647c&>



**Figuur A.1.** Screenshot Eurekaos: Startpagina masterclass.



**Figuur A.2.** Screenshot Eurekaos: Startpagina lesweek 2. De namen van de leerlingen zijn vanwege privacy-overwegingen geanonimiseerd

## Qubits

Voordat we beginnen met het uitleggen wat een qubit is, maken we een korte uitstap naar gewone bits. Een bit is een drager van informatie en heeft de waarde 0 of 1. Meerdere bits achter elkaar kan een systeem beschreven worden. Alle informatie die je hier op je computer ziet zijn in feite hele lange verzamelingen van 0 en 1 achter elkaar. Zo kan je bijvoorbeeld een tekst omzetten naar binaire code:

```
01000111 01101111 01100101 01100100 00100000 01111010
01101111 00100001 00100000 01000010 01101111 01101111
01100100 01110011 01100011 01101000 01100001 01110000
00100000 01101111 01101110 01110100 01100011 01101001
01101010 01100110 01100101 01110010 01100100 00101110
```

Als we gewone bits gebruiken hebben we echter maar een beperkte keuze: 0 of 1. Bij een quantumbit is dit anders. Vorige week hebben we gezien dat vanwege superpositie een deeltje meerdere eigenschappen tegelijkertijd kan hebben. Een elektron kan bijvoorbeeld een superpositie hebben spin up en spin down. Dit kunnen gebruiken als een systeem voor 0 en 1.

Wanneer we spreken over superposities is het belangrijk om te bedenken dat het gaat om een waarschijnlijkheidsverdeling. Immers als we een meting doen, treffen we deeltje altijd maar op een plaats aan: Dit noteren we als volgt

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

$\psi$  is de golffunctie en daarmee duiden we de toestand van het systeem aan.  $\alpha$  en  $\beta$  zijn de waarschijnlijkheid-amplitudes. Deze duiden de kans aan om het deeltje in die toestand aan te treffen, verder kunnen dit ook complexe getallen zijn. De waarschijnlijkheid om  $|0\rangle$  te vinden is  $|\alpha|^2$ , en voor  $|1\rangle$  is dit  $|\beta|^2$ . De totale kans om een deeltje te vinden is altijd 1.

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

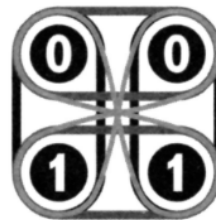
Doordat de toestand van een deeltje in een superpositie kan verkeren, zijn er opeens veel meer mogelijkheden.



Bron: De quantumcomputer, George van Hal

### Superpositie

Een qubit codeert tegelijkertijd voor 0 en 1.



Bron: De quantumcomputer, George van Hal

### Verstrengeling

Omdat twee verstengelde qubits ook hun positie delen ontstaan alle vier mogelijke combinaties van toestanden:  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$  en  $|11\rangle$ .

Druk op Enter om bericht te



Er zijn nog geen discussies in je cursus. Wees de eerste om een vraag te stellen of een bijdrage te leveren.

**Figuur A.3.** Screenshot Eurekos: Subpagina uit lesweek 3 met uitleg over de qubit

MENU

UNIVERSITY OF TWENTE.

Dashboard > Opdrachten

Opdrachten

01/01/2018

Alle klassen en teams

Class: Pre-U\_Quantumcomputing\_mrt\_2018

20

01

APR

2

Qubits en de Quantum computer

Gemaakt door Enzo Meijer 26 maart 2018

Opdracht 3.1 Soorten QubitsWe hebben aangeven dat een qubit gemaakt kan worden aan de hand van de spin van een elektron. Maar dit hoeft niet per se een elektron te zijn, we kunnen bijvoorbeeld de polarisatie van een foton ook gebruiken. Het gaat er om dat we een quantummechanisch systeem maken dat...

0

VR

30

MAA

0/1

Peer review voor

Weekopdrachten van week 3

Ingediend door 04 Apr 2018

TVD

VR

30

MAA

0/1

Peer review voor

Hier mijn weekopdracht van week 3

Ingediend door 01 Apr 2018

YL

MA

26

MAA

2

Polarisatie en Spin

Gemaakt door Enzo Meijer 19 maart 2018

Bij het experiment met de drie polarisatiefilters heb je gezien dat bij twee filters, waarbij een filter 90° gedraaid is, er geen licht wordt doorgelaten. Plaats je nu een derde filter er tussenin op 45° komt er opeens wél weer licht door de filters. Aan jou nu de taak om uit te...

0

**Figuur A.4.** Screenshot Eurekos: Opdrachtenpagina. De namen van de leerlingen zijn vanwege privacy-overwegingen geanonimiseerd

# Toestemming Deelnemers

## B.1 Toestemmingsverklaringsformulier

### Toestemmingsverklaringsformulier (informed consent)

**Titel onderzoek:** Ontwerp van een Blended Learning Masterclass Quantummechanica voor Pre-U  
**Verantwoordelijke onderzoeker:** Enzo Meijer

#### *In te vullen door de deelnemer*

Ik verklaar op een voor mij duidelijke wijze te zijn ingelicht over de aard, methode, doel van het onderzoek. Ik weet dat de gegevens en resultaten van het onderzoek alleen anoniem en vertrouwelijk aan derden bekend gemaakt zullen worden. Mijn vragen zijn naar tevredenheid beantwoord

Ik stem geheel vrijwillig in met deelname aan dit onderzoek. Ik behoud me daarbij het recht voor om op elk moment zonder opgaaf van redenen mijn deelname aan dit onderzoek te beëindigen.

Naam deelnemer: .....

Datum: ..... Handtekening deelnemer: .....

#### *In te vullen door de uitvoerende onderzoeker*

Ik heb een mondelinge en schriftelijke toelichting gegeven op het onderzoek. Ik zal resterende vragen over het onderzoek naar vermogen beantwoorden. De deelnemer zal van een eventuele voortijdige beëindiging van deelname aan dit onderzoek geen nadelige gevolgen ondervinden.

Naam onderzoeker: .....

Datum: ..... Handtekening onderzoeker: .....



## B.2 Brief Ouders

Enzo Meijer  
enzomeijer-pre-u@utwente.nl  
053-4894890

Postadres:  
Universiteit Twente  
Pre University  
Postbus 217  
7500 AE Enschede

Enschede, 16 maart 2018

Betreft: Toestemming onderzoek masterclass

Beste ouders/verzorgers van [Naam leerling],

Via deze brief willen ik u informeren over het onderzoek, dat deel uit maakt van de pilot blended masterclass kwantummechanica waar uw [zoon of dochter] aan deelneemt. Ik heb deze masterclass ontwikkeld voor Pre-U in het kader van mijn 'Onderzoek van Onderwijs' voor de opleiding Science Education and Communication aan de Universiteit Twente en dient tevens als mijn afstudeeronderzoek. Tijdens de startbijeenkomst op 16 maart heb ik de deelnemers van de masterclass op hoogte gesteld van het onderzoek en hebben zij toestemming verleend voor deelname. Omdat uw kind minderjarig is, stel ik u via deze weg ook op de hoogte.

Middels deze brief wil ik u informeren dat u geheel vrijwillig instemt met deelname van uw kind aan dit onderzoek. U behoudt daarbij het recht deze instemming weer in te trekken zonder dat u daarvoor een reden behoeft op te geven. Uw kind mag op elk moment stoppen met het onderzoek. Indien de onderzoeksresultaten van uw kind gebruikt zullen worden in wetenschappelijke publicaties, dan wel op een andere manier openbaar worden gemaakt, zal dit volledig geanonimiseerd gebeuren. De persoonsgegevens van uw kind zullen niet door derden worden ingezien zonder uw uitdrukkelijke toestemming. Als u nog verdere informatie over het onderzoek wilt ontvangen, nu of in de toekomst, dan kunt u contact met mij opnemen.

Voor andere vragen en ook voor klachten over dit onderzoek kunt u zich wenden tot de secretaris van de Commissie Ethiek van de faculteit Gedragswetenschappen van de Universiteit Twente, mevr. J. Rademaker (telefoon: 053-4894591; e-mail: j.rademaker@utwente.nl, Postbus 217, 7500 AE Enschede).

Pre-U van de Universiteit Twente stemt in met deelname van uw kind aan dit onderzoek en verleent haar volledige medewerking. Indien u bezwaar heeft tegen deelname van uw kind aan dit onderzoek, dan kunt u dit (uiterlijk 30-03-2018) kenbaar maken aan Pre-U of mijzelf. U hoeft hiervoor geen opgaaf van redenen te verstrekken en uw bezwaar zal zonder voorbehoud worden ingewilligd.

Alvast bedankt voor uw begrip.

Met vriendelijk groet,

Enzo Meijer

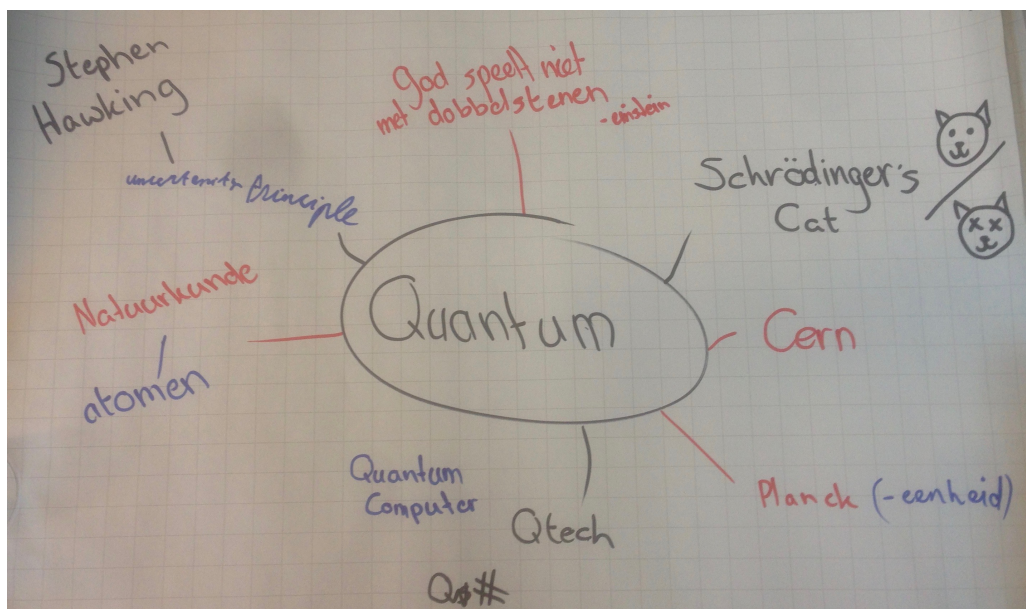
Masterclassbegeleider Pre-U  
Student Science Education & Communication



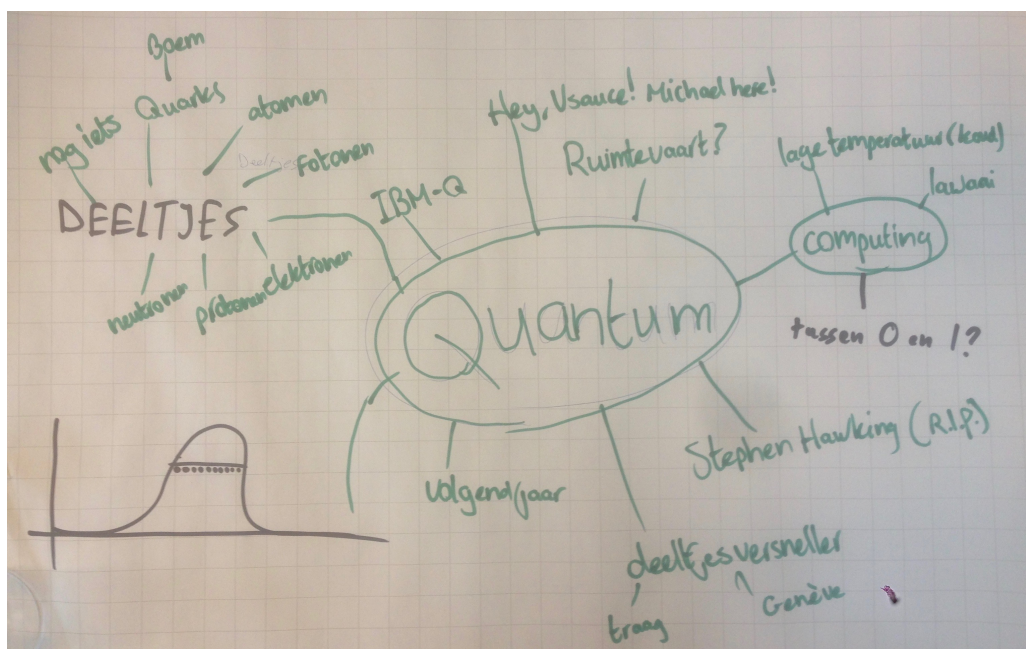
# Posters Leerlingen

# C

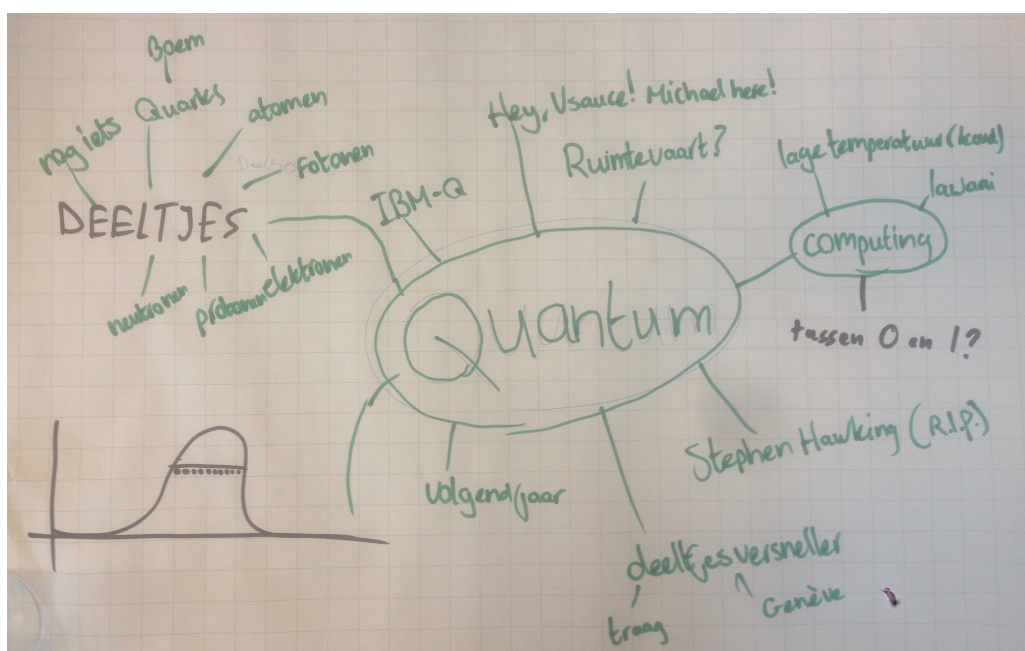
## C.1 Posters brainstorm startbijeenkomst



Figuur C.1. Poster leerling 3 en 4



Figuur C.2. Poster leerling 2 en 5



**Figuur C.3.** Poster leerling 1 en 6

**Figuur C.4.** Poster eindopdracht leerling 2.



## Beoordelingsmodel Poster

### Blended Masterclass Quantumcomputing

|                        | <b>Slecht</b>                                                                         | <b>Matig</b>                                                                        | <b>Voldoende</b>                                                                       | <b>Goed</b>                                                                  |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Inhoud</b>          | De inhoud van de lesweken komt niet terug op de poster                                | De inhoud van twee of meer lesweken komt niet terug op de poster                    | De inhoud van een lesweek komt niet terug op de poster                                 | <b>De inhoud van alle lesweken komt terug op de poster</b>                   |
| <b>Tekst</b>           | De poster bevat te veel, of juist te weinig tekst, ook is het niet eenvoudig te lezen | <b>De hoeveelheid tekst kan beter en op een pakkender wijze geschreven worden.</b>  | De hoeveelheid tekst is goed. Het zou wel pakkender geschreven kunnen worden.          | De hoeveelheid tekst is precies goed en is op een pakkende manier geschreven |
| <b>Aantrekkelijk</b>   | De poster is rommelig, niet goed leesbaar en ook niet aantrekkelijk                   | De poster is leesbaar maar verder niet heel aantrekkelijk                           | <b>De poster is goed leesbaar en ziet er aantrekkelijk uit.</b>                        | De poster is goed leesbaar, valt op en is een echte eye catcher.             |
| <b>Afbeeldingen</b>    | De afbeeldingen zijn onduidelijk en dragen niet bij de poster beter te begrijpen      | De afbeeldingen zijn onduidelijk en bieden geen meerwaarde voor de poster           | <b>De meeste afbeeldingen zijn duidelijk en helpen de poster beter te begrijpen</b>    | Alle afbeeldingen zijn aantrekkelijk en helpen de poster beter te begrijpen  |
| <b>Lay-out</b>         | De opbouw van de poster is onduidelijk ook is er te veel/weinig ruimte gebruikt       | De opbouw van de poster kan beter, ook het gebruik van de ruimte is niet heel goed. | <b>De poster heeft een duidelijke opbouw, de ruimte kan wel beter gebruikt worden.</b> | De poster heeft een duidelijk opbouw en maakt goed gebruik van de ruimte.    |
| <b>Bron-vermelding</b> | Er worden geen bronnen vermeld                                                        | Een beperkt aantal bronnen wordt vermeld en ook niet volgens APA                    | <b>Alle bronnen worden vermeld maar niet volgens APA</b>                               | Alle bronnen worden vermeld volgens APA.                                     |
| <b>Spelling</b>        | De poster bevat meer dan 4 spellings- en grammaticafouten                             | De poster bevat 3 á 4 spellings- en grammaticafouten                                | <b>De poster bevat 1 á 2 spellings- en grammaticafouten</b>                            | De poster bevat geen spellings- en grammaticafouten                          |

**Figuur C.5.** Beoordeling eindopdracht leerling 2.





## Beoordelingsmodel Poster

### Blended Masterclass Quantumcomputing

|                        | Slecht                                                                                | Matig                                                                               | Voldoende                                                                            | Goed                                                                             |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Inhoud</b>          | De inhoud van de lesweken komt niet terug op de poster                                | De inhoud van twee of meer lesweken komt niet terug op de poster                    | De inhoud van een lesweek komt niet terug op de poster                               | <b>De inhoud van alle lesweken komt terug op de poster</b>                       |
| <b>Tekst</b>           | De poster bevat te veel, of juist te weinig tekst, ook is het niet eenvoudig te lezen | De hoeveelheid tekst kan beter en op een pakkender wijze geschreven worden.         | <b>De hoeveelheid tekst is goed. Het zou wel pakkender geschreven kunnen worden.</b> | De hoeveelheid tekst is precies goed en is op een pakkende manier geschreven     |
| <b>Aantrekkelijk</b>   | De poster is rommelig, niet goed leesbaar en ook niet aantrekkelijk                   | De poster is leesbaar maar verder niet heel aantrekkelijk                           | De poster is goed leesbaar en ziet er aantrekkelijk uit.                             | <b>De poster is goed leesbaar, valt op en is een echte eye catcher.</b>          |
| <b>Afbeeldingen</b>    | De afbeeldingen zijn onduidelijk en dragen niet bij de poster beter te begrijpen      | De afbeeldingen zijn onduidelijk en bieden geen meerwaarde voor de poster           | <b>De meeste afbeeldingen zijn duidelijk en helpen de poster beter te begrijpen</b>  | Alle afbeeldingen zijn aantrekkelijk en helpen de poster beter te begrijpen      |
| <b>Lay-out</b>         | De opbouw van de poster is onduidelijk ook is er te veel/weinig ruimte gebruikt       | De opbouw van de poster kan beter, ook het gebruik van de ruimte is niet heel goed. | De poster heeft een duidelijke opbouw, de ruimte kan wel beter gebruikt worden.      | <b>De poster heeft een duidelijk opbouw en maakt goed gebruik van de ruimte.</b> |
| <b>Bron-vermelding</b> | <b>Er worden geen bronnen vermeld</b>                                                 | Een beperkt aantal bronnen wordt vermeld en ook niet volgens APA                    | Alle bronnen worden vermeld maar niet volgens APA                                    | Alle bronnen worden vermeld volgens APA.                                         |
| <b>Spelling</b>        | De poster bevat meer dan 4 spellings- en grammaticafouten                             | De poster bevat 3 á 4 spellings- en grammaticafouten                                | De poster bevat 1 á 2 spellings- en grammaticafouten                                 | <b>De poster bevat geen spellings- en grammaticafouten</b>                       |

**Figuur C.7.** Beoordeling eindopdracht leerling 6.

## D.1 Evaluaties lesweek 2

### Leerling 2

Interessante stof, leuke opdracht.tijdsbesteding: ik ben ongeveer 15-30 minuten bezig geweest met onderzoek en 30 minuten met het uittypen van de verklaring. Verdere opmerkingen, site was even wennen om voor het eerst mee te werken.

### Leerling 4

Ik vind de meeste onderdelen van de cursus erg goed. Maar ik vind de site niet heel erg duidelijk. Het niveau vind ik precies goed.

### Leerling 5

Ik vond het een beetje een chaotische eerste week. Ten eerste wil ik mijn excuses aanbieden voor het late inleveren van de poster-opdracht. Ik had deze week 2 presentaties, en een aantal onhandige werk-tijden, dus ik heb voor de poster geen tijd gehad. Ik wou deze nog gaan doen, maar ik kan de opdracht jammer genoeg niet meer bekijken of inleveren. Ik vond het overzicht van de opdrachten een beetje onduidelijk, want ik kon daaruit niet opmaken van wie ik nou wat moest reviewen. Daarnaast stonden de verschillende data van de opdrachten overal door elkaar, dus ik heb maar gewoon de polarisatie-opdracht op woensdag ingeleverd, want iets anders kon ik er niet uit halen. Dit kan overigens ook aan mijn browser liggen, ik weet het niet. Ik verwacht de komende week meer tijd te hebben, en dus ga ik mijn best doen om alles op tijd in te leveren. De opdrachten waren deze week leuk, en duidelijk uitgelegd. Nogmaals mijn excuses.

### Leerling 6

De uitleg was kort, maar goed. Ook was de simulatie erg leuk om te doen en de vragen erover waren leuk. Wel zaten er een paar fouten in de vragen zoals ook vermeld was door een ander. Het experiment met de polarisatiefilters was erg leuk; ik zat bij de eerste keer echt van: Wat???? Daarna was het de komende dagen in de bus een beetje browsen naar artikelen over dit fenomeen. Uiteindelijk ben ik zo tot mijn antwoord gekomen die overigens sterk verscheelt van de anderen. Dit is natuurlijk wel interessant dat iedereen iets anders heeft gevonden. Het niveau was goed te doen, ook al begon mijn toetsweek daarna meteen dus was het een beetje stressen om het af te krijgen.

## D.2 Evaluaties lesweek 3

### Leerling 6

*Uitleg:* Ik vond de uitleg over de qubits kort, maar eigenlijk is er ook niet veel meer te zeggen over de qubits. Dus het was een goede samenvatting wat qubits nou eigenlijk zijn en waarin ze verschillen van normale bits. De video's over de kwantumcomputer waren informatief.

*Opdrachten:* Ik vond de opdrachten echt heel leuk omdat ze eigenlijk heel vrij waren; je geeft een richtlijn van wat je moet doen, maar zoek maar uit hoe je het doet en dat verschilt dus per persoon. Zo heb ik heel wat tijd doorgebracht op het internet om wat informatie bij elkaar te sprokkelen.

*Niveau:* Het niveau is goed, maar ik denk dat het niveau ook niet echt aangepast kan worden. Dit waren vooral opdrachten over dingen die je op kon zoeken en was niet gericht op rekenen of echt inzicht.

*Tijdbesteding:* De tijdbesteding die voor de opdrachten nodig is, is goed. Maar ik heb er wel telkens problemen mee omdat ik teveel opzoek. Met de poster heb ik de meeste problemen; ik heb veel ideeën in mijn hoofd, maar krijg ze nog niet mooi 'op papier'.

*Opmerkingen:* Ik ga nu heel erg nitpicken, maar let op de spelling en grammatica in de stukjes tekst voor de uitleg en opdrachten. Zo gebruik je vaak "er zijn een aantal. . .", maar het moet zijn "er is een aantal. . .". Je gebruikte



ook in het stukje voor de evaluatie “zodat”, maar je kan hiervoor beter “opdat” gebruiken omdat “zodat” echt een gevolg aangeeft en “opdat” een doel aangeeft. Het doel is natuurlijk om de masterclass te verbeteren, maar het is geen zeker gevolg.

## D.3 Evaluaties lesweek 4

### Leerling 2

**Niveau:** deze week vond ik de opdrachten niet heel erg moeilijk, ook de basic user guide van IBM was goed te volgen, ik ben verder gegaan met de full user guide van IBM, deze was al een stuk moeilijker, videos op de site waren duidelijk, qua tijdsbesteding was ik 45 minuten bezig met het huiswerk plus de theorie van deze week, 30 minuten met de basic user guide en ongeveer 2.5 uur met de full user guide. Wat vond ik van de les? Zeer interessant en leuk om te klooiën met de software van ibm, interessant om te leren hoe de gates bij quantum werken, zo doe je toch een soort van programmeren maar op een hele andere manier wat het heel leuk maakt, verder had ik niet echt een doel met wat ik kon maken bij IBM dus was ik maar wat dingen aan het proberen zonder dat ik wist wat ik eigenlijk kon doen, misschien leuk voor de volgende keer dat er iets van 10 dingen zijn die je kan maken die van makkelijk tot moeilijk gaan. Als huiswerk kun je dan i.p.v. een verslag 2 van de 10 opdrachten in leveren, of meer als je er zin in hebt, Je werkt dan toch de basic user guide door omdat je die waarschijnlijk toch nodig hebt voor de opdrachten. uitleg was duidelijk op de site en de video's sloten goed aan bij de stof. Deadlines zijn beter, ik heb zelf liever dat het op maandag online is, vrijdag inleveren, zaterdag de peer review en ergens in de week de poster opdracht, de peer review ben je toch maar een half uurtje aan kwijt dus kan dit prima op de zaterdag. Een ander idee is om de lessen vrijdag online te zetten, dan kun je zaterdag en zondag aan de opdrachten en de poster werken, dan is de deadline woensdag of donderdag en kun je op vrijdag (voor dat de nieuwe opdrachten online komen) weer de peer review doen.

### Leerling 5

Ik vond het lesmateriaal wel goed deze week. De uitleg op de site van IBM-Q was erg overzichtelijk en duidelijk (wat wel te verwachten was van de trailblazer in consumer-quantumcomputing). Daarnaast kwamen de beknopte uitleg en de informatie-videos goed van pas bij het maken van deze opdracht. De opdracht was duidelijk weergegeven, waardoor ik redelijk snel doorhad wat ik nou precies moest doen. Het niveau deze week werd vooral bepaald door het uitvogelen van de quantum-composer. Ik was een tijdje bezig met onderzoeken hoe je nou precies de qubits moest lezen, en daarna correct invoegen in de composer, maar toen ik dat eenmaal onder de knie had ging het allemaal vrij soepel. Al met al een interessante week, die veel ruimte biedt voor experimenteren en creativiteit. Ik denk dat toekomstige masterclass-leerlingen dit soort opdrachten erg leuk zullen vinden.

### Leerling 6

**Uitleg:** De uitleg was goed en gelukkig bestaat er een bloch-vector opdat je het toch een beetje kan visualiseren. Er staat natuurlijk wel bij dat een qubit er niet zo uit ziet, maar toch is het wel fijn. De uitleg van de poorten waren ook goed en gelukkig zaten er nog wat video's bij om het duidelijker te maken.

**Opdrachten:** Hoewel de uitleg goed was, vond ik dit zeker de moeilijkste opdrachten van de masterclass: ik snap het principe hoe je qubits kan verstrengelen nog steeds niet helemaal en ik heb zelfs de opdrachten van de swap en verstrengelaar circuits nog niet gemaakt. Wel was de beginners guide erg leuk en kon je dan eindelijk met een echte kwantumcomputer werken (hoewel ik meestal de simulatie heb gebruikt).

**Niveau:** Zoals ik al zei vond ik dit de moeilijkste opdrachten, maar dat is natuurlijk ook goed om echt uitdaging te hebben.

**Tijdsbesteding:** Qua tijdsbesteding ben ik gewoon dramatisch: ik begin er telkens te laat aan en ook blijf ik maar achter met mijn posteropdracht. Ik denk dat het voor de meesten gewoon goed te doen was, maar ik maak het mezelf dus telkens erg lastig.



## D.4 Evaluaties lesweek 5

### Leerling 2

Ik vond de laatste week de minst leuke week, hij was alsnog wel leuk en interessant maar ik vond dat hij het minst goed aansloot op de stof in vergelijking met de rest. Ik snap dat er tijd vrij moest komen voor de posteropdracht maar dit maakt het wel minder. Je was redelijk snel klaar met de opdracht wat waarschijnlijk ook de bedoeling was ivm. De poster. Ik persoonlijk had het leuker gevonden als er wat extra diep werd ingegaan op quantumcomputing zelfs als dit ivm met tijd wat minder uit zou komen.

### Leerling 5

Het lesmateriaal deze week vond ik echt heel interessant. Het was zeer indrukwekkend om alle video's over de onderwerpen te bekijken, en te realiseren hoe weinig we eigenlijk nog weten. De opdracht vond ik heel leuk, want het vergde wat creativiteit, en een grote hoeveelheid denkvermogen. De opdracht was erg duidelijk uitgelegd, en ik wist eigenlijk gelijk wat ik moest doen. Na even na te denken, wist ik al wel hoe ik het ging aanpakken. Qua niveau was het een prima opdracht, want er zijn verschillende manieren om het onderwerp te benaderen. Je kon dus eigenlijk voor jezelf kiezen wat voor jou het meest logisch en/of handig leek. Al met al een goede afsluiter, waarover ik in de toekomst nog veel hoop te lezen.

### Leerling 6

Er was voor deze week natuurlijk geen uitleg, maar meer een korte samenvatting van de onderwerpen waar je uit kon kiezen voor de opdracht. Ik vond het wel leuk om te lezen en ook het stukje over de toekomst was interessant. Het was lekker weer buiten toen ik het maakte, dus ik zat buiten met een tablet een beetje rond te zoeken naar informatie. In de avond heb ik het gemaakt en toen ook ingeleverd en qua tijd was het prima te doen. Wel vond ik het verhaal over kwantuminternet een beetje verwarrend dus had ik gekozen voor cryptografie. Eigenlijk heb ik niet veel meer te zeggen over deze week behalve dat het lekker weer was en dit een leuke opdracht was om buiten een beetje research naar te doen.



## Lijst van figuren

|     |                                                                                  |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Aanbod masterclasses Pre-U voorafgaand aan de ontwikkeling van de pilot. . . . . | 8  |
| 2.2 | Schematische weergave van de globale masterclassstructuur. . . . .               | 8  |
| 3.1 | Schematisch overzicht van de globale weekstructuur. . . . .                      | 17 |
| 3.2 | Visuele representatie van een qubit aan de hand van de Bloch-vector. . . . .     | 22 |
| 3.3 | Meestvoorkomende quantumlogische poorten. . . . .                                | 22 |
| 3.4 | Screenshot IBM-Q editor. . . . .                                                 | 23 |
| 5.1 | Posters van de brainstorm tijdens de startbijeenkomst. . . . .                   | 31 |
| 5.2 | Poster eindopdracht leerling 2. . . . .                                          | 33 |
| 5.3 | Poster eindopdracht leerling 6. . . . .                                          | 33 |
| A.1 | Screenshot Eurekos: Startpagina masterclass. . . . .                             | 52 |
| A.2 | Screenshot Eurekos: Startpagina lesweek 2. . . . .                               | 52 |
| A.3 | Screenshot Eurekos: Startpagina lesweek 2. . . . .                               | 53 |
| A.4 | Screenshot Eurekos: Opdrachtenpagina. . . . .                                    | 54 |
| C.1 | Poster leerling 3 en 4 . . . . .                                                 | 57 |
| C.2 | Poster leerling 2 en 5 . . . . .                                                 | 57 |
| C.3 | Poster leerling 1 en 6 . . . . .                                                 | 58 |
| C.4 | Poster eindopdracht leerling 2. . . . .                                          | 59 |
| C.5 | Beoordeling eindopdracht leerling 2. . . . .                                     | 60 |
| C.6 | Poster eindopdracht leerling 6. . . . .                                          | 61 |
| C.7 | Beoordeling eindopdracht leerling 6. . . . .                                     | 62 |

## Lijst van tabellen

|     |                                                                                             |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Overzicht van de verschillende databronnen ingedeeld per categorie en wat ze meten. . . . . | 27 |
| 5.1 | Overzicht van de weekopdrachten die de leerlingen hebben ingeleverd. . . . .                | 30 |
| 5.2 | Overzicht van de posteropdracht ingeleverd per lesweek . . . . .                            | 30 |
| 5.3 | Overzicht van een nieuwe globale structuur voor de masterclass. . . . .                     | 42 |

## Colofon

Dit verslag is gezet met  $\text{\LaTeX}$ . Het gebruikt de *Clean Thesis* stijl ontwikkeld door Ricardo Langner. Het ontwerp van de *Clean Thesis* stijl is geïnspireerd op handleidingen van Apple Inc.

Download de *Clean Thesis* stijl op <http://cleanthesis.der-ric.de/>.