

Leren over licht met applets

Patrick Diepenbroek, Martijn van Raaij, & Jan van der Veen.

ELAN, Universiteit Twente

Contact: j.t.vanderveen@utwente.nl

Samenvatting

Lichtverschijnselen zijn lastig te verklaren. Je pakt licht niet vast en je legt het niet onder de microscoop. Om het nog ingewikkelder te maken worden sommige verschijnselen verklaard met het golfkarakter van licht, andere weer met het deeltjeskarakter van licht. Dat is voor leerlingen (en natuurkundigen) lastig te doorgronden. Applets kunnen helpen bij het verhogen van het begrip van een aantal lichtverschijnselen. In twee studies is gekeken of deze claim wordt waargemaakt. De resultaten laten zien dat op een aantal begripsaspecten vooruitgang wordt geboekt. Andere begrippen blijven op hetzelfde niveau steken.

Vraagstelling en relevantie

Docenten en leerlingen beschikken via het Internet over toegang tot een grote verzameling applets over natuurkundige onderwerpen. Een geschikte applet kan een proces aanschouwelijk maken dat voor het blote oog onzichtbaar is, of iets visualiseren dat in stilstaande beelden of in tekst moeilijk te vangen is. Ook kan het zelf spelen met de parameters van het 'experiment' het begrip van de stof vergroten. Andere voordelen die worden genoemd zijn het voor de beginners overzichtelijker aanbod in vergelijking met een soms complexe proefopstelling (Wieman & Perkins, 2005). De simulatie laat het experiment in feite zien in de vorm van een versimpeld model van de werkelijkheid. Maar leer je daar ook wat van? Deze twee studies onderzoeken de volgende vraag:

“Welke begripsontwikkeling levert het gebruik van applets op tijdens de introductie van het golfkarakter van licht (studie I), respectievelijk het foto-electrisch effect (studie II)?”

Theoretisch kader

Lichtverschijnselen worden op verschillende manieren verklaard: deels met lichtstralen, deels met golven en deels met fotonen, zie verder bijvoorbeeld Halliday e.a. (1994). Leerlingen vinden het lastig om bij verklaringen de juiste aanpak te kiezen. Ook blijken ze de basis-eigenschappen van de verschillende modellen voor licht niet goed te begrijpen voordat ze de meer gevorderde onderwerpen bestuderen (Ambrose 1999). We onderzochten of het leren met applets daarbij kan helpen. De applets en de werkbladen daarbij kunnen worden gezien als een vorm van 'scaffolding' of ondersteuning van het leerproces. Deze aanpak kan worden gekarakteriseerd als ontdekken binnen een voorgestructureerde omgeving, of wel 'guided discovery learning' (de Jong, 2005). Wieman & Perkins (2005) geven aan dat het gebruik van een simulatie bijzonder effectief kan zijn. In een overzichtsartikel van leren middels simulaties laat de Jong (2005) zien dat er nog veel onderzoek nodig is naar de condities waaronder die leereffecten optreden. De hier besproken studies naar "Leren over licht" met applets geven zicht op enkele mogelijkheden.

Onderzoeksmethode en begripsniveaus

De simulaties werden ingezet in VWO5/6 (16-18 jarigen) gebruikmakend van een prepostdesign. Van Raaij (2005) gebruikte in studie I transcripties van hard-op-denk sessies (n=5) met het golfmodel van licht als onderwerp. In studie II van Diepenbroek (2006) werd gewerkt met vraagstukken (n=18) voor en na het werken met twee applets over het foto-electrisch effect. De applets werden gebruikt op een moment dat de klas met het onderwerp bezig was.

De data werden in beide studies gescoord op begripsniveaus. Bij begripsniveaus valt te denken aan het omgaan met termen en concepten op een manier die kan worden

gekaracteriseerd als oppervlakkig, gevorderd respectievelijk expertniveau (Bransford, 1999). Ook kan het leren worden aangemerkt als ‘oppervlakkig’ versus ‘diep’ (Chin & Brown, 2000). Uiteraard gaat het te ver om na de korte interventie, het werken met een applet, expertgedrag te verwachten. Toch willen we zien of we op een aantal aan het fysische domein ontleende zaken kunnen scoren of en hoe het gebruik van het vakidoom, het begrip daarvan en het kunnen vertalen naar een nieuwe situatie zich heeft ontwikkeld. Hiertoe hanteren we begripsniveaus die zijn afgeleid van Hiele(1973), Tall(2004) en Chin en Brown (2000). In figuur 1 is weergegeven hoe de verschillende niveaus werden gehanteerd door beide studies.

Theoretisch niveau Kennis wordt in abstracties gevat, uitgedrukt in symbooltaal	Formal-axiomatic world Weergave van de werkelijkheid in axioma's
Beschijvend niveau Kennis krijgt betrekking op een klasse van verschijnselen, uitgedrukt in formele taal	Proceptual-symbolic world Weergave van de werkelijkheid in symbooltaal
Grondniveau Kennis is sterk visueel, gecontextualiseerd, intuïtieve relaties tussen begrippen, uitgedrukt in spreektaal	Embodied world Weergave van de werkelijkheid zoals we hem met het blote oog zien
<i>Studie I (licht als golfmodel) n.a.v. Hiele(1973)</i>	<i>Studie II (foto-electrisch effect) n.a.v. Tall(2004)</i>

Figuur 1. Trefwoorden voor de in beide studies gehanteerde begripsniveaus.

Vanaf het laagste niveau omhoog redenerend zal een leerling eerst laten merken enkele vaktermen te kennen, gevolgd door een globale uitleg zonder nadere duiding van de verbanden. Ook wordt er hierbij van uitgegaan dat het makkelijker is iets te verklaren met dingen die je ziet, de zogenaamde ‘embodied world’ (Tall, 2004) dan dingen die je moet voorstellen. Tenslotte is het natuurlijk de kunst om het nieuwe geleerde in een andere situatie toe te passen (transfer) als ook om van algemeende geldende regels te kunnen aangeven in welke mate die in een situatie van toepassing zijn. De leerling begeeft zich in de zogenaamde ‘formal-axiomatic world’ (Tall, 2004). In de beschrijving van de studies zelf worden voorbeelden gegeven van vakinhoudelijke termen en concepten die met dit instrument in pre- en post-test werden gescoord.

Studie I: Het golfmodel van licht

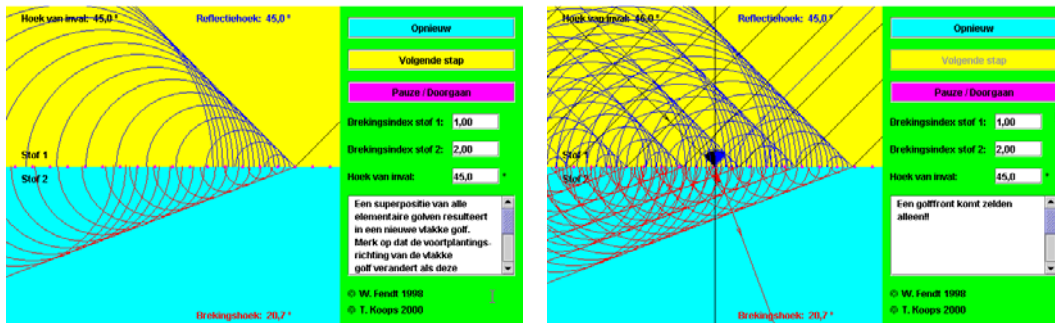
Begripsaspecten

Leerlingen in de bovenbouw van havo en vwo blijken moeite te hebben met het abstraheren van fysische ervaringen en verschijnselen naar schema's, tekeningen en formules die samen de begrippen rond het thema licht als golfverschijnsel begrijpelijk en werkbaar moeten maken. De begrippen rond interferentie (faseverschillen, maxima/ minima, buiklijnen/knooplijnen) kunnen alleen goed aangebracht worden als de basiseigenschappen van het golfmodel en de verschijnselen rond breking en terugkaatsing van golven goed begrepen worden.

Specifieke vraag van deze studie

Deze studie beoogt meer inzicht te krijgen in de manier waarop gebruik van een applet bijdraagt aan een eventueel leereffect. De onderzoeksvraag van studie I is:

Hoe draagt een applet over golffronten bij aan de ontwikkeling van begrippen rond het thema licht als golfverschijnsel?



Figuur 2a en b. Screenshots van de applet ‘Spiegeling en breking van golven’.

De applet bouwt in een aantal stappen de modelmatige beschrijving van de breking en terugkaatsing van een lichtgolf op. De leerling kan de invloed van verschillende parameters op het gedrag van het golffront onderzoeken. Applet afkomstig van (Fendt, 2000).

Onderzoeksmethode

Het onderzoek is uitgevoerd in een groep 5-vwo leerlingen ($n = 5$) met het profiel Natuur en techniek of Natuur en gezondheid. Het onderwerp van deze studie sloot aan bij de bestaande lesplanning, zodat wordt voldaan aan de voorwaarde van Bransford (1999) dat voor een zinvolle toepassing van een ICT-leermiddel het moet worden ingebed in het bestaande curriculum.

De applet ‘Spiegeling en breking van golven’ (figuur 2; Fendt 2000; vertaling T. Koops) heeft de volgende eigenschappen die hem geschikt maken voor gebruik in lesmateriaal: een proces wordt zichtbaar gemaakt in bewegende beelden dat minder goed op papier is te vangen; de gebruiker kan interacteren met de applet door parameters te variëren, en hij is in het Nederlands.

De interactie met de applet werd gestuurd via een instructieblad om te voorkomen dat de leerlingen alleen maar vrijblijvend wat met de applet spelen. Voor het meten van het begrip van de stof is gekozen voor leerlinginterviews in de vorm van hardop-denken-protocollen. We meten het abstractieniveau dat een leerling heeft bereikt (zie figuur 1) bij het begrip van het golfmodel aan twee kenmerken, die gescoord worden middels 9 indicatoren:

- I. De mate waarin de leerling (nieuwe) vaktal juist hanteert:
 1. Juist gebruik van basisbegrippen: golflengte, amplitude, golfsnelheid (eventueel ook frequentie, maximum, minimum);
 2. Juist gebruik begrippen ‘golfvront’ en ‘lichtstraal’;
 3. Inzicht dat golflengte verandert bij breking;
 4. Begrijpen van verschillen tussen modellen voor licht (geometrische optica, golfoptica);
 5. Verwoorden principe van Huygens;
 6. Toepassen principe van Huygens;
 7. Juist voorspellen van gedrag van golf na kleine opening.

II. De mate van transfer die de leerling maakt naar de verschillende fysische situaties waar het golfmodel voor gebruikt kan worden:

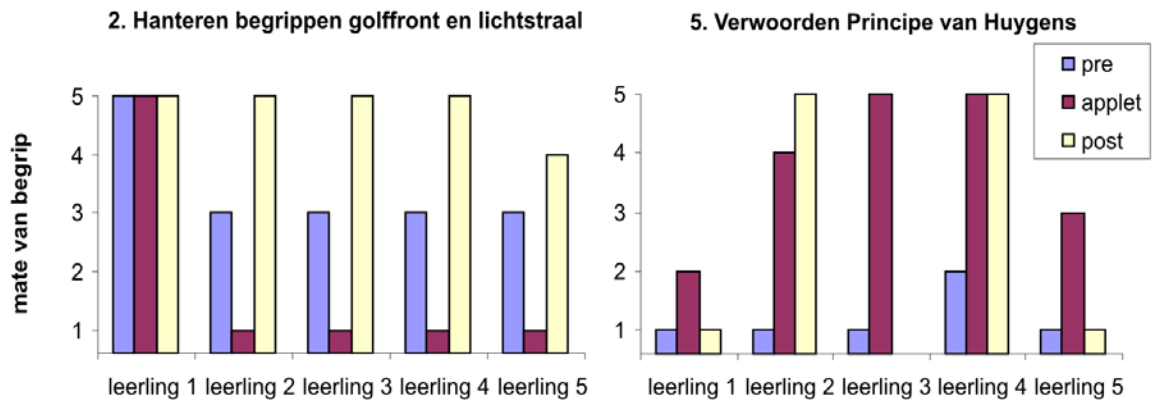
1. Transfer van golven in water naar golven in licht als model;
2. Transfer van golven in water naar golven in licht in een specifieke situatie.

We gebruiken een vijfpuntsschaal om de mate van begrip voor iedere indicator te scoren:

5. Goed begrepen, transfer mogelijk
4. Wellicht goed begrepen, vaag omschreven
3. Twijfelachtig of het is begrepen
2. Twijfelachtig begrip en vaag omschreven
1. Zeker niet begrepen

Resultaten en analyse

De meetgegevens bestaan uit de uitgeschreven pre-interviews, de antwoorden van de leerlingen op de instructie bij de applet, en de uitgeschreven post-interviews (alles online beschikbaar (VanRaaij, 2005)). De mate van begrip van iedere leerling per indicator pre, tijdens en post instructie is gescoord in tabel 4.1 (VanRaaij, 2005). Ter illustratie zijn grafische weergaven van indicatoren 2 (hanteren begrippen golffront en lichtstraal) en 5 (verwoorden Principe van Huygens) opgenomen in figuur 3.



Figuur 3a en b. Grafische weergave van toename van mate van begrip voor twee van de negen indicatoren voor, tijdens en na de les met de applet.

Uit figuur 3a is te lezen dat het juist gebruik van de basisbegrippen en het hanteren van de begrippen golffront en lichtstraal bij alle leerlingen omhoog is gegaan (bij wie het niet al op het hoogste niveau was). Het werken met de applet stimuleert dus het juist gebruik van de vaktaal en de begrippen rond het golfmodel van licht.

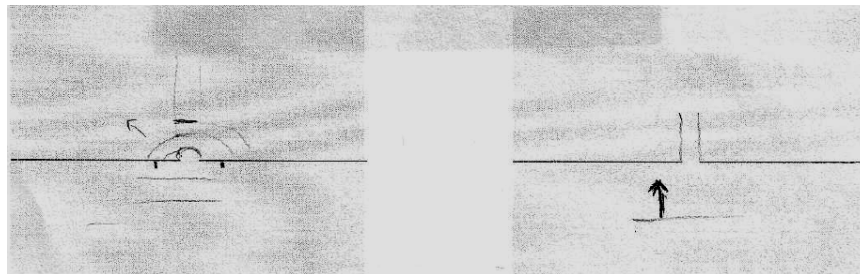
Een vaag begrip van eigenschappen van natuurkundige modellen in het algemeen weerhoudt leerlingen van het bereiken van hogere abstractieniveaus. Een typisch voorbeeld is de relatie tussen een modelsysteem (in dit geval de waterbak) aan een fysisch model (in dit geval de golftheorie van licht), zoals blijkt uit onderstaand fragment (o is de onderzoeker, l is de leerling):

- 25 o *En dan gebruik je een andere soort golven om het zichtbaar te maken?*
- 26 1 *Ja. Nou ja zichtbaar, je kunt het er in ieder geval een beetje mee aantonen, met het water.*
- 27 o *En wat gebeurt er met het water dan?*
- 28 1 *Ja dat gaat gewoon... je krijgt gewoon... het beweegt. En eh, dan gaat het trillen, en dan krijg je gewoon golven. En die golven geef je.. daar doe je licht overheen, of overheen, je laat zeg maar de toppen van de trillingen... daar is het licht zeg maar, in dit model.*

Uit de transcripts blijkt dat verschillende begrippenparen regelmatig door elkaar worden gehaald of verkeerd gebruikt: continuïteit vs. periodiciteit; buik en knoop vs. piek en dal; frequentie vs. golflengte; lichtstraal vs. golffront (zie Van Raaij 2005). Deze inhoudelijke misconcepties kunnen leerlingen weerhouden van het bereiken van een hoger begripsniveau.

Het golfmodel van licht heeft tegenintuïtieve consequenties voor het gedrag van licht. Ook leerlingen die de transfer van golven in water naar golven in licht goed maken, laten zien moeite te hebben te geloven wat ze zelf beweren. Deze leerling durft de conclusie toch niet aan en volgt uiteindelijk toch zijn preconcepties en niet het model. Het gaat hiet eerst over watergolven (104) en dan over lichtgolven (122 ev):

- 104 1 *Er komt hier dus zo'n golffront aan [tekent vlak golffront] en die gaat dan daarheen. Ja, een deel wordt teruggekaatst, ja, het houdt zeg maar op. En dan loopt ie er doorheen. Daar gaat het wel recht verder, maar aan de zijkant wordt het dan... het gaat een beetje rond [tekent deel van golffront dat rechtdoor gaat door opening met wat ronde golven aan de zijkant]. Die golf gaat natuurlijk, ja, als je het heel theoretisch bekijkt gaat ie gewoon rechtdoor zo.*



- [...] [...]
- 113 o *Hm. Ok.*
Dat is dan een situatie met water. En dan hier dezelfde situatie, alleen dan met licht. Dus er komt een golffront van licht aan, vanonder, en dit is een opening die klein is ten opzichte van de golflengte van het licht.
- [...] [...]
- 122 1 *Ehm, ja. Dan denk ik, ja het gaat alleen zo. [tekent twee lijnen recht omhoog langs opening]. Maar dat is natuurlijk niet zo. Het gaat natuurlijk ook een beetje naar de zijkanten toe.*
- 123 o *Waarom?*
- 124 1 *Ja, hetzelfde als met water, dat het een beetje... het licht wat wel weer terugkaatst, dat gaat er dan... [onverstaanbaar]. Ehm, ja. Dus het gaat alleen rechtdoor. Eigenlijk. Als ze kaarsrecht invallen.*
- 125 o *De stralen komen kaarsrecht binnenvallen.*
- 126 1 *Dan gaan ze allemaal rechtdoor ja.*
- 127 o *Dus het heeft niks met golven te maken daar?*
- 128 1 *Ja, eigenlijk wel. [lacht] Ehm, ja, dan weet ik niet waarom dat water dan wel afbuigt. We hebben toen die simulatie met die bak zo... [stilte]*

Conclusies en discussie studie I

Het juist gebruik van begrippen uit de vaktaal is verbeterd na werken met de applet. Vergroten van vakinhoudelijk begrip wordt soms gehinderd door het niet begrijpen van de eigenschappen van natuurkundige modellen in het algemeen. Om te bepalen of de toename in begrip toe te schrijven is aan de applet, zou een controle-experiment gedaan moeten worden. Omdat het aantal geïnterviewde leerlingen erg klein is, kan de invloed van individuele verschillen tussen de leerlingen groot zijn. Factoren als motivatie voor het vak, gevoel van het te kunnen of er goed of slecht in te zijn zullen meespelen.

Onze ervaring is dat dit soort onderzoek ook direct van nut is voor de docent die de natuurkundelessen geeft aan de betrokken leerlingen. Er zijn verschillende onderwerp-inhoudelijke misconcepties bij de leerlingen aan het licht gekomen waar de docent van de klas op kan focussen in de reguliere lessen:

- De koppeling tussen trillingen en massa van deeltjes zorgt voor moeilijkheden: in het golfmodel van licht spelen massa-effecten geen rol.
- Het relateren van golfverschijnselen aan andere soorten trillingen geeft aanleiding tot moeilijkheden: bij vuur (warmte) trillen deeltjes, maar ook dat helpt niet bij het begrijpen van lichtgolven.
- Het door elkaar halen van een aantal begrippenparen.

Ook heeft de docent ideeën opgedaan voor een verbeterde inbedding en motivering van dit stuk stof in het lesprogramma. Hij wil de volgende keer leerlingen meer expliciet er zelf achter laten komen dat ze bepaalde verschijnselen (zoals buiging van licht) nog niet kunnen verklaren met wat ze al weten over licht, zodat het duidelijker wordt wat de noodzaak van het golfmodel is.

Studie II: Het foto-eletrisch effect

Begripsaspecten

Nadat Young in 1801 Young met zijn dubbelspleet experiment overtuigend het golfkarakter van licht had aangetoond, zette Einstein in 1905 de gehele wetenschappelijke wereld op zijn kop met zijn artikel "On the electrodynamics of moving bodies", zie (Bryson, 2003). Hij stelde onder andere dat licht gezien kon worden als een deeltje en introduceerde hiermee het concept van de foton! Empirisch bewijs voor deze stelling werd al snel geleverd door Lenard's experiment, waarvan het resultaat bekend werd als het 'foto-eletrisch effect'. Gezien de moeite die het wetenschappers heeft gekost om de 'wave-particle duality' te aanvaarden, is het niet verbazend dat leerlingen veel moeite hebben om zich dit concept eigen te maken. Zo schrijft Ambrose et al. (1999) dat veel van zijn universitaire studenten er alternatieve concepties over fotonen op nahouden en dat zij deeltjes- en golfconcepten vaak oneigenlijk met elkaar vermengen. Het in deze studie beschreven onderzoek richt zich op de begripsontwikkeling bij 6VWO-leerlingen ten aanzien van het foto-eletrisch effect.

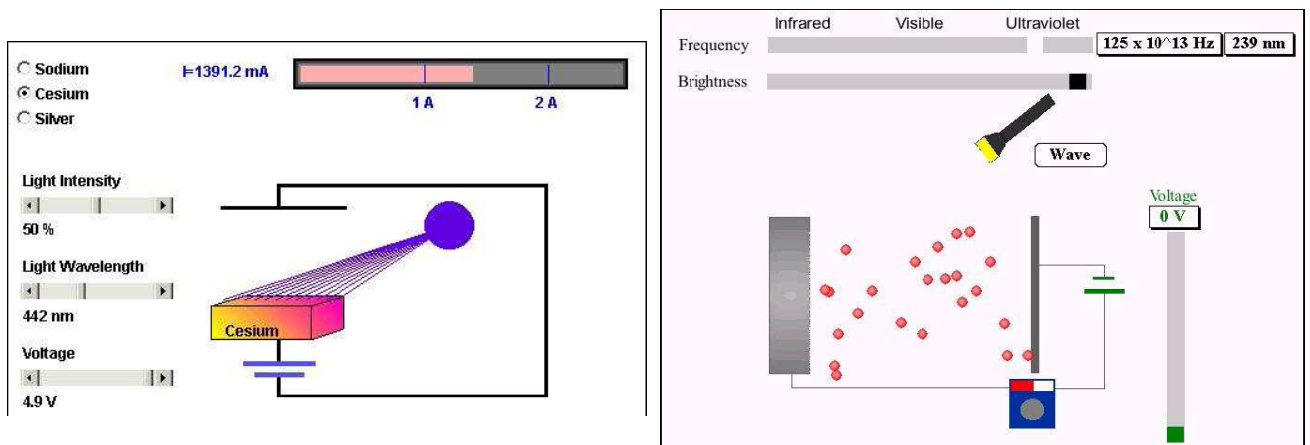
Specifieke vraag van deze studie

Het onderzoek poogt een indruk te geven van begripsontwikkeling ten aanzien van het foto-eletrisch effect. Wegens veiligheidsoverwegingen is het niet toegestaan om experimenten met een fotocel op scholen uit te voeren. Omdat applets de voor het menselijk oog onzichtbare stroom van vrijgemaakte elektronen kan visualiseren, is gekozen om begripsontwikkeling ten aanzien van het foto-eletrisch effect te bestuderen indien applets worden gebruikt. Afgaande op de resultaten van Steinberg et al. (1996), kan voorzichtig worden aangenomen dat de applets een waardevolle aanvulling kunnen vormen op tekstboeken. Het onderzoek van studie II is geleid door de volgende onderzoeksvraag:

Welke begripsontwikkeling leveren het gebruik van applets op tijdens de introductie van het foto-elektrisch effect?

Onderzoeksmethode

Aan het onderzoek werd deelgenomen door leerlingen van een 6VWO klas, bestaande uit 18 leerlingen. In totaal zijn drie lessen gebruikt voor het onderzoek. Eerst is het foto-elektrisch effect op een klassikale bord-boek manier gepresenteerd, gevolgd door het werken met de applets. Tijdens het werken met de applets gebruikten de leerlingen een speciaal voor dit onderzoek geschreven werkblad. Reeds bestaande, gratis beschikbare, applets zijn gebruikt tijdens dit onderzoek. De eerste applet visualiseert het foto-elektrisch effect op een macroscopisch niveau (figuur 5a). Hierbij wordt alleen het resultaat van het foto-elektrisch effect getoond, het al of niet lopen van een stroom tijdens een fotocel experiment. De tweede applet (figuur 5b) visualiseert op een microscopisch niveau hoe elektronen vrijkomen en hoe deze zich van de kathode naar anode bewegen.



Figuur 5 a en b. Screenshots van de twee gebruikte applets.

De linker applet visualiseert macroscopische aspecten. <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap28/PhotoEffect/photo.htm>

De rechter applet geeft een indruk van microscopische aspecten. <http://web.hep.uiuc.edu/home/tstelzer/102project/pe.htm>

Voor en na het werken met de applets vond een test plaats zonder gebruik van het schoolboek. De gebruikte pre- en post-tests zijn speciaal voor dit onderzoek gemaakt (Diepenbroek, 2006). Het bepalen van de begin- en eind begripsniveaus is gedaan aan de hand van deze pre- en post-tests. Op basis van de gegeven antwoorden zijn de begripsniveaus op de respectievelijke vragen bepaald. In figuur 1 is schematisch weergegeven welke niveaus van begrip gebruikt zijn. Tall(2004) identificeert diverse 'werelden', welke typerend zijn voor de mate van begrip van concepten. Synthese van het 'werelden-model van Tall en het model van Chin en Brown(2000), heeft geleid tot de volgende 7-puntsschaal:

Begripsniveau	Numerieke score
Uitleg causale verbanden op microniveau	7
Tussenniveau	6
Uitleg causale verbanden op macroniveau	5
Tussenniveau	4
Globale uitleg zonder causale verbanden.	3
Tussenniveau	2
Grondniveau	1

Score 1 wordt toegekend als de leerling niet tot een antwoord kan komen. Score 3 wordt toegekend als er een antwoord is geformuleerd, welke nog steeds een expliciete link met de voor het blote oog zichtbare wereld is. Er heeft bij de lerende dus weinig abstrahering plaatsgevonden. Bijvoorbeeld: de leerling kan de vergelijking van Einstein invullen en eventueel omschrijven. Echter, vanuit deze vergelijking het concept van uittree-energie en de grensfrequentie afleiden kan de leerling niet.

Scores 5 en 7 komen overeen met respectievelijk de ‘formal’ en ‘symbolic’ werelden. Score 5 wordt toegekend indien de concepten en de relatie’s daartussen voor de lerende duidelijk zijn. Bijvoorbeeld: de leerling kan een begin maken met de uitleg waarom de golftheorie van licht het foto-elektrisch effect *niet* kan verklaren, maar kan de redentatie niet sluitend krijgen. Score 7 wordt toegekend indien een volledig begrip –zowel kwalitatief als kwantitatief –bij de lerende aanwezig is. In twijfelgevallen kunnen ‘tussenniveau-scores’ worden toegekend.

Op basis van visuele inspectie van de datapunten (*QQ-plot*) en de beperkte grootte van de populatie ($n=8$ en $n=13$), is voor een Wilcoxon Signed-Rank test met test-statistiek z gekozen.

Tevens zijn citaten verzameld uit de gegeven antwoorden ter illustratie van het al dan niet begrepen hebben van bepaalde aspecten van het foto-elektrisch effect.

Resultaten

De scores van de leerlingen voor en na het gebruik van de applets zijn vergeleken. Niet alle deelnemende leerlingen waren aanwezig bij zowel pre- als post-test. In onderstaande tabel staan alleen de scores van de leerlingen die beide onderdelen in pre- en posttest hebben gedaan. Significantie is nagegaan met de Wilcoxon Signed-Rank test.

Onderdeel	n	Pre-test score min=1, max=7	Post-test score min=1, max=7	z	Significant
Macroscopisch begrip	8	4.0	4.1	-.702	Nee ($\alpha = .483$)
Microscopisch begrip	11	4.0	4.8	-1.983	Ja ($\alpha < 0.05$)

Figuur 6. Scores op pre- en posttest bij het gebruik van applets over het foto-elektrisch effect.

Het begrijpen van het fotocel experiment wordt gezien als het macroscopisch begrip van het foto-elektrisch effect. Op basis van de uitkomsten (figuur 6) kan geconcludeerd worden dat het begripsniveau na het gebruik van de applet niet significant is gestegen ten opzichte van het begripsniveau voor het gebruik van de applets. Het gebruik van de applet dat zich voornamelijk richt op het microscopisch begrip heeft meer effect. Hier is het begripsniveau na het gebruik van de applet significant gestegen ten opzichte van het begripsniveau voor het gebruik van de applet. Ter illustratie hiervan enkele citaten. Hoewel er bij één leerling verwarring lijkt te bestaan over de relatie tussen de fundamentele concepten frequentie van het licht en grensfrequentie tijdens de pre-test, duidt het antwoord van leerling 6 op de post-test op (ontwikkeld) begrip:

”Wanneer er een lichtbundel op een metalen plaat valt, treedt er een foto-elektrisch effect op. Bij het fotoelektrisch effect zorgen fotonen die op een metalen oppervlak vallen ervoor, dat de energie van een foton overgedragen wordt aan een elektron. Hierdoor kan de elektron uittreden.”

In eerste instantie wordt nog steeds niet duidelijk of deze leerling zich realiseerde dat het fotoelektrisch onder beperkte condities plaatsvindt. Verderop in de post-test wordt dit aangevuld:

"(..)kinetische energie is kleiner dan de energie van het foton, omdat de uittree-energie er nog af moet (Wu)."

Ter vergelijking zullen delen van antwoorden van leerling 17 gegeven worden.

"(..) Als er een foton (van het monochromatische licht) op een metaal vlak valt, zal deze opgenomen worden door een electron uit het metaal, zolang de energie van het foton groter is dan de uittree-energie van het electron. Dit gebeurt alleen als het licht een kleinere golflengte heeft dan de zogenoemde grensgolflengte. De frequentie van het licht moet dus groter zijn dan de grensfrequentie. Hierdoor zal het electron een snelheid krijgen(..)"

In vergelijking met het antwoord van de pre-test van leerling 6 is de lijn van argumentatie van leerling 17 wel duidelijk en op basis van het antwoord lijkt leerling 17 in te zien dat fotoemissie onder een bepaalde conditie optreedt en duidt deze ook (in termen van $f_{\text{licht}} > f_{\text{grens}}$). Ook wekt leerling 17 de indruk dat hij de grensfrequentie als iets inherent aan het metaal ziet.

Conclusies en discussie studie II

De volgende onderzoeksvraag heeft centraal gestaan tijdens het onderzoek:

Welke begripsontwikkeling leveren het gebruik van applets op tijdens de introductie van het foto-elektrisch effect?

Het macroscopische begripsniveau is niet gestegen. Het microscopisch begripsniveau is wel gestegen ten opzichte van het begripsniveau voor het gebruik van de applets.

De opzet van deze case-studie biedt geen basis voor het leggen van causale verbanden. Echter, de waargenomen stijging van het begripsniveau voor het microscopische begrip doet vermoeden dat applets in het bijzonder geschikt zijn als concepten worden gevisualiseerd uit de abstracte, formal-axiomatische wereld.

Leren over licht: overall conclusies en discussie

In studie I verbeterde het juiste gebruik van vaktaal en begrippen. Problemen traden op bij leerlingen die in het algemeen een vaag begrip hebben van natuurkundige modellen. Ook inhoudelijke 'misconcepties' werden aangetroffen.

In studie II werd een significant beter fundamenteel begrip van het foto-elektrisch effect gevonden. Voor andere begrippen werd geen significante verbetering gevonden. Wel werden ook hier enkele alternatieve concepties aangetroffen.

Op basis van de resultaten van de twee studies, kan voorzichtig gesteld worden dat het gebruik van applets het begrip kan verhogen. Voorwaarden voor effectief gebruik zijn behalve een zorgvuldig en fysisch correct ontwerp, een goede inpassing in samenhang met andere geschikte leeractiviteiten (b.v. Arons, 1997). Eén van die leeractiviteiten is het bediscussiëren van waarnemingen en voorlopige conclusies, net als bij echte proeven (Roth e.a., 1997). De interview-sessies in studie I bevatten daar al elementen van en tonen sterkere leereffecten dan studie II.

Onderzoek onder grotere aantallen leerlingen is nodig om nader licht te werpen op deze materie.

Dankwoord

Dank voor de vruchtbare samenwerking aan Rob Buter en leerlingen van 5VWO, OSG Hengelo, Bataafse Kamp, Hengelo (OV) (studie I), en Jaap Hofstra en leerlingen van 6VWO, Stedelijk Lyceum Zuid, Enschede (studie II).

Literatuur

- Ambrose, B. S., Shaffer, P.S. et al. (1999). "An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference." *Am. J. Phys.* 67(2): 146-155.
- Arons, A.B. (1997), *Teaching Introductory Physics*. New York: Jonh Wiley & Sons.
- Bransford (1999). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*. National Research Council, VS.
- Bryson, B. (2003). *A short history of nearly everything*. New York: Broadway books.
- Chin, C., & Brown, D. E. (2000). Learning science: a comparison of deep and surface approaches. *Journal of research in science teaching*, 37(2), 109 - 138.
- Diepenbroek, P. (2006). Het gebruik van applets tijdens de introductie van het foto-electrisch effect en de resulterende begripsontwikkeling. Masters thesis, Physics Education Research, University of Twente. <http://www.utwente.nl/elan/LO/master/studentprodukt/OvO/OvO-na/DiepenbroekOvO.pdf>
- Fendt, W. (2000). Spiegeling en breking van golven. Applet. http://www.walter-fendt.de/ph14nl/huygenspr_nl.htm
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (1994). *Fundamentals of Physics*. Extended 4th edition, Wiley, NY. ISBN 0-471-60012-1.
- Hiele, P.M. van (1973). *Begrip en inzicht*. Purmerend, Muusses.
- Jong, T. de (2005). The guided discovery principle in multimedia learning, p. 215-228. In: *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (Ed. R.Mayer). Cambridge University Press.
- Raaij, M. van (2005). De bijdrage van een applet over golffronten aan begripsontwikkeling rond licht als golfverschijnsel bij 5-vwo leerlingen. Masters thesis, Physics Education Research, University of Twente. <http://www.utwente.nl/elan/LO/master/studentprodukt/OvO/OvO-na/M.E.vanRaai.pdf>
- Roth, W., McRobbie, C. J., Lucas, K. B., and Boutonne, S. (1997). Why may students fail to learn from demonstrations? A social practice perspective on learning inn physics. *Journal of Research in science teaching*, 34(5), 509 – 533.
- Steinberg, R. N., Oberem, G. E., & McDermott, L. C. (1996). Development of a computerbased tutorial on the photoelectric effect. *American journal of physics*, 64(11), 1370 -1379.
- Tall, D. (2004). Thinking through three worlds of mathematics. Proceedings of the 28th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, Bergen, Norway, p282-288. <http://www.warwick.ac.uk/staff/David.Tall/pdfs/dot2004d-3worlds-pme.pdf>
- Wieman, C. & Perkins, K. (2005). Transforming Physics Education. *Physics Today*, november 2005, 36-41. http://cecelia.physics.indiana.edu/journal/physics_education.pdf