

## Elementaire begrippen in de geometrische optica:

### leerlingenvoorstellingen en schoolboekteksten

Th.Wubbels

Vakgroep Natuurkunde Didactiek  
Rijksuniversiteit Utrecht (1)

#### Summary

This paper reviews research on pupils' framework in the domain of geometrical optics. Literature is cited on the concepts of 'light', 'vision' and 'images in a plane mirror'. It is concluded that pupils have conceptions that are not in harmony with conceptions commonly advocated in physics. The pupils' conceptions are firmly rooted in experiences and in common parlance. The most peculiar feature of pupils' frameworks is the 'decoupling' between light being directed onto an object and the act of seeing the object.

Dutch textbooks on geometrical optics for secondary education are analysed. It is found that the authors seem not to realise what frameworks pupils have. The frameworks are not mentioned or challenged. Some texts that aim to teach a common physics conception can be interpreted by pupils without restructuring their framework.

#### 1. Inleiding

In stripverhalen zien we helden die uit hun ogen stralen laten komen waarmee ze muren doorboren. We weten dat sommige mensen ons met 'prie-mende ogen' kunnen aankijken, terwijl anderen ons 'het licht niet in de ogen gunnen'. Iemand kan 'ziende blind' zijn of 'de hoofdzaken uit het oog verliezen'. Iedereen weet, dat wanneer je iets goed wilt zien je het 'in het licht' moet houden. Het is niet moeilijk deze reeks uitspraken aan te vullen met andere voorbeelden van verschillende manieren waarop begrippen als 'zien', 'licht' en 'oog' in ons dagelijks spraakgebruik een belangrijke rol spelen. Mede op grond van dit spraakgebruik en daarmee verbonden ervaringen hebben leerlingen bepaalde voorstellingen bij deze en andere fysische begrippen en het is van belang voor het onderwijs in de optica om inzicht in de aard van die voorstellingen te hebben. Dit belang wordt ondermeer onderstreept door resultaten van onderzoeken waaruit blijkt dat optica-onderwijs, althans in West Duitsland en Zweden, er maar in geringe

mate toe leidt dat leerlingen fysische beschrijvingswijzen gaan hantieren voor optische verschijnselen (Jung 1981b, Andersson en K arrqvist 1983). Het onderwijs in de geometrische optica in deze landen is vergelijkbaar qua omvang en inhoud met dat in Nederland. Uit de gegevens van Andersson en K arrqvist valt bijvoorbeeld af te leiden dat niet meer dan 11% van de Zweedse leerlingen na het onderwijs in de geometrische optica gebruik gaat maken van het idee dat licht in de ruimte los van haar bron en uitwerking kan bestaan en dat het zich voort plant door de ruimte (2).

Er bestaat een snelgroeiende hoeveelheid onderzoeksgegevens over de voorstellingen die leerlingen hebben bij fysische begrippen (zie Pfundt en Duit, 1985). Een relatief klein deel daarvan heeft betrekking op het gebied van de (geometrische) optica. Onderzoek op dit gebied is recentelijk gedaan in Frankrijk (Guesne 1984, Thibergien 1984), West Duitsland (Jung 1981a, 1981b, 1982, Wickihalter 1984), Zweden (Andersson en K arrqvist 1983), Itali  (La Rosa e.a. 1984), Engeland (Zylbersztajn en Watts 1982, Watts 1985), Australi  (Stead en Osborne 1980) en de Verenigde Staten (Goldberg en Mc Dormett 1983).

In dit artikel zullen leerlingenvoorstellingen bij de begrippen 'licht', 'zien' en 'spiegelbeeld' worden besproken, die volgens de genoemde onderzoeken redelijk frequent voorkomen. Wij kiezen deze begrippen omdat er relatief het meeste onderzoek naar is gedaan. Verder zal worden ingegaan op de vraag hoe Nederlandse schoolboekteksten voor HAVO en VWO over deze begrippen eruit zien. Voor de drie begrippen is in schoolboeken nagegaan waar ze aan de orde komen, hoe de behandeling eruit ziet, in hoeverre ze rekening lijken te houden met de besproken leerlingenvoorstellingen (3), of ze uitspraken doen die, in fysisch opzicht minder juiste, leerlingenvoorstellingen wellicht kunnen bevestigen en in hoeverre leerlingenvoorstellingen ter discussie worden gesteld. In het volgende zullen met name teksten uit schoolboeken worden vermeld als voorbeelden van de algemene trend van de resultaten van deze analyse (4).

## 2. Licht

### 2.1. Leerlingenvoorstellingen

La Rosa e.a. (1984) beschrijven als   n van de belangrijkste ervaringspunten uit het dagelijks leven ten aanzien van het begrip 'licht': 'Licht is een verschijnsel dat overal in het leven is doorgedrongen. We hebben ons aangepast aan een leven waarin licht en duisternis (de afwezigheid van licht) quasie-ritmisch afwisselen (...). Licht is, net als lucht, deel van onze omgeving'. De ervaringen met licht en zien hebben, afgezien van wellicht lachspiegels, fatamorgana's en sommige andere ervaringen in het vrije veld geen problematisch karakter. Ze zijn dermate gewoon dat leerlingen er weinig bewuste

herinnering aan zullen hebben. Dit zou wel eens anders kunnen zijn dan de ervaring met bijvoorbeeld mechanische begrippen als wrijving of traagheid: leerlingen zijn zich bewust dat je moeite moet doen om te blijven fietsen. De door La Rosa geschetste voorstelling wordt teruggevonden in de volgende uitspraak van een 13-jarige leerling die geen opticaonderwijs heeft gehad:

"Licht is iets ..... dat met het weer verandert; op sommige dagen is het lichter dan op andere." (Guesne 1984, blz. 81) (5,6).

Licht is ook voorwaarde om te zien en ieders ervaring is dat deze voorwaarde onmiddellijk vervuld wordt in een ruimte, wanneer er een lichtbron is. Naar aanleiding van de vraag hoe het komt dat je een boek ziet is dan ook een karakteristiek antwoord van een leerling die geen opticaonderwijs heeft gehad:

"Als het donker was in de kamer zou je het niet zien." (Andersson en Kärqvist 1983, blz. 304).

Vergelijkbare uitspraken worden aangetroffen bij leerlingen in het V.O. van alle leeftijden en zowel bij leerlingen voor als na het opticaonderwijs en uiteraard ook bij volwassenen. In deze uitspraken komt een voorstelling van een toestand bij het begrip 'licht' naar voren. Naast deze voorstelling worden in leerlingenuitspraken nog drie andere typen aangetroffen. Licht wordt in die uitspraken zeer nauw verbonden met zijn bron of zijn uitwerking, of wordt opgevat als iets dat in de ruimte gelokaliseerd is tussen de bron en de waargenomen uitwerking.

Voorbeelden van deze voorstellingen vinden we in de volgende uitspraken van 13 à 14 jarige leerlingen die geen opticaonderwijs hebben gehad.

a) licht als bron:

(Als antwoord op de vraag: "Waar is licht?")

"Licht is overal.....nou ja, eh.....op straat, in huis...ook in auto's,.....overal zijn lampen. (Interviewer: en hier in deze kamer, is er hier ook licht?) Niet op dit ogenblik: je moet hem eerst aandoen (Guesne 1984, blz. 83).

Op de vraag van een student "Waar denk je aan bij licht?"

"de zon, lamp, vuur" (Student: niet aan een fototoestel?)

"oh ja flitslicht" (7).

b) licht als uitwerking:

"Licht is er waar de zonnestralen op de muur komen."

"Een schaduw, dat is een reflectie; maar...het is donker licht." (Guesne 1984, blz. 80).

De uitspraken onder a) en b) komen minder voor naarmate leerlingen ouder worden (Tiberghien 1984).

c) licht gelokaliseerd tussen bron en uitwerking:

"Het licht vertrekt, en komt dan op een voorwerp... Het verlicht het, maar daarachter, het kan niet door het voorwerp heen komen." (Guesne 1984, blz. 81).

De uitingen van leerlingen zijn vaak zeer diffuus en complex. Dit blijkt onder meer uit het feit dat bij één en dezelfde leerling vaak uitspraken uit meer dan een categorie worden gevonden. Daardoor is het ook niet mogelijk aan te geven hoeveel leerlingen een opvatting uit een van de categorieën huldigen. Wellicht zijn de uitingen dan ook voor een belangrijk deel bepaald door de gestelde vraag.

De onder c) genoemde voorstelling staat het dichtst bij de beschrijvingswijze die in de natuurkunde gebruikelijk is. Toch lijkt deze voorstelling bij sommige leerlingen onfysisch in de zin dat het geen echte beschrijving van een proces is. Weliswaar worden uitdrukkingen gebruikt zoals "het licht kan er niet doorheen komen", "het licht komt door het raam" en "het licht weerkaatst op de spiegel" maar met deze uitdrukkingen bedoelen leerlingen lang niet altijd een proces waarbij licht zich voortplant. Het gaat veeleer vaak om een statische opvatting vergelijkbaar met uitspraken als "een lijn die van A naar B gaat", "de weg van Zeist naar Utrecht" of "de weg loopt door een tunnel."

In het dagelijks spraakgebruik vinden we allerlei uitdrukkingen waarin een van de genoemde voorstellingen van het begrip 'licht' naar voren komt. Licht opgevat als toestand zien we in "het is licht", "hij schuwt het licht", "vals licht", "er gaat mij een licht op", "het licht is uit zijn ogen" en "in TL-licht is de kleur anders".

Elektrisch licht, remlicht en zonlicht zijn uitdrukkingen, waarin licht onmiddellijk met de bron is verbonden, terwijl bij lichtvlekken de verbinding met de uitwerking naar voren komt.

## 2.2. Schoolboekteksten

Ook in schoolnatuurkundeboeken worden met name in inleidende teksten uitspraken gedaan die het bestaan van de genoemde voorstellingen bij leerlingen kunnen bevestigen. De nauwe verbinding van het begrip licht met zijn bron wordt bevestigd door te spreken van "elektrisch licht" (PLON, lichtbronnen blz. 5). Licht gezien als toestand vinden we bevestigd in "een zee van licht" (PLON, lichtbronnen, blz. 5) en "de ruimte om ons heen is zo vol met licht" (Schweers en van Vianen, deel 2 blz. 144). Wanneer gesproken wordt over "licht op het scherm" (PLON, kleur en licht, blz. 3 en Engelhard deel E in een figuur over schaduwvorming, blz. 10) wordt de verbinding tussen licht en zijn werking benadrukt.

Het aantal van dergelijke bevestigingen van leerlingenvoorstellingen is echter niet erg groot en zeker niet symptomatisch in geen van de geanalyseerde leergangen. Zelden vinden we in de schoolboeken echter een aanpak die erop gericht lijkt naieve voorstellingen bij 'licht' uit te breiden tot of te vervangen door fysisch juistere. Als uitzondering vinden we in 'Exact' (deel 1, blz. 144) een relatief ver uitge-

werkte aanzet daartoe naar aanleiding van de vraag 'Kun je licht zien?' Ook voor schoolboekauteurs is deze vraag niet simpel te beantwoorden. Engelhard (deel E) schrijft op bladzijde 8: "Eigenlijk zie je dus niet de lichtbundel zelf, maar de deeltjes erin" en even later "Licht kun je alleen maar zien als het in je oog valt". Ook in andere boeken wordt regelmatig gesproken over 'het zien van licht'. Vooruitlopend op het vervolg van dit artikel zou ik willen stellen dat het de voorkeur verdient om in het onderwijs in de geometrische optica slechts over het zien van voorwerpen te spreken en niet over het zien van licht zoals in het dagelijks leven gebruikelijk is: Wanneer er licht (of precieser: een evenwijdige of divergerende lichtbundel) in je oog komt zie je iets waar dat licht vandaan komt.

### 3. Zien

#### 3.1. Leerlingenvoorstellingen

La Rosa e.a. (1984) stellen dat er in de alledaagse ervaring een directe relatie is tussen zien en licht en dat deze relatie vanzelfsprekend is: zonder licht kun je niet zien en dat is alles. In de dagelijkse ervaring is er weinig noodzaak om te veronderstellen dat er bij het zien iets in het oog komt. Je kunt goed functioneren zonder een dergelijk concept. Het is dan ook niet verwonderlijk dat leerlingen de vraag 'Hoe zie je iets?' vaak niet interpreteren als een vraag naar een proces dat plaatsvindt tussen voorwerp en oog. Uit associatietesten blijkt dat de begrippen 'zien' en 'licht' voor (Duitse) leerlingen van 13 tot 15 jaar niet spontaan sterk gekoppeld zijn. De voornaamste associaties bij 'zien' zijn allerlei voorwerpen en, in mindere mate, delen van het oog (Wickihalder, 1984). Op de vraag "Hoe zie je iets?" blijkt een beschrijving van het proces in de hersenen bij de omzetting van een netvliesbeeld naar een bewuste waarneming vaker een antwoord dan een beschrijving van het proces tussen voorwerp en oog.

Hoewel licht door veel leerlingen wel gezien wordt als een voorwaarde om te zien betekent dat niet, dat die leerlingen ook menen dat bij het zien licht in het oog moet komen. Nodig voor het zien van een voorwerp is slechts dat er zich niets tussen het voorwerp en de geopende ogen bevindt. Bij de dominerende voorstelling van 13- en 14-jarige (Franse) leerlingen is er echter bij het zien geen tastbare of beschrijfbaar verbinding tussen oog en voorwerp (Guesne 1984, blz. 94). Bij een Zweeds onderzoek bleken 20% van de 12-jarigen en 4% van de 15-jarigen bij het zien geen verbindingen tussen oog en voorwerp te veronderstellen (Andersson en K arrqvist 1983). Volgens La Rosa (1984) legden in zijn onderzoek 55 van de 63 ondervraagde 16-   17-jarige die geen optica onderwijs hadden gevolgd geen verband tussen zien met het oog en licht. De gegevens uit deze onderzoeken zijn door verschillen in de

onderzochte groepen, maar ook door de verschillende methoden die zijn gebruikt moeilijk te vergelijken. Duidelijk is in ieder geval dat vele leerlingen spontaan geen verband in fysische zin leggen tussen zien en het opnemen van licht door het oog.

Een sprekend voorbeeld geeft Jung (1981a, blz. 143/144) in een interview met een leerling:

Interviewer (I): Onder welke voorwaarde kun je een voorwerp zien?

Leerling (L): Dat het er is.

I : Ja?

L : Dat er niets voor staat.

I : Aha, laten we deze asbak als voorbeeld nemen: onder welke voorwaarde kun je hem zien?

L : Dat hij in het licht staat.

I : Als je je ogen dicht doet helpt dat niet.

L : Mijn ogen moet ik natuurlijk open houden om überhaupt iets te zien.

I : Wanneer ik mijn ogen open heb en het is donker zie ik toch ook niets? (I stelt nu voor dat er licht van de asbak in het oog moet komen)

L : Dat geloof ik niet! De asbak is toch geen lamp!

Uit dit protocol blijkt ook dat de leerling meent, dat slechts lichtbronnen licht uitzenden en dat er van voorwerpen geen licht uitgaat.

Door Watts (1985, blz. 186) wordt een voorbeeld gegeven van een uitspraak van een leerling bij wie het opticaonderwijs er maar gedeeltelijk toe heeft geleid dat hij een meer dynamische voorstelling bij het begrip 'licht' heeft gekregen. Hij beschrijft het ontstaan van een beeld op een scherm bij een diaprojector als volgt:

'De projector gooit het licht eruit met de lichtsnelheid - omdat licht natuurlijk met de lichtsnelheid beweegt - en dan komt het op dit scherm en stopt.....!

Leerlingen blijken vaak te menen dat licht zich verder van de bron kan verwijderen naarmate de lichtbron feller oplicht. Guesne (1984) zette in individuele interviews meer dan 30 13- en 14-jarige leerlingen die geen opticaonderwijs hadden gehad een brandend rookstaafje voor en vroeg hen of ze de gloeiende punt ervan konden zien. Die vraag werd door elke leerling met ja beantwoord, waarna gevraagd werd of de punt van het staafje licht uitzond. De meeste leerlingen (Guesne is niet precieser) antwoordden dat het staafje in het geheel geen licht uitzond of niet erg ver en zeker niet tot bij hen:

"Het zendt geen licht uit, het blijft waar het is."

"Het zendt erg weinig uit. Het is hoofdzakelijk de kleur die ..., het is hoofdzakelijk de kleur van het staafje, dat zorgt voor dit lichteffect" (Guesne 1984, blz. 91).

Kleur, opgevat als eigenschap van een voorwerp is voor een aantal leerlingen een voldoende beschrijving om het zien te 'verklaren'. Bij ditzelfde proefje merkt één van de leerlingen nadat hij het staafje heel dicht bij zijn gezicht heeft gebracht op:

"Oh, zelfs nu zendt het geen enkel licht uit..... Je kunt het zien, omdat het rood is, anders ....." (Guesne 1984, blz. 91).

Onder meer uit het onderzoek van Jung (1981a) blijkt, dat leerlingen in dit opzicht wit en zwart niet anders opvatten dan overige kleuren. Ook een zwart voorwerp zie je als het in het licht staat en is daarin niet anders dan enig ander voorwerp. De vraag naar het verschil tussen een donkere en een lichte muur is voor dergelijke leerlingen zonder diepere betekenis. Een karakteristieke reactie:

(gelach) "De éne is nu eenmaal licht en de andere donker" (Jung 1981a, blz. 146).

Vaak is er tussen duisternis en een zwarte kleur weinig verband voor leerlingen. De zojuist geciteerde leerling meent dat je in het donker toch van alles kunt herkennen. Uit het vervolg van het interview blijkt dat hij niet meent dat een zwart en wit voorwerp zich in het licht anders gedragen:

"Als je in het donker op een witte wand schijnt, is hij ook wit. Dan wordt als het ware de duisternis weggeschoven."

"Oh ja (.....), dat klopt, als je met de zaklantaarn op een zwarte wand schijnt, dan wordt het zwart, de duisternis, weggeschoven maar desondanks is het zwart er (Jung 1981a, blz. 146).

Een voorstelling die overeenkomst vertoont met klassieke theorieën over het zien zoals die van Pythagoras en Empedocles (8) wordt ook aangetroffen onder leerlingen, echter niet frequent. Volgens het



Lisa and her physics teacher are discussing seeing.

TEACHER: Explain how you see the book.

LISA: Signals go along nerves between the eyes and the brain.

TEACHER: Yes, this happens between the eyes and the brain. But there's some distance between the book and the eyes. Does anything happen between them?

What would you answer? Draw and explain.

Figuur 1. Opgave over het proces van het zien van Andersson en Kärqvist (1983).

Zweedse onderzoek gebruikt 9% van de 12-jarigen en 4% van de 15-jarigen één of andere verklaring van het zien, naar aanleiding van de opgave in figuur 1, waarbij er iets (blikken, stralen) vanuit het oog gaat naar het voorwerp dat gezien wordt.

"Stralen gaan van het oog naar het boek, zodat we het boek kunnen zien".

"Licht wordt in de ooglenzen gebroken en stroomt naar het boek".

(Andersson en Kärqvist, 1983, blz. 304).

Nog eens 5% van de 15-jarigen veronderstelt dat er iets tussen voorwerp en oog heen en weer gaat.

"De ogen zenden een of andere straal uit, die terugkomt in het oog en een boodschap overbrengt."

Overigens treedt in dit verband een opvallend verschijnsel op bij de vraag waarom iemand die scheef in een bekerglas kijkt een stukje plasticine op de bodem zonder water niet kan zien en met water wel. Voor het opticaonderwijs geeft 7% van de leerlingen een verklaring door te spreken over breking waarbij de richting van één of andere straal uit het oog verandert. Na het opticaonderwijs loopt dit percentage op tot ongeveer 22. Wellicht is dit resultaat een aanwijzing dat in het onderwijs te gemakkelijk (impliciet) gebruik wordt gemaakt bij een uitleg van de omkeerbaarheid van lichtstralen. Een proef, waarbij leerlingen een staaf moeten richten langs de richting waarin ze het stukje plasticine zien zal tot de introductie van een gezichtsstraal kunnen leiden doordat deze als het ware materieel wordt gemaakt. Wellicht verdient een proef waarbij op de plaats van het plasticine een lichtstraal wordt geproduceerd de voorkeur.

Voor de volledigheid merken we op dat er ook leerlingen zijn die veronderstellen dat er bij het zien iets in je oog komt. Van de Zweedse leerlingen voor het opticaonderwijs waren dit er ca. 13% (12-jarigen) en na het opticaonderwijs ca. 30% (15-jarigen).

Wanneer we het dagelijks taalgebruik bezien treffen we zowel uitdrukkingen aan waarin de ogen als ontvangers worden bestempeld (de ogen worden verblind) als uitdrukkingen waarin de ogen een actieve rol spelen: zijn ogen schoten vuur. De laatstgenoemde categorie uitdrukkingen lijkt sterk in de meerderheid. In het dagelijks taalgebruik komen vrijwel geen duidelijke aanwijzingen voor van de functie van de ogen als ontvanger in het proces van het zien. Dat dit geen toevalligheid is blijkt uit het feit dat ook in andere Europese talen vergelijkbare zinswendingen worden gevonden (Merzyn 1984).

Samenvattend kan gesteld worden, dat ten aanzien van het begrip 'zien' bij leerlingen veelvuldig een voorstelling voorkomt waarin geen sprake is van een verbinding tussen het oog en het voorwerp dat gezien wordt. In het bijzonder wordt verondersteld, dat voorwerpen, die geen licht-



bronnen zijn geen licht uitzenden. Op grond van de bevestiging van een dergelijke voorstelling in het spraakgebruik kan worden verondersteld dat deze opvatting hardnekkig is. Ook de resultaten van Jung's onderzoek (1981b) wijzen op de resistentie van deze voorstelling.

### 3.2. Schoolboekteksten

De aandacht die in schoolboeken besteed wordt aan het begrip 'zien' is gering. Met name wordt meestal maar kort (of zelfs helemaal niet) ingegaan op het procesmatige karakter van het zien, waarbij een ontvanger signalen opvangt van elk voorwerp dat gezien wordt. Soms wordt in een inleidende paragraaf een korte tekst aan dit onderwerp gewijd (bijv. Moderne Natuurkunde deel 2, blz. 79) of wordt terloops gemeld dat bij het zien licht in het oog komt (bijv. Engelhard deel E, blz. 8). Verder komt het zien van niet-lichtbronnen vaak kort aan de orde in het kader van diffuse terugkaatsing. Gepoogd wordt dan aannemelijk te maken (eventueel met experimentjes) dat bijvoorbeeld rookdeeltjes of een scherm in een lichtbundel licht in allerlei richtingen verstrooien (weerkaatsen) zodat we iets zien (9). Daarna wordt dan al of niet expliciet gegeneraliseerd naar het zien van voorwerpen in het algemeen. De nadruk bij deze behandeling ligt op het verstrooien en het oog speelt in de uitleg over het algemeen een ondergeschikte rol. Ook bij het onderwerp kleur wordt op analoge wijze aandacht aan het zien besteed.

Mijn indruk is dat uitleg over het zien van voorwerpen soms zodanig wordt gegeven, dat die uitleg ook gemakkelijk ingepast kan worden in een leerlingenvoorstelling die in fysisch opzicht minder juist is. Het duidelijkst komt dit tot uiting in vragen die in zo'n tekst aan de leerlingen worden gesteld. Als voorbeeld noem ik een tekst van Schweers en van Vianen (deel 2 blz. 144). Nadat in een zin is opgemerkt dat we een voorwerp zien als teruggekaatst licht in ons oog komt wordt gevraagd:

"Waarom zie je het witte papier van deze bladzijde?

Waarom zie je de gekleurde letters op deze bladzijde?

Hoe verklaar je dat je de zwarte letters ziet?"

Gezien het bestaan van de beschreven leerlingenvoorstellingen en de resistentie ervan zullen deze vragen voor veel leerlingen niet verwijzen naar het door de leerboekschrijvers bedoelde probleem. Een 'logisch' antwoord op de eerste vraag is 'omdat hij in het licht staat' en bij de laatste vraag 'vanwege het verschil in kleur met de ondergrond'. Dergelijke verklaringen zijn uiteraard toereikend voor veel leerlingen (en niet alleen voor hen!) en het belang van een vraag speciaal naar zwarte letters zal hen dan ook ontgaan. Pas voor iemand die is ingevoerd in de fysische beschrijvingswijze van het zien, krijgen deze vragen hun 'juiste' betekenis. Met name het ontbreken bij

leerlingen van de ervaring dat het zien van iets zwarts gekoppeld is aan 'geen licht opvangen' (Jung 1981a, blz. 146) zal ertoe kunnen leiden dat leerlingen deze vragen niet volgens een fysische beschrijvingswijze beantwoorden.

Een tweede voorbeeld betreft de discovery-achtige wijze waarop de DBK-methode tracht leerlingen zelf een fysische beschrijvingswijze van zien te laten formuleren. Door vragen te stellen over het al dan niet zien van voorwerpen in het donker (blok 11, blz. 7) tracht men leerlingen te leiden tot de conclusie dat je voorwerpen kunt zien als er licht in je oog komt. De conclusie dat je voorwerpen ziet als ze in het licht staan is echter geheel aansluitend op de ervaringen waarnaar gerefereerd wordt en ligt daarom voor veel leerlingen waarschijnlijk meer voor de hand.

Naast teksten die bestaande leerlingenbeelden eigenlijk ongemoeid laten, zijn er ook teksten die duidelijk geformuleerd zijn zodat strijdigheid tussen een leerlingenbeeld en een fysisch juistere voorstelling moet optreden. Toch is het ook in die gevallen de vraag of leerlingen op grond van die teksten zich een fysische denkmodel over het zien zullen eigen maken. Als voorbeeld neem ik een tekst van Engelhard (deel E, blz. 14) over een gedachtenexperiment. De leerling met zich een blaadje papier in een verduisterd lokaal voorstellen. Meegedeeld wordt dat het blaadje niet gezien kan worden omdat het geen licht uitzendt. Wanneer een lamp wordt aangedaan zien we het blaadje wel, waaruit de conclusie wordt getrokken dat het blaadje papier dan licht weerkaatst. Een dergelijke redenering zal voor leerlingen alleen maar overtuigingskracht hebben wanneer hen geheel duidelijk is dat in dit verband zien betekent dat er licht in het oog komt. Aan deze voorwaarde is blijkens hetgeen in het voorgaande gezegd is over leerlingenvoorstellingen bij veel leerlingen niet voldaan.

Een tweede voorbeeld van een aanpak die wellicht niet overtuigt ontleen ik aan Moderne Natuurkunde (deel 2, blz. 81), waar gesproken wordt over rookdeeltjes in een lichtbundel:

"doordat een rookdeeltje het licht verstrooit geeft het de indruk dat zo'n verstrooiingscentrum een lichtbronnetje is" (Moderne Natuurkunde deel 2, blz. 81).

Aan het effect van zo'n uitleg kan om minstens twee redenen worden getwijfeld. In de eerste plaats is het de vraag of leerlingen, die menen dat licht zich niet ver van een lichtbron zoals een vuurstaafje uitbreidt, zo gemakkelijk overtuigd worden dat een rookdeeltje of scherm in een lichtbundel licht verstrooit (en dus uitzendt) dat tot in het oog komt. In de tweede plaats kan verondersteld worden dat ze niet geneigd zullen zijn dit verschijnsel te generaliseren naar andere voorwerpen. In het algemeen geldt dat leerlingen bij een voorbeeld dat strijdig is met hun opvattingen over fysische verschijnselen, eerder geneigd zijn voor dat specifieke voorbeeld een uitzondering bij hun

opvatting te registreren dan hun opvatting te wijzigen (Wittrick 1985). De betreffende uitleg is sterk gebonden aan één of twee voorbeelden over rookdeeltjes of een scherm. In die gevallen is er visueel inderdaad gelijkenis met het zien van een lichtbron maar de overeenkomst met 'gewone voorwerpen' die gezien worden is gering. De kans bestaat dus dat als leerlingen al leren dat in deze gevallen licht van rookdeeltje of scherm in het oog komt, ze dat zullen beschouwen als een speciaal verschijnsel dat behoort bij die bijzondere situaties uit de natuurkundeles. Een generalisatie naar het zien van niet door de zon rechtstreeks beschenen voorwerpen zal zeker niet gemakkelijk optreden (10).

Tenslotte wil ik nog een voorbeeld geven van een uitleg die voor leerlingen niet begrijpelijk kan zijn omdat de afstand tussen de alledaagse ervaring en een 'fysische' kijk op een verschijnsel te groot is. Een fysische bril kan een auteur er toe brengen een situatie anders waar te nemen dan vele andere mensen. Zijn uitspraak kan daardoor onbegrijpelijk zijn voor anderen. In figuur 2 wordt een voorbeeld gegeven uit *Moderne Natuurkunde* (deel 2, blz. 82).



Fig. 3.3 Spiegelende en verstrooiende terugkaatsing

Niet alle voorwerpen verstrooien het licht dat erop valt. In fig. 3.3 zijn in de lichtbundel van de lamp een scherm, een spiegel en een kaars geplaatst. We kunnen op deze foto drie dingen onderscheiden:

- 1 We zien op het scherm de verlichte vlak.
- 2 Van de spiegel zien we alleen de omtrek; de spiegel zelf zien we niet. Het is een donker vlak.
- 3 De kaars zien we in de spiegel.

Het verlichte vlak zien we doordat het licht op het vlak wordt verstrooid. Omdat we de spiegel zelf niet kunnen zien, moeten we de conclusie trekken, dat de spiegel het licht kennelijk niet verstrooit.

Figuur 2. Tekst en figuur over verstrooiing in *Moderne Natuurkunde*

De mededeling dat de spiegel zelf niet gezien wordt moet een 'niet-fysisch denkende' wel onbegrijpelijk voorkomen. Uiteraard is de spiegel voor iedereen wel te zien net als de zwarte letters van deze bladzijde. Je ziet de spiegel zoals Auer en Hooymayers (deel 1, blz. 110) vermelden donkerder. De fysisch die de afspraak hanteert dat zien betekent "Er komt licht (of precieser: een divergerende of evenwijdige lichtbundel) in je oog" kan ertoe komen hier te zeggen dat je de spiegel niet ziet. Voor leerlingen die zich het fysisch denkkader nog niet hebben eigen gemaakt zal dat geen bewijs zijn dat er vanaf de spiegel geen licht in je oog komt en van het witte scherm wel. Dat zijn voor hen, gezien de beschreven leerlingenbeelden, vaak statische eigenschappen van scherm en spiegel. Deze voorwerpen zien er in het

licht nu eenmaal verschillend uit. Afgezien van de ongelukkige woordkeuze in figuur 2 roept dit voorbeeld de vraag op hoe leerlingen overtuigend kunnen ervaren dat zwarte voorwerpen geen licht weerkaatsen en alle andere voorwerpen wel en hoe de relatie met wat 'zien' genoemd wordt daarbij is. Op die brandende vraag moeten wij het antwoord voorlopig schuldig blijven.

Samenvattend kan gesteld worden dat er aanleiding is te veronderstellen dat er minstens vier typen teksten in leerboeken over het zien voorkomen die niet voldoen. Kenmerken van die teksten zijn respectievelijk:

- (1) de geringe aandacht voor het procesmatige karakter van het zien,
- (2) de mogelijkheid teksten te interpreteren vanuit een leerlingenvoorstelling die niet met het fysische beeld overeenstemt,
- (3) de mogelijkheid dat leerlingen hun voorstelling uitbreiden met één of meer uitzonderingsgevallen in plaats van een herstructurering van hun voorstelling,
- (4) de geringe begrijpelijkheid van een tekst bijvoorbeeld omdat al bij voorbaat van een fysisch denkmodel wordt uitgegaan.

#### 4. Spiegelbeeld

##### 4.1. Leerlingenvoorstellingen.

Bij het onderzoek naar de opvatting van leerlingen over de plaats waar een spiegelbeeld zich bij een vlakke spiegel bevindt maakte Jung (1981b) gebruik van de vraag op welke afstand een fototoestel dat 1 m. voor een spiegel was geplaatst, moest worden ingesteld om zichzelf scherp te fotograferen (figuur 3). Voor het opticaonderwijs beantwoordde 40% van de leerlingen deze vraag

Du stellst einen Fotoapparat in 1 Meter Entfernung vor einem Spiegel auf (Abbildung von oben gesehen). Du weißt vielleicht, daß der Apparat auf bestimmte Entfernungen eingestellt werden kann. Nur Gegenstände in dieser eingestellten Entfernung werden ganz scharf fotografiert. Auf welche Entfernung würdest Du den Apparat einstellen, damit er sich selbst scharf fotografiert?



Figuur 3. Opgave van Jung (1981b) om opvattingen over de plaats van een spiegelbeeld te onderzoeken.

met 1 m. en na het onderbouwonderwijs in de geometrische optica 41%. Het antwoord 2 m., werd door 19% voor en 26% na het opticaonderwijs gegeven. Blijkbaar heeft het onderwijs wat deze vraag betreft weinig bereikt. Daarnaast blijkt het percentage leerlingen dat het juiste antwoord geeft nog niet het percentage leerlingen te zijn dat een voorstelling heeft van de plaats van het spiegelbeeld die overeenstemt

met wat in de natuurkundeles wordt geleerd. Een aantal leerlingen motiveert hun antwoorden van 2 m. met uitspraken als

"Omdat de lichtstraal die het beeld belicht (onderstreping TW) naar de spiegel en weer terug moet" (Jung 1982, blz. 208).

Dat in deze uitspraak met 'beeld' hoogstwaarschijnlijk 'spiegelbeeld' wordt bedoeld en niet het beeld op de fotografische film is uit andere antwoorden van deze leerlingen af te leiden.

Uit Jung's gegevens blijkt dat van de 26% van de leerlingen die menen dat het fototoestel op 2 m. moet worden ingesteld hoogstens 8% daarbij een fysisch acceptabele voorstelling hebben. Net als bij het eerder besproken brekingsverschijnsel lijkt het aantal leerlingen dat bij deze vraag gebruik maakt van iets dat op gezichtsstralen lijkt groter dan bij de algemene verklaring van het zien. Dit is een aanwijzing dat leerlingen verklaringen hanteren en voorstellingen hebben die nogal situatiegebonden zijn. Leerlingen hebben uit zichzelf blijkbaar niet zo de behoefte zo eenvoudig mogelijke modellen op te stellen die in zoveel mogelijk situaties voldoen (verg. de Vos 1985, blz. 201). Lijnse (1981) noemt een dergelijk verschijnsel als een van de opvallende kenmerken van leerlingenvoorstellingen.

Wanneer leerlingen gevraagd wordt waar ze zichzelf in een spiegel zien geeft voor het opticaonderwijs 95% aan 'op de spiegel' en 89% van de leerlingen denkt na lessen over spiegel gehad te hebben nog net zo (Jung 1981b) (11). Enkele uitspraken:

"Je ziet jezelf in werkelijkheid op de spiegel, omdat de spiegel een plat vlak is en niet zo diep als het lijkt" (Jung 1982b, blz. 209).

"Je ziet jezelf in werkelijkheid op het spiegeloppervlak, omdat daar de lichtstralen worden gereflecteerd" (Jung 1982, blz. 207).

Het feit dat je in de spiegel diepte kunt zien vormt voor deze leerlingen geen beletsel om te zeggen dat ze zichzelf op de spiegel waarnemen. Een dergelijke opvatting over een spiegel vertoont veel overeenkomst met wat er aan de hand is bij het waarnemen van een foto of schilderij. In die gevallen wordt diepte gesuggereerd, terwijl het duidelijk is dat de afbeelding geheel op het papier of doek ligt.

De percentages leerlingen die menen dat voor het zien van een spiegelbeeld het voldoende is dat de spiegel belicht wordt zijn 69% en 77% resp. voor en na het onderbouwonderwijs in de geometrische optica (Jung 1981b).

De voorstelling van leerlingen van de vorming van een spiegelbeeld is vaak onfysisch van aard. Ze doen uitspraken die erop wijzen dat ze de spiegel opvatten als een waarnemer en wanneer er maar licht op de spiegel valt wordt datgene wat de spiegel waarneemt zichtbaar. Op de vraag waarom je iets in een spiegel ziet antwoordt een leerling bijvoorbeeld:

"Omdat de spiegel immers alles spiegelt wat hij ziet."

"Want door de spiegel, die immers in het licht staat, wordt het spiegelbeeld zichtbaar gemaakt" (Jung 1981a, blz. 148).

Na het opticaonderwijs gaan leerlingen meer van fysische begrippen zoals lichtstraal gebruik maken. Daarbij blijkt echter dat ze ook van verklaringswijzen gebruik blijven maken die strijdig zijn met kennis over eigenschappen van lichtstralen die ze wel bezitten. Als voorbeeld noem ik resultaten uit een onderzoek van Goldberg en McDermott (1984). Zij plaatsten een interviewer en een student voor een vlakke spiegel van ongeveer 20 bij 30 cm (zie figuur 4). Tussen de student en de spiegel werd een staaf geplaatst en de student moest aangeven waar het beeld van de staaf zich bevond door zijn vinger op de plaats van het beeld te brengen. Vervolgens werd gevraagd of ze, als ze op de plaats van de interviewer zouden zitten en het beeld moesten aangeven dezelfde plaats zouden aanwijzen. Voor universitair opticaonderwijs in de V.S. gaven 50% van de studenten aan dat dit een andere plaats was en erna 58%. Van deze laatste groep corrigeerde ongeveer de helft hun antwoord wanneer ze dit met een tekening moesten toelichten. In figuur 5 wordt een voorbeeld gegeven van de tekening die een student maakte om zijn (foute) antwoord toe te lichten.

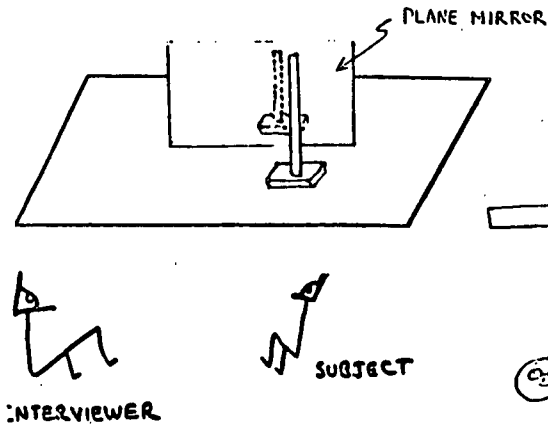


Fig. 4. Proefopstelling van Goldberg en McDermott (1984).

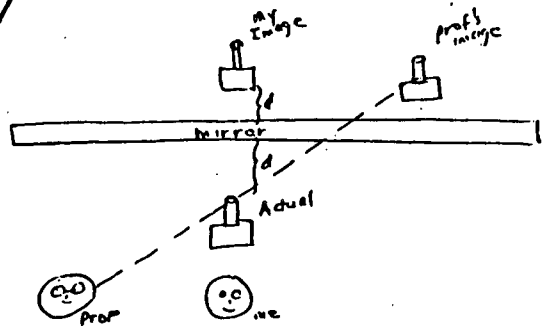


Fig. 5. Voorbeeld van een toelichting van een student bij de verklaring van de plaats van het spiegelbeeld van een staaf voor een spiegel.

Net als bij leerlingen uit het voortgezet onderwijs (Jung 1981a) lijkt de koppeling tussen beeldvorming en terugkaatsingswetten bij deze studenten zwak.

#### 4.2. Schoolboeken

Wanneer we schoolboeken bekijken lijkt het dat auteurs zich weinig bewust zijn van het veel voorkomen van een opvatting onder leerlingen dat een spiegelbeeld op de spiegel ligt. Ook een beschouwing over terugkaatsende lichtstralen in relatie tot beeldvorming komt niet in alle boeken uitgebreid aan de orde. Veelal wordt een verband tussen de beeldvorming en de terugkaatsing van lichtstralen gelegd langs geometrische weg, waarbij de plaats van het beeld wordt vermeld of wiskundig wordt bewezen. Daarbij gaat het dan om een afleiding van de afbeelding van een punt van het voorwerp, waarna zonder meer wordt veralgemeniseerd naar de plaats van het gehele spiegelbeeld. Er worden geen verbanden met ervaringen van leerlingen met spiegels gelegd. Aan het zien van het spiegelbeeld of een experimentele bepaling van de plaats gaat men meestal voorbij.

Een uitzondering in positieve zin vormt het boek van Engelhard, waarin een experiment voor de bepaling van de plaats van het spiegelbeeld wordt gegeven en vrij lang wordt stilgestaan bij de geometrische beschrijving van het verband tussen terugkaatsing en beeldvorming.

#### 5. Conclusies

In het voorgaande zijn leerlingenopvattingen over drie begrippen in de geometrische optica 'licht', 'zien' en 'spiegelbeeld', in kaart gebracht. Gebleken is dat er verscheidene leerlingenopvattingen over deze begrippen voorkomen, die afwijken van de manier waarop ze in de natuurkunde worden opgevat. Er zijn vrij grote verschillen tussen leerlingen in de aangetroffen opvattingen. Het meest op de voorgrond-tredende kenmerk van de leerlingenvoorstellingen op het gebied van de geometrische optica is het ontbreken van een koppeling tussen het licht dat op een voorwerp valt en het proces van het zien van dat voorwerp (Jung 1981a). De leerlingenvoorstellingen lijken grotendeels nogal sterk geworteld in het dagelijks spraakgebruik en het traditionele onderwijs in de geometrische optica blijkt er maar voor een klein deel toe te leiden bij leerlingen opvattingen uit de fysica over 'zien', 'licht' en 'spiegelbeeld' zodanig bij te brengen dat leerlingen ze gaan hanteren buiten de situaties die in de natuurkundeles zijn behandeld (Jung 1981a, Andersson en Kärrqvist 1983, Euler 1982). Wat dit betreft is er weinig verschil met leerlingenvoorstellingen in andere gebieden van de natuurkunde: resistentie die met name tot uiting komt in regressie naar de 'naieve' voorstelling in situaties buiten de behandelde stof is een belangrijk kenmerk van leerlingenvoorstellingen (b.v. Lijnse 1981). De geconstateerde resistentie van

de fysisch minder juiste leerlingenvoorstelling is bij optische begrippen (wellicht extra) begrijpelijk wanneer we ons realiseren dat er in het dagelijks leven vrijwel geen aanleiding is om van de fysisch meer juiste opvattingen gebruik te maken. De leerlingenvoorstellingen vormen op geen enkele wijze een belemmering voor het functioneren in het dagelijks leven. Mocht in het voorgaande de indruk gewekt zijn dat leerlingen dom zijn omdat ze zich fysische opvattingen over optische begrippen zo moeilijk eigen maken dan was dat dus niet de bedoeling. Een interessante vraag lijkt in hoeverre de bruikbaarheid van optische begrippen in het dagelijks leven verschilt van de bruikbaarheid van andere fysische begrippen.

Nagegaan is in dit artikel in hoeverre in schoolboeken bij de behandeling van fysische begrippen lijkt te worden ingespeeld op bestaande leerlingenvoorstellingen. De geanalyseerde schoolboeken lijken weinig rekening te houden met het bestaan van voorstellingen die niet overeenkomen met 'het' fysische denkmodel en met de resistentie van die opvattingen. Geconstateerd kan worden dat de leerlingenvoorstellingen niet aan de orde komen en zeker niet ter discussie worden gesteld. In enkele gevallen worden teksten aangetroffen, waarvan verondersteld kan worden dat ze fysisch minder juiste leerlingenvoorstellingen kunnen bevestigen. De bedoeling van het analyseren van leerboeken was niet om materiaal te verzamelen teneinde met een beschuldigende vinger naar schoolboekauteurs te kunnen wijzen. De gegevens uit onderzoeken naar leerlingenbeelden geven weliswaar aanleiding vraagtekens bij schoolboekteksten te plaatsen, maar ze geven maar weinig harde gegevens over de vraag hoe het dan wel zou moeten. Veel artikelen over leerlingenopvattingen eindigen met suggesties over de vraag hoe onderwijs rekening kan houden met die leerlingenopvattingen. Voor een overzicht verwijs ik naar Gilbert en Watts (1983) en Driver (1985). Helaas is er nog onvoldoende onderzoek gedaan om de waarde van deze suggesties voor het onderwijs vast te stellen. Ik hoop dat het op basis van de gegevens uit dit artikel mogelijk zal zijn voor leerboekauteurs en curriculumontwikkelaars om onderwijs te ontwerpen waarin gepoogd wordt rekening te houden met de bestaande leerlingenvoorstellingen over optische begrippen. Met name bij het bespreken van de onderwerpen kleur en schaduw zouden er goede aangrijpingspunten kunnen zijn voor het expliciet behandelen van de fysische denkwijze ten aanzien van het proces van het zien. Een eerste poging om onderwijs te ontwerpen waarbij het proceskarakter van het zien veel aandacht krijgt is in Duitsland ondernomen door Hoffman en Wiesner (1982, 1984). Zij rapporteren, althans op korte termijn, bemoedigende resultaten van dit onderwijs. De vraag blijft echter in hoeverre leerlingen een jaartje later toch niet zullen zegen:



"Weet je wat ik niet snap....als licht zo snel gaat - en het gaat toch waanzinnig snel hè - als het zo snel gaat, hoe kan ik het dan zien? (Watts 1985, blz. 186).

#### Noten

1. Ik bedank I.Frederik, A.Holvast en D. van Genderen voor hun commentaar op een eerdere versie van dit artikel.
2. Hoewel sommigen menen dat de optica een relatief gemakkelijk onderdeel van de natuurkunde is (Grimsehl 1911, Topfer 1968, blz. 5) zijn er aanwijzingen dat dit niet in de onderwijsresultaten tot uiting komt. Uit een onderzoek van Euler (1982) blijkt dat, althans in West-Duitsland, onder beginnende universitaire studenten het percentage goede antwoorden bij natuurkundeopgaven over de onderbouwschoolstof het laagst is voor opgaven in de optica (22%). Voor andere gebieden zijn de percentages goed beantwoorde vragen: mechanica 43%. warmteleer 38% en elektriciteitsleer 35%. Wanneer in onderzoeken wordt gerapporteerd dat leerlingen meer van fysische beschrijvingswijzen gebruik gaan maken beperkt zich dit over het algemeen tot probleemsituaties die geformuleerd zijn in termen van de schoolse natuurkunde (Jung 1981a, Andersson en Kärrqvist 1983, Wickihalder 1984).
3. We gaan er daarbij stilzwijgend vanuit dat de leerlingenvoorstellingen in grote lijnen in verschillende taalgebieden in de westerse wereld hetzelfde zijn. Dit is exemplarisch aangetoond door La Rosa e.a. (1984) die bij Italiaanse kinderen voorstellingen vonden die niet sterk afweken van die bij Franse en Duitse kinderen. Overigens kan verondersteld worden dat het dagelijkse spraakgebruik invloed heeft op de preciese details van leerlingenvoorstellingen en daarom lijkt het nodig na te gaan in hoeverre voorstellingen van Nederlandse leerlingen overeenkomen met de voorstellingen die in dit artikel worden beschreven.
4. Geanalyseerd zijn de volgende schoolboeken: Engelhard, Elementaire Natuurkunde, deel E; Schweers en van Vianen, Natuurkunde op corpusculaire grondslag deel 2; Langras e.a. Natuurkunde voor nu en straks, deel 2hv; Bijker e.a. Exact natuurkunde deel 1; de PLON-thema's Lichtbronnen, Zien Bewegen en Kleur en Licht; DBK-Natuurkunde voor de derde klas HAVO-VWO; Van den Dool e.a., Moderne Natuurkunde deel 2; Raat e.a. Nieuwe Natuurkunde deel 2; Jardine, Natuurkunde.....doen! deel 1.
5. Gekozen is voor een enigszins vrije vertaling van dit citaat ('helligkeit' door 'iets'), zodat het denkbaar is dat de uitspraak door Nederlandse leerlingen is gedaan.
6. Dit citaat is, net als de meeste andere, afkomstig van onderzoeken waarin een interviewer tracht met behulp van goed gekozen probleemsituaties of vragen leerlingen zich te doen uiten zodat

- inzicht in hun cognitieve structuur kan ontstaan. Op de beperkingen van dergelijk onderzoek gaan we niet in. Zie hiervoor b.v. Sutton 1980 en Elbers 1985.
7. Dit voorbeeld is door A.Holvast bij een interview van een student met een leerling gesignaleerd.
  8. Wickihalder (1984) vat deze voorstellingen als volgt samen:  
 Pythagoras: Van het oog gaan gezichtsstralen uit, die zich rechtlijnig voortplanten in alle richtingen. Ze stoten op een voorwerp en brengen deze stoot over op het oog.  
 Empedocles: Van voorwerpen vertrekken beelden, die zich vermengen met de gezichtsstralen die uit de ogen komen. Door deze menging zien we een voorwerp.
  9. De boeken verschillen van mening of dit het rookdeeltje of scherm dan wel de lichtbundel is.
  10. De geringe aandacht voor het zien van voorwerpen steekt nogal af bij de grote aandacht voor lichtbronnen. Het zien daarvan is voor leerlingen eerder met 'licht in het oog' verbonden dan met het zien van niet-lichtbronnen. Wellicht zou de aandacht beter anders verdeeld kunnen worden.
  11. Jung (1981b) vermeldt ook resultaten waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen 'waar je je werkelijk ziet' en 'schijnbaar zien'. De vraagstelling is mijns inziens dusdanig dat de resultaten moeilijk kunnen worden geïnterpreteerd. Ook op grond van de door mij wel genoemde resultaten kan niet worden uitgesloten dat er niet een redelijk aantal leerlingen is dat aanneemt dat er (ook) een beeld achter de spiegel is of lijkt te zijn.

### Literatuur

- Andersson, B. en Kärrqvist, Ch. How Swedish pupils, aged 12-15 years understand light and its properties, *European Journal of Science Education*, 5, 387-402, 1983.
- Driver, R. Cognitive Psychology and pupils' frameworks in mechanics, In: Lijnse, P.L. *The many faces of teaching and learning mechanics*, Utrecht: W.C.C., 1985.
- Euler, M. *Physikunterricht, Anspruch und Realität*, Frankfurt: Lang, 1982.
- Elbers, E. Interactie en instructie in het conservatie-experiment, *Pedagogische Studiën*, 62, 339-350, 1985.
- Genderen, D. van. Kracht en tegenkracht, actie en reactie, *TDN*, 1, 48, 1983.
- Gilbert, J.K. en Watts, D.M. Concepts, misconceptions and alternative conceptions. Changing perspectives in Science Education, *Studies in Science Education*, 10, 67-98, 1983.

- Goldberg, F.G. en McDermott, L.C. Not all the wrong answers students give represent misconceptions: examples from interviews on geometrical optics. In: Helm, H. en Novak, J.D. *Proceedings of the international seminar Misconceptions in Science and Mathematics*, Ithaca (N.Y.): Cornell University, 1983.
- Grimsehl, E. *Didaktik und Methodik der Physik*, Bad Salzdetfurth: Franzbecker, 1911/1977.
- Guesne, E. Die Vorstellungen von Kindern über Licht (vertaald uit het Frans). *Physica Didactica*, 11, 79-98, 1984.
- Hoffmann, K. en Wiesner, H. Lassen sich Alltagsvorstellungen über optische Phänomene durch Unterricht wirksam korrigieren? *Physica Didactica*, 9, 299-317, 1982.
- Hoffmann, K. en Wiesner, H. Ein subjectivistischer Zugang zur Optik in der Sekundarstufe I, *NiU-P/C*, 32, 7-11, 1984.
- Jung, W. Erhebungen zu Schulervorstellungen in Optik (Sekundarstufe I), *Physica Didactica*, 8, 137-153, 1981a.
- Jung, W. Ergebnisse einer Optik-Erhebung, *Physica Didactica*, 9, 19-34, 1981b.
- Jung, W. Fallstudien zur Optik, *Physica Didactica*, 9, 199-220, 1982.
- La Rosa, C., Mayer, M., Patrizi, P. en Vicentine-Missoni. Commonsense knowledge in optics: Preliminary results of an investigation into the properties of light, *European Journal of Science Education*, 6, 387-397, 1984.
- Lijnse, P.L. Schoolbeeld of straatbeeld. In: *Zoeklicht op de Mechanica*, Utrecht: Werkgroep Natuurkunde Didactiek, 1981.
- Merzyn, G. Zur Optik in der Sekundarstufe I, *NiU-P/C*, 32, 33-37, 1984.
- Pfundt, H. en Duit, R. *Bibliography, Students' Alternative Frameworks and Science Education*, Kiel: IPN, 1985.
- Stead, B.F. and Osborne, R.J. Exploring students' concepts of light, *Australian Science Teacher Journal*, 26, 84-90, 1980.
- Sutton, C.R. The learner's prior knowledge: a critical review of techniques for probing its organisation, *European Journal of Science Education*, 2, 107-120, 1980.
- Tiberghien, A. Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière pour les élèves de 10 à 16 ans. In: *Recherche en Didactique de la Physique: les actes du premier atelier international 1983*, La Motte les Maures, Paris: CNRS, 1984.
- Topfer, E. Der Hamburger Plan, *Der Physikunterricht*, 2, 5, 1968.
- Vos, W. de. Moleculen tussen leefwereld en wetenschap, *TD-8*, 3, 195-202, 1985.
- Watts, D.M. Student conceptions of light: a case study, *Physics Education*, 20, 183-187, 1985.
- Wickihalder, R. Schaulervorstellungen zum Sehen, *NiU-P/C*, 32, 2, 73-77, 1984.
- Witrock, M.C. *Cognitive Processes in the learning and teaching of Science*, Paper presented at the 1985 AERA meeting, Chicago: 1985.
- Zylbersztajn, A. en Watts, D.M. *Throwing some light on colour*, University of Surrey, 1982.