

De inrichting van een optica-curriculum, uitgaande van misconcepties.

R.E.A. Bouwens en G. Verkerk
T.U. Eindhoven

Summary

This article builds on previous work of Bouwens and Verkerk (1988): "Inventory of misconceptions in optics".

Jung (1981) distinguishes a number of levels for the learning of a scientific theory. Different educational strategies can be used for each level to cope with misconceptions. These strategies are explored for misconceptions in optics. For several fundamental concepts in optics it was investigated how they are discussed in course books. Recommendations for an improved approach are presented.

Finally an impulse is given for the implementation of an optics curriculum for the lower grades of secondary education. This curriculum is build on an approach from the vision concept.

1. Inleiding

De algemene onderwijsdoelstelling van een wetenschappelijk vakgebied (b.v. uit de natuurkunde) zou men als volgt kunnen formuleren: het aanleren van de "wetenschappelijke theorie". Of anders gezegd: het aanleren van concepten van een bepaald stuk leerstof, het begrijpen en inzicht hebben in de regels, wetten en verbanden tussen deze concepten en het doorzien van de hiërarchische structuur van het netwerk van regels en verbanden. Deze doelstelling is op vakmensen van toepassing, voor onderwijsgeevenden weinig operationeel en voor leerlingen meestal niet haalbaar. Bij leerlingen loopt het vaak mis bij begripsvorming. In hun denkraam hebben zij ideeën die strijdig zijn met de wetenschappelijke theorie. Deze misconcepties, bijvoorbeeld voortkomend uit hun leefwereld, kunnen hardnekkig zijn, waardoor er samen met de aangeleerde begrippen verwrongen denkpatronen ontstaan. De oude ideeën blijven in de leefwereld en in probleemsituaties functioneren, terwijl de aangeleerde als losse minitheorieën in de gedachtenwereld van leerlingen voorkomen.

Om in het onderwijs misconcepties te bestrijden is kennis ervan noodzakelijk. Een mogelijke onderwijsstrategie is de nieuwe theorie aan te laten sluiten op de voorkennis van de leerlingen. Daarbij kan men laten zien dat de oude ideeën niet passen en dus onjuist zijn. Men kan leerlingen dan actief confronteren met situaties waarbij de oude concepten niet functioneren (onvredetheorie). Deze situaties kunnen geselecteerd worden uit de directe leefwereld van de leerlingen. Voor het aanleren van een wetenschappelijke theorie kan men in het algemeen de volgende niveau's onderscheiden (Jung, 1981).

1. Het begrijpen en goed interpreteren van de in de theorie gebruikte concepten.
 - A. De betekenis, die een leerling aan een reeds bekend concept geeft, moet nader gepreciseerd, scherper omlijnd en geabstraheerd worden, zodat het in de wetenschappelijke theorie opgenomen kan worden.
 - B. Onjuiste betekenissen die leerlingen geven aan begrippen moeten weggewerkt of vervangen worden door wetenschappelijk verantwoorde begrippen.
 - C. Nieuwe begrippen uit de theorie moeten zo duidelijk mogelijk worden geïntroduceerd, zodat de leerling relaties met reeds bekende ideeën kan leggen.
2. Het leggen van de juiste koppelingen tussen de begrippen en het causaal maken ervan.
 - A. Reeds bekende koppelingen moeten worden geoperationaliseerd, dat wil zeggen verder gepreciseerd en geabstraheerd, zodat ze als regel, wet of verband tussen de begrippen in de wetenschappelijke theorie kunnen gaan gelden.
 - B. Onjuiste koppelingen moeten worden ontkracht en afgebroken, zodat zij in het wetenschappelijk netwerk niet meer voorkomen.
 - C. Nieuwe verbanden, regels en wetten moeten zo duidelijk mogelijk worden geïntroduceerd, zodat de leerling ze kan inpassen in zijn eigen netwerk.
 - D. Bij elke koppeling moet een verklaring worden gegeven alsmede een richting (oorzaak en gevolg).
3. De consistentie en de hiërarchische structuur van de gehele theorie moeten doorzien worden.
 - A. Het gehele patroon van begrippen en causale verbanden moet door de leerling worden beheerst.

B. De theorie moet divergerend werken, zodat de leerling voor nieuwe en in context geplaatste feiten en verschijnselen een redenering kan geven vanuit de theorie.

C. Op het hoogste niveau van vertrouwd raken kan de leerling gecharmeerd worden door de consistentie van de theorie.

De aangegeven onderverdeling in hoofd- en subniveaus heeft een structuur, die volgens ons de meest complete beschrijving geeft van de overgang van logisch redeneren in het dagelijks leven naar de abstracte denktrant in de natuurwetenschappen. Wij zien dus het overbrengen van de natuurwetenschappelijke theorie als onderwijsdoel. De noodzaak van dit doel brengen wij hier niet in discussie.

De hiërarchische structuur is van belang om verschillende misvattingen te onderscheiden. Zo plaatsen wij de misvatting dat leerlingen het woord licht anders interpreteren dan in de fysica op concept-niveau (1b) en het decoupling-concept (Bouwens en Verkerk, 1988) op koppelings-niveau (2b). Bij elk niveau van de lijst wordt onderscheid gemaakt tussen "juiste elementen in de voorkennis", "onjuiste elementen in de voorkennis" en "nieuwe kennis". Onderscheid tussen deze drie vormen van kennis achten wij van wezenlijk belang vanwege de gewenste confrontatie van de wetenschappelijke theorie met de leefwereld.

Bestrijding van misconcepties bij het aanleren van de wetenschappelijke theorie vereist onderwijsstrategieën die per niveau in bovenstaande lijst kunnen verschillen. Hierop wordt met betrekking tot misvattingen in de optica in de volgende paragraaf ingegaan. Daarna worden enkele fundamentele concepten in de optica besproken. Tenslotte worden concrete suggesties gedaan voor de invulling van een optica-curriculum.

Jung (1979) heeft ook curriculumvoorstellen gedaan voor de optica. Hij geeft daarbij vooral aanbevelingen voor begripsonwikkeling van specifieke onderwerpen, die hij in de traditionele volgorde behandelt. In het vervolg zal blijken dat wij kiezen voor een centrale plaats van het zichtconcept in het curriculum, omdat juist dit concept de gewenste koppeling tussen de alledaagse voorkennis van de leerlingen en de fysische theorie kan bewerkstelligen. Jung maakt nog sterk gebruik van het lichtstraalconcept (hij vergelijkt met waterstralen uit een douche-kop), terwijl wij dit concept naar de achtergrond willen schuiven.

2. Onderwijsstrategieën ter bestrijding van misconcepties

In deze paragraaf worden onderwijsstrategieën aan de orde gesteld om misvattingen te bestrijden. Onder misvattingen verstaan we niet alleen de onjuiste vooronderstellingen van een leerling, maar elke leerdeficiëntie die ontstaat doordat het netwerk van begrippen en verbanden uit het vakgebied niet volmaakt over het netwerk van de voorkennis van de leerling schuift (Jung, 1981). We gaan uit van een "ideale" onderwijs-situatie. Hierin heeft de leraar de structuur van de over te brengen stof duidelijk voor ogen. Hij kan deze overbrengen aan de leerlingen in begrijpelijke, niet te abstracte taal. De leerlingen op hun beurt zijn ontvankelijk voor de leerstof die hen wordt gepresenteerd. Zij verstoren de werksfeer in de klas niet.

Voor elk niveau van de in de inleiding beschreven lijst gaan we nu na wat er mis kan gaan bij het ineens schuiven van de voorkennis van de leerling en de hem aan te leren wetenschappelijke theorie. Misvattingen in de optica worden als voorbeelden gebruikt. Verder worden onderwijsstrategieën beschreven om deze misvattingen te bestrijden.

1a/b. De begrippen die een leerling als latente voorkennis heeft, moeten in de wetenschappelijke theorie scherper omlijnd worden. Misvattingen ontstaan gemakkelijk wanneer deze begrippen niet duidelijk onderscheiden worden van de alledaagse betekenis van het woord, waarbij de leerling in een ander denkkader werkt dan er wordt bedoeld. Zo gebeurt het dat de leerling licht identificeert met de lichtbron (in "doe het licht eens aan ") of met een soort helderheid (in "het is licht hier"). Dit laatste geeft aanleiding tot een statisch beeld van licht (fluïdum idee). Ook een term als "scherpte" geeft vaak problemen. In de optica wordt een afbeelding scherp genoemd als er een ideale één-één-afbeelding heeft plaatsgevonden, terwijl leerlingen denken aan lichtsterke of contrastrijke afbeeldingen. Dit soort discrepanties in betekenis kunnen worden vermeden door bij de introductie van het concept in de wetenschappelijke theorie de verschillende denkkaders expliciet naast elkaar te zetten. Een dergelijke aanpak vereist van de leraar een bewustheid van de naast elkaar voorkomende denkramen en bovendien enig inzicht in de samenhang tussen deze ramen.

1c. Op het niveau van nieuw geïntroduceerde begrippen is het van belang, dat de leerling het begrip niet uitsluitend abstract gedefinieerd krijgt. Bij een abstracte definitie bestaat het gevaar

dat een geïsoleerd brokje kennis, een minitheorie, ontstaat. Belangrijk is dat de leerling de mogelijkheid geboden wordt koppelingen te leggen met reeds eigen geworden cognitieve elementen in zijn denkraam. Dit is vaak een probleem bij de introductie van nieuwe begrippen met zwakke of een gering aantal aanknopingspunten. Zo is het moeilijk van het "virtueel beeld" een operationele definitie te geven, die aansluit bij de voorkennis van de leerling. Meestal wordt de definitie te abstract gegeven, bijvoorbeeld een virtueel beeldpunt is het snijpunt, waar de uittrekkende stralen vandaan lijken te komen. Naast deze abstracte benadering kan men ook langs andere wegen naar het begrip toewerken, zoals:

- formeel: een negatieve waarde voor de beeldafstand in de lenzenformule;
- praktisch: geen scherp beeld op het scherm;
- exemplarisch: bij een spiegel, bij een negatieve lens en bij een positieve lens met het voorwerp binnen brandpuntsafstand lijkt een beeld achter de lens te ontstaan;
- gebaseerd op het zichtconcept: door een loep zien we een vergroot voorwerp.

Sommige associaties zullen bij een leerling wel aanslaan en andere niet. Het is daarom van belang dat de leraar het op verschillende manieren kan uitleggen. De uitspraak "ik snap er niets van" van een leerling vraagt niet om herhaling van de uitleg, maar om een andere benadering. Om hierop in te spelen is een grote flexibiliteit van de leraar nodig. Hij moet niet alleen begrip hebben voor de leermoeilijkheden van leerlingen, maar ook boven de leerstof staan.

2a. Een belangrijke stap in het onderwijs is het operationaliseren van de koppelingen tussen cognitieve elementen die al bij de leerling aanwezig zijn, vooral in de introductiefase van een vakgebied. Uiteraard weet een leerling vanuit zijn ervaringswereld al veel van lichtverschijnselen, bijvoorbeeld "wil je een voorwerp zien, dan moet het verlicht worden of moet het zelf licht uitstralen". Of ook, "als je een ondoorzichtige plaat zet tussen de lichtbron en het voorwerp, dan wordt het voorwerp moeilijker zichtbaar, maar zetten we de plaat tussen het voorwerp en het oog, dan zien we niets meer". Dit soort kennis is gemakkelijk te operationaliseren tot het zichtconcept: "als je een voorwerp wilt zien, dan moet licht door dat voorwerp in de richting van je oog worden gereflecteerd". Het refereren aan de

voorkennis wordt bij de introductie van nieuwe onderwerpen vaak vergeten. Hierdoor ontstaat als het ware een dubbele koppeling tussen cognitieve elementen. Naast de "nieuwe" wetenschappelijke koppeling blijft de oude redenering in stand. Als later in een probleemsituatie naar het verband tussen de cognitieve elementen wordt gevraagd is de kans groot, dat teruggevallen wordt op de oude denkwijze. Hoewel een leerling in principe wel weet, "dat het licht van een voorwerp dat je ziet in het oog moet komen", past hij dat niet consequent toe. Wanneer hem gevraagd wordt of het licht van een flatgebouw, dat je 's nachts op 500 meter afstand ziet staan, tot in je ogen komt, dan is het antwoord, "neen, het licht van een TL-balk kan niet zover komen (want je kunt er niet bij lezen)". De associatie tussen de voorkennis van de leerling en de wetenschappelijke formulering moet hier sterk worden benadrukt en verder worden geabstraheerd, bijvoorbeeld "ook van een voorwerp, dat heel ver weg staat, maar dat je toch ziet - een ster - komt er licht in het oog". Voor de leraar betekent dit dat hij zich bewust moet zijn van hetgeen zijn leerlingen intuïtief weten en dat hij hierop moet inspelen om eenduidige koppelingen met de theorie te maken.

2b. Onjuiste koppelingen in de voorkennis van leerlingen moeten door het onderwijs ontkracht worden. Gebeurt dit niet, dan blijft een leerling met misvattingen in de betekenis van onjuiste vooronderstellingen zitten. Een voorbeeld is het eerder genoemde decoupling-concept.

Het ontcrachten kan gebeuren volgens de onvrede-theorie (Gerritsen van der Hoop, 1986). Hierbij moet de leerling in een situatie gebracht worden, waarbij zijn eigen beeld niet in staat is een verklaring te geven of zelfs contradicties oproept. De onvrede-theorie wordt aan de hand van een voorbeeld op de volgende pagina uitgewerkt. De hier beschreven strategie gaat ervan uit dat de leraar zich bewust is van de misvatting, in staat is deze te activeren, in staat is voor de leerling een onvrede-opwekkende probleemsituatie te creëren en de leerling duidelijk kan maken dat de door hem gelegde koppeling onjuist is.

2c. De introductie van geheel nieuwe regels en verbanden blijkt evenals die van nieuwe concepten vaak te abstract te gebeuren. We nemen als voorbeeld de wet van Snellius. "Een lichtstraal valt onder een hoek i met de normaal op een grensvlak van twee media. De straal gaat na breking onder een hoek r met de

Theorie:

Een misvatting is bekend (een onjuiste koppeling in het semantische netwerk van de leerling;

de misvatting wordt geactiveerd (precieser geformuleerd, liefst in een abstracte, geoperationaaliseerde vorm);

de misvatting wordt verder 'gesetteld'; d.w.z. de bestaande koppelingen in de cognitieve structuur worden naar boven gehaald en geëxpliciteerd;

er wordt een onvrede-opwekkende stimulus gegeven, m.a.w. een waarneming, die in het beeld van de leerling niet past;

de onvrede leidt tot aanpassing van het concept;

het nieuwe concept wordt verder gesetteld en geabstraheerd: de oude koppelingen worden in het nieuwe denkkader herzien.

normaal verder. De hoeken i en r worden gemeten. Vervolgens worden de sinussen berekend. Het quotiënt van die sinussen blijkt constant te zijn en die constante verhouding wordt dan de brekingsindex genoemd van het ene medium ten opzichte van het andere". Door een dergelijke introductie bestaat het gevaar dat leerlingen de concepten samen met de mathematische koppeling als een geïsoleerde theorie opnemen in hun denkkader, los van reeds bestaande voorkennis. Zij zullen geen relatie zien met leefwereldsituaties.

Evenals bij nieuw ingevoerde concepten biedt een flexibele

Voorbeeld:

visuele stralen in het zichtconcept;

de leerling wordt gevraagd nauwkeurig te beschrijven wat er in het algemeen gebeurt als je naar iets kijkt;

de leerling wordt gevraagd waarom hij dat denkt, b.v.: wat denk je, dat je uitstraalt als je je ogen op iets richt?;

b.v.: hoe kan het dat je in het donker een voorwerp niet ziet?;

er is dus licht van buitenaf nodig om iets te zien;

het juiste zichtconcept wordt verder uitgewerkt: men moet de ogen richten om licht van het voorwerp binnen te laten vallen.

aanpak vanuit verschillende invalshoeken een mogelijkheid om het isolement te doorbreken. Mogelijkheden bij ons voorbeeld, de wet van Snellius, zijn:

- formeel: afleiden met golffronten en voortplantingssnelheden.
- praktisch: "ontdekken" met behulp van de halve-cylinder-proef op de optische schijf.
- exemplarisch: aantonen dat we met breking te maken hebben bij lenzen, prisma's, planparallele platen enz.
- gebaseerd op het zichtconcept: laten kijken naar voorwerpen in een bak met water en naar een potlood dat in het water wordt gestoken.

2d. Het is essentieel voor het "eigen worden" van een theoretisch netwerk, dat een leerling de causaliteit van de verbanden doorziet. Wanneer een verband wordt ingepast in de eigen redeneermethode van de leerling, dan worden de wetmatigheden in de theorie betekenisvol en kan hij relaties leggen met andere toepassingen. Vaak zijn de verbanden in de wetenschappelijke theorie echter te ingewikkeld. De causalistiek van de redenering is dan te moeilijk of de redenering bevat te veel denkstappen om door de leerling te worden doorzien.

Een voorbeeld van een moeilijke relatie in de optica is die tussen de rechthoekige voortplanting en het golfkarakter van licht. Een ander voorbeeld is de relatie tussen beeldscherpte en diafragma. De uitleg van een stuk leerstof is enerzijds een didactisch probleem. Redeneringen worden uiteengerafeld in denkstappen. Deze denkstappen worden in de verschillende onderwijsmethoden gestructureerd gepresenteerd, in meer of mindere mate voorzien van voorbeelden en toepassingen. De uitleg is anderzijds een intermenselijke activiteit: kan de leraar het duidelijk maken aan de leerling. Hierbij is het niet voldoende dat de leraar goed kan uitleggen aan leerlingen. Hij moet ook goed kunnen luisteren naar leerlingen en zich kunnen verplaatsen in hun gedachtenwereld.

3a.b.c. wil een leerling een theorie op divergente wijze gebruiken, dat wil zeggen op de juiste wijze kunnen redeneren over probleemsituaties in een nieuwe context, dan is het nodig dat hij de theorie beheerst. Hij dient dan inzicht te hebben in de concepten en de causale verbanden ertussen, zodat hij nieuwe problemen kan plaatsen en oplossen. Zo zou een leerling die het begrip interferentie heeft gehad na een korte uitleg van de

proef "Ringen van Newton" deze moeten kunnen begrijpen en verklaren.

Als hoogste acceptatieniveau van een aangeboden theorie zou men kunnen verlangen dat de leerling wordt gecharmeerd door de consistentie van de wetenschappelijke theorie. De leerling is in staat zelf probleemstellingen te formuleren en die al redenerend en onderzoekend op te lossen. Dit doel is voor de meeste leerlingen te hoog gegrepen. Strategieën om deze doelstelling te bereiken beperken zich slechts tot individuele leerlingen. Er is wel geëxperimenteerd met geschematiseerde presentaties van de hiërarchische structuren van de theorie. Het resultaat was dat slechts de leerlingen die het geheel al goed doorzagen voordeel hadden, maar dat er bij anderen nauwelijks verbetering optrad.

3. Enkele fundamentele concepten in de optica

Met het inventarisatie-onderzoek naar misconcepties in de optica (Bouwens en Verkerk, 1988) hebben wij nagegaan in hoeverre enkele belangrijke begrippen in de optica nog moeilijkheden opleveren voor leerlingen in de bovenbouw. Nagegaan is tevens op welke wijze deze begrippen didactisch aangepakt worden in enkele in de loop van de afgelopen jaren veel gebruikte leermethoden. Op grond van een didactische analyse worden aanbevelingen gedaan voor een verbeterde aanpak.

Zicht

Het zichtconcept is essentieel als men kiest voor een vorm van onderwijs waarin men het fysisch-theoretisch netwerk van de optica wil laten ineenschuiven met de voorkennis en de dagelijkse ervaringen van de leerlingen op dit gebied. Veel verschijnselen in de optica op school en in de leefwereld kunnen leerlingen direct zien. Een goed begrip van het "zien" ligt daarom voor de hand.

Een aantal misvattingen in het inventarisatie-onderzoek komen voort uit een verkeerd of onvolledig beeld van het zichtconcept. Zo heeft men problemen met de lichtweg: om een voorwerp te kunnen zien moet er licht van het voorwerp in het oog komen. Het voorwerp moet zelf licht uitstralen of het licht van een lichtbron (diffuus) weerkaatsen in de richting van het oog. Ook ziet men licht als een statisch verschijnsel: er is alleen licht waar je het ziet, bijvoorbeeld in de omgeving van een bron waarvan men het schijnsel ziet. Deze misvattingen

komen vooral naar voren als leerlingen in probleemsituaties geplaatst worden.

De aandacht voor het zichtconcept in de diverse leermethoden verschilt nogal. In een onderzochte HBS-methode besteedt men er gestructureerd aandacht aan, echter wel kort, in een docerende vorm en niet leefwereldgericht. In enkele methoden kort na de invoering van de mammoetwet is de aandacht klein en in enkele nieuwe methoden (na 1980) is er weliswaar meer aandacht, ook leefwereldgericht, maar niet structureel.

Essentiële aspecten voor een gestructureerde behandeling van het zichtconcept zijn:

- het binnentreden van het licht in het oog;
- de passieve rol van het oog bij dit binnenkomen;
- de actieve rol van het oog bij het bepalen van de richting, van waaruit licht kan binnenvallen (kijkgedrag);
- de noodzakelijke lichtweg: lichtbron - voorwerp - oog;
- de diffuse weerkaatsing door het zichtbare voorwerp;
- de reflectie in alle richtingen, o.a. in de richting van het oog;
- de lichtkegel met het voorwerpspunt als top en de pupilomtrek als beschrijvende cirkel;
- de divergentiehoek van de kegel als maat voor het diepte zien;
- de autofocus-functie van de ooglens als reactie op de veranderende divergentiehoek van de invallende bundel (tweede actieve oogfunctie);
- het zien van een heel voorwerp als een verzameling lichtkegels.

De vormgeving van deze aspecten in een optica-curriculum wordt besproken in de volgende paragraaf.

Beeldvorming

In het misvattingenonderzoek zijn vragen gesteld over de plaats van het beeld en over de beeldvorming bij lenzen (o.a. in de diaprojector) en spiegels. Ook is ingegaan op de zichtbaarheid van het beeld. Hoewel de leerlingen de optica in de onderbouw vrij uitvoerig hebben gehad, blijken zij toch vaak in problemen te geraken wanneer zij geplaatst worden in leefwereldachtige probleemsituaties. Een misvatting die leerlingen ten aanzien van het beeldvormingsconcept aan de dag leggen is het zogenaamde "reizende beeld". De leerlingen gebruiken daarbij een afbeel-

dingsmethode, waarbij het voorwerp van de voorwerpsplaats tot de beeldplaats in tact blijft. Daarbij zien zij niet in dat bij beeldvorming elk voorwerpspunt een divergente bundel uitzendt die vervolgens weer tot één punt convergeert. Wel kan het beeld "tijdens de reis" vergroten, verkleinen en omkeren.

In de klassieke leermethoden wordt de beeldvorming in het algemeen formeel uitgelegd aan de hand van constructiestralen. Er is een duidelijke koppeling met de vlakke meetkunde, vóór de invoering van mammoetwet een zelfstandig vak in het middelbaar onderwijs. Veel van de getekende figuren versterken het "reizend-beeld-concept". Aan begripsontwikkeling van de beeldvorming wordt slechts summier aandacht besteed, evenals aan toepassingen in leefwereldsituaties. In nieuwe natuurkundemethoden, in het bijzonder in "Scoop" (Biezeveld en Mathôt, 1984), is de aandacht voor het beeldvormingsconcept nadrukkelijker aanwezig. Hierbij komen zowel de formele kant als de koppeling met leefwereldsituaties goed naar voren. Essentiële aspecten die volgens ons bij de beeldvorming naar voren moeten komen zijn:

- de koppeling met de leefwereld: kijken naar beelden;
- de koppeling met het zichtconcept;
- het werken met lichtbundels vanuit een voorwerpspunt in plaats van met lichtstralen;
- de beeldvorming met veel lichtbundels;
- de betekenis van ideale beeldvorming (scherptediepte);
- de abstractie van de wiskundige beschrijving;
- de abstractie van de beeldconstructie;
- de toepassing op optische apparatuur.

Speculaire en diffuse reflectie

Uit het misvattingenonderzoek is gebleken dat er met betrekking tot reflecteren niet alleen taalkundige problemen zijn, maar dat ook de essentiële verschillen tussen de twee soorten reflectie door leerlingen vaak niet worden begrepen. In de taal is het moeilijk onderscheid te maken tussen "goed reflecteren" in de zin van een hoge reflectiecoëfficiënt en "goed reflecteren" in de zin van het volgen van de reflectiewet (hoek van inval is hoek van terugkaatsing). Ook bij natuurkunde hebben leerlingen moeite met het onderscheid in probleemsituaties, zoals:

- hoeveel licht wordt gereflecteerd door een spiegel en door een stuk wit papier?

- op welke plaats vindt bij een spiegel en bij een stuk wit papier de reflectie plaats?

- in hoeverre is een spiegel te gebruiken als projectiescherm?

Het blijkt dan dat leerlingen de praktische consequenties van het onderscheid tussen de twee soorten reflectie vaak niet doorzien: de zichtbaarheid van diffuus reflecterende voorwerpen en de beeldvorming door speculair reflecterende oppervlakken.

In de onderzochte leermethoden is de aanpak om het verschil tussen de twee soorten reflectie duidelijk te maken nogal eenzijdig. Over het algemeen wordt een plaatje getoond en uitgelegd hoe het verschil tussen de twee soorten reflectie ontstaat, maar er wordt minder aandacht besteed aan de gevolgen ervan. Soms worden de gevolgen wel genoemd, maar niet gekoppeld aan het zichtconcept en aan hetgeen in de leefwereld waar te nemen is.

Voor een goede begripsontwikkeling omtrent het verschil tussen diffuse en speculaire reflectie achten wij de volgende aspecten van belang:

- de koppeling met de leefwereld: kijken naar reflecterende voorwerpen;
- de koppeling met het zichtconcept;
- de verklaring van de waargenomen verschijnselen vanuit het zichtconcept (macroscopisch);
- de verklaring van de oorzaak van het verschil (microscopisch);
- het onderscheid tussen gladde en ruwe oppervlakken;
- het bestuderen van het verschil in (vereenvoudigde) laboratoriumsituaties;
- het toepassen van het verschil in (complexe) leefwereldsituaties.

Rechtlijnige voortplanting en schaduwvorming

Uit het misvattingenonderzoek is gebleken dat bovenbouwleerlingen in het algemeen geen problemen hebben wat betreft de rechtlijnigheid van licht. Wel heeft men moeite om een goede koppeling te maken tussen rechtlijnige voortplanting en schaduwvorming. Dit blijkt onder andere uit een probleemstelling over de schaduwvorming op een bewolkte dag. Kennelijk hebben leerlingen daarbij geen goed beeld van het concept "diffuus licht".

In de onderzochte methoden wordt de rechtlijnige voortplanting geponeerd of geïntroduceerd met een proef. Er worden dan

lichtbundels gemaakt en de schaduwvorming wordt bekeken, vaak zowel kern- als bijschaduw. De aspecten die van belang zijn voor de begripsvorming van dit concept zijn:

- de koppeling met leefwereldverschijnselen;
- het licht van een puntvormige en een niet-puntvormige lichtbron;
- de schaduwvorming in eenvoudige situaties;
- de verstrooiing bij diffuse reflectie en transmissie;
- het verschil tussen diffuus licht en licht uit één richting;
- de koppeling tussen schaduwvorming, rechtlijnigheid en directheid;
- de toepassing op complexe leefwereldsituaties.

Het hierboven beschreven overzicht van fundamentele concepten in de optica is zeker niet compleet. Zo hebben wij geen aandacht besteed aan het kleurconcept, hoewel dit zeker te maken heeft met de directe leefwereld van leerlingen. In ons misconceptie-onderzoek hebben wij daar geen vragen over gesteld. Ook is bijvoorbeeld de lichtsnelheid niet aan de orde geweest. In leefwereldsituaties ligt het voor de hand deze als oneindig te beschouwen. Verder is geen aandacht besteed aan begripsvorming met betrekking tot licht als electromagnetisch golfverschijnsel vanwege de complexiteit.

4. Een opzet voor een optica-curriculum in de onderbouw

In deze paragraaf komen wij tot aanbevelingen voor een behandeling van de optica-leerstof in de onderbouw, waarin begripsvorming centraal staat. Wij hebben geen nieuw curriculum ontwikkeld. Er vindt geen discussie plaats over een nieuwe onderwijsvisie en er worden geen nieuwe contexten aangevoerd om het vakgebied meer actualiteitswaarde te geven.

Het misvattingenonderzoek legde gebieden aan de dag, waar leerlingen begripsproblemen mee hebben. Dit heeft in de vorige paragraaf al geleid tot aanbevelingen voor een aantal concepten. De strategieën ter voorkoming en bestrijding van misconcepties zijn in paragraaf 2 aan de orde geweest. Hierbij wordt de kennisverwerving gezien als het ineenschuiven van de voorkennis van de leerling en het theoretisch netwerk van een (fysisch) vakgebied. Dit ineenschuiven verloopt des te beter wanneer er voortdurend koppelingen worden gelegd met de leefwereld van de leerling en wanneer er aansluiting plaatsvindt op de voorkennis van de leerling.

In traditionele optica-curricula komen afleidingen en stralengangconstructies voor die geënt zijn op de vlakke meetkunde. De huidige wiskunde-programma's noodzaken tot een minder wiskundige benadering. Hiermee wordt niet beweerd dat formele wiskundige beschouwingen niet voor mogen komen, want dan zou een verkeerd beeld van de natuurkunde worden geboden aan leerlingen, die een pakketkeuze moeten doen. Wel dient een aanpak, die te dogmatisch gericht is op het maken van vraagstukken over bijvoorbeeld de lenzenformule en stralengangconstructies, vermeden te worden.

Zoals in paragraaf 3 al is uiteengezet is volgens ons voor de opbouw van een optica-curriculum de benadering vanuit het zichtconcept essentieel. Een optica-curriculum voor de onderbouw zou de volgende opzet kunnen hebben (kort weergegeven):
A *Het zichtconcept*. Hierbij zouden de rol en de werking van het oog, de diffuse weerkaatsing van zichtbare voorwerpen en de zichtbaarheid van voorwerpen als een verzameling van lichtkegels aan de orde kunnen komen.

B *Het beeldvormingsconcept*. Aansluitend op de beeldvorming door de ooglenzen kan uitgebreid worden naar de werking van de lens in het algemeen.

C *Rechtlijnige voortplanting, de lichtstraal en schaduwvorming*. Het abstracte begrip lichtstraal, waar veel optica-curricula mee beginnen, wordt door ons pas in een later stadium geïntroduceerd.

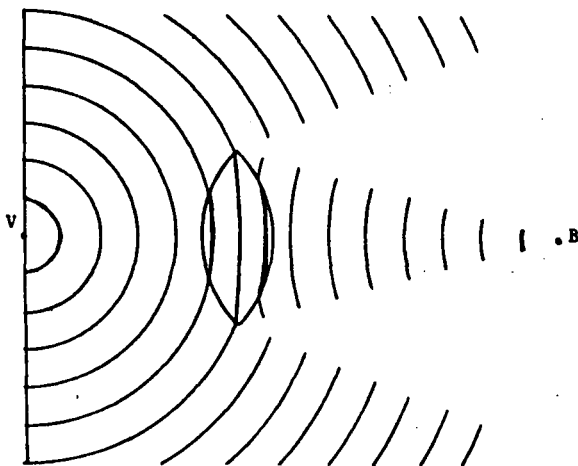
D *Speculaire en diffuse reflectie*. Er wordt niet alleen aandacht besteed aan de oorzaken van het verschil tussen diffuse en speculaire reflectie, maar ook aan de gevolgen ervan in complexe leefwereldsituaties.

E *Breking en kleuren*. Omdat deze onderwerpen bij het misconceptie-onderzoek niet aan de orde zijn geweest is de keuze van de leerstofinhoud van dit deel minder uitgesproken.

Hoewel de onderwerpen in principe in de aangegeven volgorde aan bod kunnen komen, heeft het pakket geen lijnstructuur. Voortdurend worden koppelingen gelegd tussen de verschillende delen. De centrale rol van het zichtconcept is al besproken, evenals het belang van koppeling met de leefwereld, samenhangend met het zichtconcept. Bij de wiskundige abstractie wordt ingespeeld op het reeds aanwezige kennisbestand van de leerling. We zullen hiervan enkele voorbeelden geven:

Lenswerking

De beeldconstructie door een lens aan de hand van constructiestralen fungeert bij leerlingen vaak als een uit het hoofd geleerde routine. Het is mogelijk het abstracte concept lichtstraal op de achtergrond te houden en de lenswerking fenomenologisch te bespreken vanuit golffronten (fig. 1). Hiermee wordt de traditionele scheiding tussen de geometrische optica en de golfoptica enigszins doorbroken.

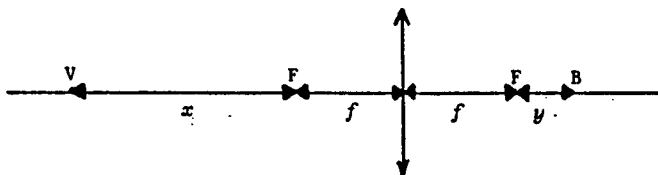


Figuur 1: Voorwerpspunt en beeldpunt bij een lens

In de figuur is te zien dat het licht zich in glas niet zo snel kan voortplanten als in lucht, waardoor een bol golffront overgaat in een hol. Men kan dit illustreren met de golfbak.

Lenzenformule

Hoewel we geneigd zijn de lenzenformule vanwege de gekunstelde vorm naar de bovenbouw te verschuiven, is toch een kwantitatieve beschrijving in de onderbouw mogelijk. We kiezen dan de lenzenwet volgens Newton (fig.2).



Figuur 2: Situatieschets van de lenzenwet volgens Newton:

$$xy = f^2$$

Leerlingen hebben in de tweede klas recht-evenredige en omgekeerd-evenredige verbanden leren kennen. De hyperbool $y = f^2/x$ kunnen ze dus begrijpen. Ook in de natuurkunde hebben leerlingen vaak al kennis gemaakt met een omgekeerd evenredig verband in de wet van Boyle:

$$pV = C$$

Later kan de lenzenwet van Newton gemakkelijk getransformeerd worden naar de gebruikelijke vorm via $x = v - f$ en $y = b - f$.

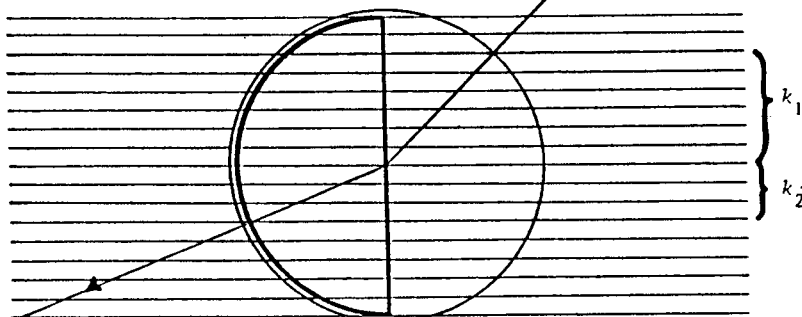
Breking

De brekingswet van Snellius levert in het algemeen problemen op in de onderbouw. Enerzijds wordt het abstracte begrip normaal ingevoerd. Anderzijds is de goniometrie weliswaar aan de orde geweest, maar nog niet bezonken, zodat de wet enigszins gekunsteld overkomt.

Aan het eerste bezwaar kan tegemoet gekomen worden door te kijken naar de hoeken tussen de lichtstralen en het brekend oppervlak. Deze hoeken hebben concrete betekenis. De alternatieve wet van Snellius wordt dan:

$$\frac{\cos r}{\cos i} = n$$

Ook voor de grenshoek levert dit geen extra complicaties. Men kan de goniometrische formule vermijden door een halve cilinder op een regelmatig lijnenpatroon te zetten (fig. 3).



Figuur 3: Opstelling om de brekingswet te beschrijven.

De brekingsindex is nu gelijk aan het quotiënt van de in de tekening aangegeven aantallen lijnen:

$$n = k_1 / k_2$$

Men kan de proef ook uitvoeren met drie spelden, één in het middelpunt en de twee anderen op de snijpunten van de straal en de cirkel. Het voordeel is nu dat er niet verduisterd hoeft te worden. Bovendien sluit de methode aan bij het zichtconcept. Door de cilinder heen gezien bevinden de spelden zich op één lijn, terwijl van boven gezien het licht, dat langs de spelden in het oog terecht is gekomen, een geknikte weg heeft beschreven.

De brekingsindex kan ook beschreven worden als de verhouding van de voortplantingssnelheden in verschillende media. De breking van een bundel licht op een brekend oppervlak kan dan het beste bekeken worden aan de hand van (vlakke) golffronten. Een demonstratie die hierbij past is die met de golfbak waarin vlakke watergolven op de overgang van een ondiep naar een dieper gedeelte gebroken worden.

5. Conclusies en aanbevelingen

Uit het misvattingenonderzoek (Bouwens en Verkerk, 1988) is gebleken dat bovenbouwleerlingen nog steeds misvattingen in de optica aan de dag leggen, ondanks het optica-onderwijs in de onderbouw. Deze misvattingen blijken vooral op te treden wanneer zij geplaatst worden in leefwereldgerichte probleemsituaties. Wanneer men kennisverwerving ziet als het ineenschuiven van de voorkennis van de leerling en het aan te leren wetenschappelijk vakgebied, dan heeft het zin na te gaan in hoeverre er na een

optica-curriculum nog misvattingen bestaan, juist in leefwereld-gerichte probleemsituaties. Immers, dan blijkt zich bij leerlingen zoiets als een minitheorie gevormd te hebben, los van hun dagelijks leefwereld.

Het is mogelijk gebleken om vanuit het misvattingenonderzoek een samenhangend pakket aanbevelingen te doen voor de inrichting van een optica-curriculum in de onderbouw. Deze aanbevelingen hebben zowel betrekking op de lijn volgens welke de stof behandeld kan worden, als ook op de behandeling van de afzonderlijke concepten.

Een volgende stap zou kunnen zijn het schrijven van een curriculum op grond van de aanbevelingen. Hierna dient men na te gaan in hoeverre een dergelijk pakket voldoet. Onze aanbevelingen hebben ook consequenties voor het optica-onderwijs in de bovenbouw, in het bijzonder voor de geometrische optica in het eindexamenprogramma. Wij zijn hier nauwelijks op ingegaan. Toch achten wij het wenselijk kritisch na te gaan welke gedeelten van de optica, inclusief de geometrische optica, in het eindexamenprogramma thuishoren, zodanig dat een interessant pakket ontstaat. De optica is niet alleen een vakgebied met een rijke historie. In de optica zijn ook veel nieuwe technische ontwikkelingen, denk bijvoorbeeld aan de laser-technologie. Bovendien geeft de optica verklaringen voor diverse verschijnselen in de natuur en kent het vele toepassingen in de techniek om ons heen.

6. Literatuur

- Biezeveld, H. en Mathôt, L. (1984) *Scoop*, Groningen: Wolters-Noordhoff,
- Bouwens, R.E.A. en Verkerk, G. (1988) Inventarisatie van misconcepties in de optica, *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen*, 6, 83-98.
- Gerritsen van der Hoop, W. (1986) *Het onderwijzen van theoretische begrippen: een strategie voor het veranderen van preconcepties*, Tilburg: dissertatie.
- Jung, W. (1979) *Optik für die Sekundarstufe I*.
- Jung, W. (1981) Erhebungen zur Schülervorstellungen in Optik, *Phys. Did.* 8, 137-155.