

**Marjon Engelbarts**

# Op weg naar een didactiek voor natuurkunde-experimenten op afstand

Ontwerp en evaluatie van een via internet  
uitvoerbaar experiment voor leerlingen uit  
het voortgezet onderwijs

# **Op weg naar een didactiek voor natuurkunde-experimenten op afstand**

**Ontwerp en evaluatie van een via internet uitvoerbaar  
experiment voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs**

Engelbarts, Marjon B. A.

Op weg naar een didactiek voor natuurkunde-experimenten op afstand. Ontwerp en evaluatie van een via internet uitvoerbaar experiment voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs / M.B.A. Engelbarts - Utrecht: Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen.

Proefschrift Universiteit Utrecht. Met literatuuropgave. Met samenvatting in het Engels

ISBN: 978-90-73346-64-2

Trefwoorden: natuurkundeonderwijs / experiment op afstand / lichtsnelheid / didactische structuur / probleemstellende benadering / ontwikkelingsonderzoek / voorgezet onderwijs / afstandsonderwijs.

Key words: physics education / remote experiment / speed of light / didactical structure / problem posing approach / developmental research / pre-university level / distance education.

# **Op weg naar een didactiek voor natuurkunde- experimenten op afstand.**

**Ontwerp en evaluatie van een via internet uitvoerbaar  
experiment voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs**

**Towards a didactical framework for remote physics experiments**

Development and evaluation of an internet laboratory practical  
for pre-university students

(with a summary in English)

## **Proefschrift**

ter verkrijging van de graad van doctor  
aan de Universiteit Utrecht  
op gezag van de rector magnificus, prof. dr. J.C. Stoof,  
ingevolge het besluit van het college van promoties  
in het openbaar te verdedigen  
op maandag 16 februari 2009 des middags te 4.15 uur

door

**Marjon Berendina Alphonsius Engelbarts**  
geboren op 28 april 1974, te Doetinchem

Promotor: Prof. dr. H.M.C. Eijkelhof

Co-promotor: Dr. ir. J. Kortland

# Inhoudsopgave

<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Motief voor het onderzoek	8
1.2 Andere experimenten op afstand	16
1.3 Opzet van het onderzoek	19
1.4 Leeswijzer	22
<b>2 De inventarisatie: verkenning van de mogelijkheden en problemen</b>	<b>25</b>
2.1 Inleiding	26
2.2 Het experiment	26
2.3 Product 1 - Beschrijving	29
2.4 Product 1 - Onderzoeksactiviteiten	36
2.5 Product 2 - Beschrijving	46
2.6 Product 2 - Onderzoeksactiviteiten	50
2.7 Conclusie	55
<b>3 Het doel: een didactisch verantwoord experiment op afstand</b>	<b>57</b>
3.1 Inleiding	58
3.2 Ontwerpaanbevelingen n.a.v. eerste cyclus	58
3.3 Didactische strategie: probleemstellende benadering	60
3.4 Inhoudelijke uitlijning	68
3.5 Vormelementen	81
3.6 Onderzoeksvragen	86
<b>4 De uitwerking: scenario, lesmateriaal en onderzoeksmethode</b>	<b>95</b>
4.1 Inleiding	96
4.2 Lesmateriaal en scenario	96
4.3 Vormelementen	111
4.4 Onderzoeksmethode	123
<b>5 De A-vraag: het functioneren van de didactische structuur</b>	<b>125</b>
5.1 Inleiding	126
5.2 Resultaten A1: Globale motivering	126
5.3 Resultaten A2: Lichtsnelheid in lucht	134
5.4 Resultaten A3: Lichtsnelheid in andere media	149
5.5 Resultaten A4: Experimenteel fysisch	165
5.6 Conclusies A-vraag	168

6 De B-vraag: het functioneren van de vormelementen	171
6.1 Inleiding	172
6.2 Resultaten B1: Functioneren van de vormelementen	173
6.3 Resultaten B2: Afstandskarakter	183
6.4 Conclusies B-vraag	188
7 Reflectie	189
7.1 Inleiding	190
7.2 De onderzoeksvraag	190
7.3 Reflectie op het eindproduct	197
7.4 Reflectie op de onderzoeksmethode	204
7.5 Toekomst	210
Literatuur	221
Samenvatting	227
Summary (in English)	233
Bijlagen	239
Dankwoord	273
Curriculum vitae	275

# Inleiding



<b>1.1</b>	<b>Motief voor het onderzoek</b>	<b>8</b>
1.1.1	Aanleiding	8
1.1.2	Waarom praktisch werk in het voortgezet onderwijs?	9
1.1.3	Waarom experimenteren op afstand?	12
1.1.4	Waarom onderzoek aan experimenteren op afstand?	16
<b>1.2</b>	<b>Andere experimenten op afstand</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Opzet van het onderzoek</b>	<b>19</b>
1.3.1	Probleemstelling	19
1.3.2	Onderzoeksvraag	20
1.3.3	Onderzoeksmethode	21
<b>1.4</b>	<b>Leeswijzer</b>	<b>22</b>



## 1.1 Motief voor het onderzoek

### 1.1.1 Aanleiding

Eind jaren negentig werd er binnen de werkgroep Fysische Informatica, destijds onderdeel van de faculteit Natuur- en Sterrenkunde van de Universiteit Utrecht, gewerkt aan het ontwerpen en bouwen van software die het mogelijk maakte om plasmafysici uit Nederland, België en Duitsland<sup>1</sup> op afstand te laten samenwerken aan het verzamelen en verwerken van meetdata. De opzet was om reistijden van de medewerkers van de verschillende instituten te verminderen en de experimenteermogelijkheden te vergroten (Kemmerling *et al.*, 1999). Ook in andere onderzoeksgebieden, bijvoorbeeld bij het kernfysisch onderzoek aan het CERN<sup>2</sup> in Geneve en sterrenkundig onderzoek<sup>3</sup>, ontstonden initiatieven voor het faciliteren van centrale experimentele opstellingen die via internet bestuurd konden worden zodat wetenschappers op afstand experimenteel werk konden verrichten.

Naast activiteiten voor de plasmafysici werd binnen de werkgroep Fysische Informatica ook onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van de inzet van computers en internet binnen het onderwijs. Dit onderzoek richtte zich in eerste instantie op het ontwerpen, ontwikkelen en evalueren van een digitale cursus over signaalverwerking (Taal *et al.*, 1999). Geïnspireerd door het onderzoek voor de plasmafysici ontstond binnen deze groep het idee om te onderzoeken of experimenteren op afstand wellicht ook in het onderwijs toegepast zou kunnen worden. Er werd gestart met het bouwen van een experimentele opstelling die op afstand bestuurd kon worden. Het experiment werd ontworpen voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs. Zij zouden met de opstelling de mogelijkheid moeten krijgen een experimentele opstelling via een website te besturen en de meetresultaten uit te lezen. Zo zouden de leerlingen in staat gesteld worden een volwaardig experiment uit te voeren zonder fysiek bij de opstelling aanwezig te zijn.

Zoals gebruikelijk bij nieuwe ontwikkelingen, was de interesse in eerste instantie vooral technisch van aard en dus gericht op het werkend en door leerlingen uitvoerbaar krijgen van het op afstand bestuurbare experiment. Het streven was om hiermee zicht te krijgen op de bruikbare software en hardware, (technische) mogelijkheden en valkuilen voor een experiment op afstand. Gedurende de uitvoering van het onderzoek verschoof de focus steeds meer naar de didactische aspecten. Dit proefschrift beschrijft vooral dat deel van het onderzoek dat op de didactiek van experimenteren op afstand gericht was.

---

1 Respectievelijk FOM Instituut voor Plasmaphysica Rijnhuizen, Koninklijke Militaire School, Forschungszentrum Jülich. Projecten REMOT en Dynacore

2 Bijvoorbeeld: <http://conference.kek.jp/heacc2001/pdf/th04.pdf>

3 Bijvoorbeeld: <http://astro.caltech.edu/~pls/papers/spie-97.ps.gz>

In dit eerste hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de vraag wat experimenten op afstand kunnen bijdragen aan bestaande onderwijsvormen en waarom onderzoek nodig is. Om een beeld te krijgen van de situatie ten tijde van de start van het onderzoek wordt vervolgens (1.2) een beeld geschetst van de opzet en inhoud van andere experimenten op afstand in die tijd. Ten slotte zal de daaruit voortkomende probleemstelling uitgewerkt worden tot een globale onderzoeksvraag en wordt de onderzoeksmethode toegelicht (1.3). Het hoofdstuk wordt afgesloten met een leeswijzer voor dit proefschrift.

### 1.1.2 Waarom praktisch werk in het voortgezet onderwijs?

Onderzoek naar experimenteren op afstand is alleen de moeite waard als praktisch werk een waardevol element binnen het onderwijs is. Onder praktisch werk verstaan we:

*“Doelbewust geplande activiteiten waarbij door leerling of docent kwalitatieve of kwantitatieve waarnemingen worden verricht, gevolgd door interpretatie van deze waarnemingen om een bepaald leereffect te bereiken”* (van der Laan, 2002, p130).

Ervaring opdoen met praktisch werk en het ontwikkelen van onderzoeksvaardigheden zijn expliciete onderdelen van het examenprogramma en dus een geaccepteerd onderwijsdoel. In veel literatuur op dit gebied worden practica als een belangrijk element binnen het natuurkundeonderwijs gezien en worden diverse motieven voor praktisch werk binnen het onderwijs gegeven. Zo onderscheidt Hodson (1993) vijf categorieën van doelen die met praktisch werk behaald kunnen worden:

#### 1. Motiveren, door interesse te stimuleren en plezier te geven

Het doen van praktisch werk kan interesse in een bepaald onderwerp oproepen of vergroten. Bovendien vinden leerlingen het vaak leuk om praktisch werk te doen, wat een positief effect op hun houding ten aanzien van het vak heeft. Ook Friedler & Tamir (1990) stellen dat leerlingen praktisch werk leuk vinden, wat bijdraagt aan hun waardering voor de natuurwetenschappen als geheel. Hodson merkt op dat dit motiverend effect vaak niet eens zozeer een gevolg is van het uitvoeren van praktisch werk op zichzelf maar van aspecten als op een andere manier bezig zijn, de mogelijkheid vrijer met de docent en elkaar om te gaan tijdens de uitvoering van het practicum en de mogelijkheid in eigen tempo te werken. Ook White (1988) benadrukt dat praktisch werk de docent en leerling een soort plezier en levendigheid verschaft die moeilijk op andere manieren te verwezenlijken is.

#### 2. Praktische onderzoeksvaardigheden bijbrengen

Graham (1982) beschrijft onder andere hoe leerlingen door praktisch werk te doen onderzoeksvaardigheden ontwikkelen: ze leren over experimentele methoden

en meettechnieken, leren met verschillende soorten apparatuur te werken, leren onderzoeksdata te verwerken en hierover verslagen te schrijven.

### 3. *Uitbreiden van theoretische kennis*

Praktisch werk kan helpen bij het begrijpen van complexe en abstracte begrippen waardoor de natuurwetenschappen gekenmerkt worden. Bovendien biedt het mogelijkheden misconcepten bij leerlingen te identificeren en verhelpen (Friedler & Tamir, 1990). Het doen van praktisch werk kan ook bijdragen aan het concretiseren en/of visualiseren van een verschijnsel. Dat het zelf waarnemen van een verschijnsel een diepere indruk achterlaat dan wanneer je alleen hoort of leest over dit verschijnsel is een reeds lang bestaande opvatting. Al in 1811 werd geschreven: “*Observation must precede reasoning*” (Lazarowitz & Tamir, 1994) om duidelijk te maken dat het leerzaam is theoretisch werk vooraf te laten gaan door observatie.

### 4. *Inzicht geven in de wetenschappelijke onderzoeksmethoden*

Naast het onder doel 2 omschreven ontwikkelen van praktische vaardigheden – ‘*Doing science*’ (Hodson, 1993) – kan praktisch werk ook ingezet worden om zicht te geven op de wetenschappelijke onderzoeksmethode in het algemeen: ‘*Learning about science*’ (Hodson, 1993). Door sommige auteurs wordt ‘*Learning about science*’ uitgewerkt als de beeldvorming ten aanzien van de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus: dat het uitvoeren van praktisch werk een essentieel onderdeel van het werk van een natuurwetenschapper is, impliceert dat leerlingen ook praktisch werk moeten verrichten (Hegarty-Hazel, 1990).

### 5. *Ontwikkelen van een wetenschappelijke houding*

Het uitvoeren van praktisch werk vergroot probleemoplossende vaardigheden en het analytisch en generaliserend vermogen. Bovendien draagt het bij aan het kritisch kunnen beoordelen van resultaten (Friedler & Tamir, 1990). Dit zorgt niet alleen voor het zich eigen maken van de concrete vaardigheden (doel 2) of een beter zicht op de wetenschappelijke methoden (doel 4), maar zou zelfs een houdingsverandering ten aanzien van wetenschappelijk onderzoek kunnen bewerkstelligen. Door zelf onderzoek uit te voeren krijgen leerlingen meer gevoel voor stappen die gezet moeten worden, op welke wijze conclusies tot stand komen, welke eisen er aan een onderzoek gesteld moeten worden om gefundeerde conclusies te kunnen trekken en andere aspecten van wetenschappelijk onderzoek. Leerlingen ontwikkelen zo een open en objectieve houding, de bereidheid om conclusies en oordelen uit te stellen tot nader onderzoek is uitgevoerd en mogelijk ook het vermogen om de waarde en zwaarte van de conclusies in te kunnen schatten.

Al lijkt praktisch werk niet meer weg te denken uit het natuurkunde-onderwijs, toch worden er in de literatuur ook kritische kanttekeningen bij geplaatst. Hodson (1993) beargumenteert bijvoorbeeld dat de drie eerstgenoemde doelen niet vanzelfsprekend met praktisch werk te behalen zijn:

1. *Motiveren, door interesse te stimuleren en plezier te geven*

Het is verleidelijk om zogenaamde kookboekpractica te geven waarbij het uitvoeren van praktisch werk het opvolgen van precies omschreven instructies betekent. Deze kunnen immers volledig door de docent gestuurd worden en zijn overzichtelijk qua tijd en benodigde kennis en vaardigheden. Dergelijke experimenten zijn voorspelbaar en kunnen dus vrijwel risicoloos worden ingezet. Hodson is echter van mening dat met praktisch werk in deze vorm de gewenste doelen niet of nauwelijks bereikt kunnen worden. De leerlingen zullen dan alleen uitvoeren wat hen opgedragen wordt en dit zal hen weinig motiveren. De leerlingen moeten niet het gevoel hebben te werken aan het probleem van de leraar of hierbij zijn methode toe te moeten passen. Om praktisch werk een motiverende functie te laten vervullen, moeten leerlingen het gevoel hebben dat ze aan een eigen probleem werken waar zij zelf de oplossing voor moeten zoeken. Hierbij moeten ze zich inhoudelijk uitgedaagd voelen, maar het probleem mag niet *te* moeilijk zijn.

2. *Praktische onderzoeksvaardigheden bijbrengen*

Hodson nuanceert ook de mogelijkheden om onderzoeksvaardigheden met praktisch werk te ontwikkelen. Volgens hem is dit alleen effectief wanneer naar de leerlingen toe duidelijk wordt gemaakt welke vaardigheden ontwikkeld worden en waarom dit nuttig is. Hij benadrukt dat, om dit goed aan de leerlingen duidelijk te kunnen maken, vooraf nauwgezet zou moeten worden overwogen welke vaardigheden ontwikkeld of getraind gaan worden met het experiment. Leerlingen zullen alleen gemotiveerd zijn om vaardigheden te ontwikkelen als ze hiervoor goede redenen hebben en inzien dat de vaardigheden breder toepasbaar zijn dan alleen voor het experiment dat zij uitvoeren.

3. *Uitbreiden van theoretische kennis*

Onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat, voor het inhoudelijk ondersteunen of uitbreiden van kennis, het doen van praktisch werk minder succesvol blijkt dan andere onderwijsvormen (Hofstein & Lunetta, 1982; Atkinson, 1990).

Ook op de haalbaarheid van de andere doelen (4: *Inzicht geven in de wetenschappelijke onderzoeksmethoden* en 5: *Ontwikkelen van een wetenschappelijke houding*) is in de literatuur kritiek te vinden. Gott & Duggan (1995) merken op dat leerlingen over

het algemeen goed in staat zijn een onderzoek te structureren en de metingen uit te voeren. Echter, ze doen zelden meerdere metingen en hun ideeën over de verwerking van de gegevens en het evalueren van de data zijn maar matig. Volgens Smits (2003) speelt de docent een belangrijke rol bij het stimuleren van de leerlingen om de doelen 4 en 5 te bereiken. In de praktijk blijken veel docenten deze rol echter onvoldoende uit te voeren. Daarom blijft het valide en betrouwbaar uitvoeren van een onderzoek (doel 4) vaak onderbelicht, terwijl leerlingen juist aan de hand hiervan de noodzakelijk kritische afstand en reflectie ten aanzien van het eigen onderzoek zouden moeten ontwikkelen (doel 5).

Een ander punt van kritiek is dat het doen van praktisch werk op zichzelf vaak al als waardevol wordt beschouwd zonder dat er aandacht wordt besteed aan de doelen en de te verwachten leeropbrengst (Gott & Duggan, 1995). Ook Hodson (1993) beargumenteert dat, om praktisch werk effectief in te zetten, leraren voorafgaand aan een les nauwkeurig de gewenste opbrengst van die les zouden moeten formuleren en op grond daarvan beslissen of hiervoor de inzet van praktisch werk geschikt is. De algemene boodschap van de kritiek is dat praktisch werk om diverse redenen ingezet wordt, maar dat, om dit effectief te doen en de gewenste leeropbrengst te bereiken, vooraf goed over het beoogde resultaat zal moeten worden nagedacht om het experiment hier optimaal op af te kunnen stemmen.

### 1.1.3 Waarom experimenteren op afstand?

Met de komst van het gebruik van computers en internet binnen het onderwijs zijn de mogelijkheden om praktisch werk te integreren in de les toegenomen. Eind jaren negentig verschijnen de eerste experimentele opstellingen die via internet te besturen en uit te lezen zijn. Het enige wat leerlingen nodig hebben om deze '*experimenten op afstand*' te kunnen uitvoeren is een gewone PC met internetaansluiting. De leerling bevindt zich thuis of op school en de meetopstelling op een willekeurige locatie. De leerling kan via een website instellingen aan de opstelling doen, metingen starten en stoppen en zo data verzamelen.

Bij de meeste experimenten op afstand is een camera beschikbaar waarmee de opstelling en eventuele veranderingen als gevolg van door de leerling aangepaste parameters bekeken kunnen worden. In veel gevallen wordt er met een reserveersysteem voor gezorgd dat niet meerdere leerlingen tegelijk toegang hebben tot de opstelling, zodat de metingen niet verstoord kunnen raken. In dit proefschrift zal dit type experimenten aangeduid worden als '*experimenten op afstand*', waar de experimenten die de leerlingen op school en in direct bijzijn van de opstelling uitvoeren *conventionele experimenten* genoemd zullen worden.

## Meerwaarde en beperkingen

Het op afstand bestuurbaar maken van opstellingen biedt mogelijkheden het scala aan beschikbare experimenten uit te breiden. Door deze ontwikkeling kunnen leerlingen, in een veranderende situatie waarin “online” leren een steeds groter deel van de reguliere onderwijspraktijk gaat uitmaken, ook op deze manier experimentele ervaring opdoen (Cartwright & Valentine, 2002). De mogelijke meerwaarde van het op afstand kunnen uitvoeren van een experiment kan in drie categorieën van (praktische) redenen worden samengevat:

### 1. *Plaats- en tijdonafhankelijk karakter*

In diverse literatuur wordt benadrukt hoe het op afstand experimenteren de beschikbaarheid van opstellingen vergroot (bijvoorbeeld Cooper, 2005; Cartwright & Valentine, 2002; Belanger & Jordan, 2000).

- Door experimentele opstellingen op afstand bestuurbaar te maken hoeven de leerlingen niet meer fysiek bij de opstelling aanwezig zijn. Hierdoor vervalt de noodzaak te moeten reizen en zo kunnen opstellingen beschikbaar komen voor leerlingen die er anders van uitgesloten zouden zijn, zoals kinderen met verminderde mobiliteitsmogelijkheden of leerlingen die leven in gebieden waar de onderwijsmogelijkheden beperkt zijn.
- Leerlingen kunnen zelf het moment kiezen waarop ze het experiment doen en docenten zijn niet afhankelijk van de beschikbaarheid van een technisch onderwijs assistent (toa).

Het plaats- en tijdonafhankelijk karakter brengt echter ook enige beperkingen met zich mee. Wanneer ervoor gekozen wordt dat de leerlingen het experiment op ieder gewenst moment mogen uitvoeren, kan dit betekenen dat de docent niet aanwezig kan zijn. Deze kan dan niet sturen, inspringen op problemen, feedback geven over de voortgang en zo eventueel vastlopen voorkomen.

Het uitvoeren van een experiment op afstand zal door sommige leerlingen als minder prettig worden ervaren door het ontbreken van de mogelijkheid de opstelling zelf aan te raken en het experimenteren in al zijn aspecten te ervaren (waarnemen van geluiden horend bij het experiment, het spannende van in een lab aanwezig zijn, bijzondere geuren ruiken, enzovoort).

### 2. *Vergrote beschikbaarheid van apparatuur/aanbod van experimentele mogelijkheden*

Door opstellingen op afstand bestuurbaar te maken kan het beschikbare scala aan experimenten uitgebreid worden:

- Experimenten met gevaarlijke stoffen (bijvoorbeeld radioactief materiaal) die voorheen niet konden worden uitgevoerd, kunnen, wanneer op

afstand beschikbaar, mogelijk toch worden ingezet omdat dan de experimenteerisico's afwezig zijn.

- Door op afstand te experimenteren kunnen scholen en instituten kostbare apparatuur delen, waardoor een opstelling efficiënter ingezet kan worden. Bovendien kunnen bijzonder geïnteresseerde leerlingen hierdoor toegang krijgen tot opstellingen die normaal gesproken niet voor hen beschikbaar zijn. Scholen hoeven niet te investeren in dure apparatuur die misschien maar sporadisch gebruikt wordt en hoeven geen kosten te maken voor het onderhouden van de opstelling.
- Het op afstand experimenteren vergroot de flexibiliteit wat betreft de inzet van experimenten in de klas. Dit maakt het mogelijk om bijvoorbeeld ook langdurig lopende experimenten in te passen in de les. Het waarnemen van veranderingen en het besturen van de opstelling is immers op afstand praktisch gezien makkelijker en sneller uit te voeren en kan daarom tussen de andere activiteiten door gepland worden, terwijl ondertussen de metingen kunnen doorlopen.

Ook nu moet een kanttekening geplaatst worden. De vergrote beschikbaarheid van de apparatuur stelt namelijk wel bijzondere eisen aan onderhoud en ondersteuning van de apparatuur. Nog meer dan in de situatie op school waar een technisch onderwijs assistent eventueel kan inspringen om niet werkende apparatuur te herstellen moet bij experimenten op afstand het functioneren van de apparatuur, ook buiten kantooruren, gegarandeerd zijn. Daarnaast roept het de vraag op wie de aan het onderhoud en ondersteuning verbonden kosten voor zijn rekening moet nemen.

### 3. *Gecontroleerde/geconditioneerde omgeving*

Doordat leerlingen bij een experiment op afstand geen directe toegang tot de meetopstelling hebben, vindt het experiment plaats in een gecontroleerde omgeving. Dit gesloten karakter brengt mogelijke voordelen met zich mee.

- Hofstein & Lunetta (2004) schrijven in hun overzichtsartikel over praktisch werk: *“Several studies had shown that often the students and the teacher are preoccupied with technical and manipulative details that consume most of their time and energy. Such preoccupation seriously limits the time they can devote to meaningful, conceptually driven inquiry”*. Met een experiment op afstand kan deze ‘preoccupation’ beter gestuurd worden, waardoor onnodig tijdverlies gereduceerd kan worden en de focus inhoudelijk is: begrijpen de leerlingen wat ze aan het doen zijn (theorie en meetmethode ontwikkelen).
- Het biedt mogelijkheden de apparatuur te beschermen tegen onjuist gebruik en destructief gedrag.

- De opstelling is altijd standby. De docent of technisch onderwijs assistent hoeft alleen meettijd te reserveren bij de opstelling en verder geen tijd vrij te maken om de apparatuur klaar te zetten en de opstelling op te bouwen. Ook is de kans vele malen kleiner dat de leerlingen worden geconfronteerd met een, door andere leerlingen zo achtergelaten, niet werkende opstelling.

Het geconditioneerde karakter van een experiment op afstand kan echter ook nadelige, beperkende gevolgen hebben voor de openheid van het experiment en de vrijheid om de apparatuur te verkennen. Door de besturing op afstand is nu eenmaal niet alles instelbaar. Hierdoor is het aantal onderzoeksparameters beperkt en niet aanpasbaar (er kan bijvoorbeeld geen extra apparatuur worden aangesloten), wat de vrijheid in het formuleren van de onderzoeksvraag beperkt.

### **Spiegeling aan de doelen van praktisch werk**

Ondanks de genoemde kanttekeningen kan, terugkijkend naar de eerder geformuleerde doelen van experimenteel werk (1.1.2), geconcludeerd worden dat experimenten op afstand een interessante aanvulling op het beschikbare scala aan experimenten vormen. Het uitvoeren van een experiment op afstand zal dan misschien door sommige leerlingen als minder prettig worden ervaren, hier staat tegenover dat er wel toegang wordt verkregen tot boeiender, interessantere experimenten en meer geavanceerde opstellingen, gesitueerd op spannender plekken dan op school (universiteit, onderzoekslaboratorium). Ook het kunnen aanbrengen van een verandering aan een opstelling die zich wellicht kilometers verder bevindt zou er juist voor kunnen zorgen dat de leerlingen het experimenteren op afstand als extra leuk ervaren (doel 1, pag 3). De mogelijkheden om onderzoeksvaardigheden bij te brengen zullen beperkter zijn voor wat betreft het opdoen van instrumentele ervaring. Een voordeel is echter wel dat er minder tijd verloren zal gaan met het werkend krijgen en leren bedienen van de experimentele opstelling. Er kan meer nadruk gelegd worden op andere onderzoeksvaardigheden als het verwerken van de data, het begrijpen van de achterliggende theorie en de meetmethode en het kritisch beoordelen van de resultaten (doel 2, 3 en 5, pag 3-4). Bovendien wordt het in de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus meer en meer gebruikelijk om op afstand meetdata te verzamelen en uit te wisselen. Met een experiment op afstand kan dus zicht gegeven worden op de huidige handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. Daarmee kan het experiment op afstand bijdragen aan de beeldvorming van het vak (doel 4, pagina 10).

Om eventuele beperkingen zoveel mogelijk te omzeilen en de meerwaarde te benutten moet voorafgaand aan de ontwikkeling van een experiment op afstand zorgvuldig worden nagegaan waarom het de moeite waard is het specifieke experiment op



afstand uit te voeren, welke extra mogelijkheden dit biedt en met welke beperkingen dan rekening gehouden moet worden. Er moet kortom naar gestreefd worden alleen experimenten op afstand in te zetten wanneer dit meerwaarde ten opzichte van conventionele experimenten kan bieden.

### 1.1.4 Waarom onderzoek aan experimenteren op afstand?

Ten tijde van de start van ons onderzoek, rond 2000, leverde een zoektocht door de literatuur weinig verwijzingen naar onderzoek over experimenten op afstand op, maar er was zeker wel sprake van interesse voor het onderwerp. Er waren diverse projecten gaande, meestal gericht op het (technisch) opzetten van experimenten op afstand. De stand van zaken ten tijde van de start van het onderzoek zal (in 1.2) aan de hand van enkele van deze projecten worden gekarakteriseerd.

De meeste projecten richtten zich vooral op de technische invulling. De aandacht was gericht op het uitwerken en onderzoeken van de nieuwe mogelijkheden voordat de vraag hoe deze nu het beste ingezet zouden kunnen worden in het onderwijs aan bod kon komen. Vragen als hoe de inhoudelijke opzet eruit zou moeten zien, welke doelen hiermee bereikt kunnen worden en wat de leeropbrengst is, kunnen immers pas beantwoord worden als er een werkend prototype voorhanden is. Dit is overigens geen verrassende ontdekking maar gebruikelijk bij onderwijsvernieuwing met ICT. Simons (2002, pg 18) zegt hierover:

*“Dikwijls wordt tegenwoordig gedacht in drie soorten rollen van ICT en fasen van vernieuwing: substitutie (bestaand onderwijs verbeteren), transitie (didactische vernieuwing van onderwijsmethoden op beperkte schaal) en transformatie (fundamentele vernieuwing van onderwijsmethoden).”*

Het leek, kortom, tijd ook te gaan onderzoeken wat er didactisch komt kijken bij het opzetten van een experiment op afstand. De focus moet niet meer alleen technisch gericht zijn, maar er is onderzoek nodig gericht op de didactiek. Het onderzoek moet antwoord geven op vragen als: hoe moet het materiaal opgezet worden, welke elementen moet het bevatten, hoe kunnen de leerlingen gemotiveerd worden gehouden en hoe moeten de leerlingen hierbij gestuurd, gecontroleerd en ondersteund worden zonder dat het praktisch werk vervalt tot een kookboekpracticum.

## 1.2 Andere experimenten op afstand

Het ontbreken van rapportages over (onderzoek aan) de didactiek van een experiment op afstand hoeft uiteraard niet te betekenen dat al uitgevoerde projecten er helemaal geen aandacht aan hebben besteed. Om een beter beeld te krijgen van

hoe experimenten op afstand eruit zagen ten tijde van de start van het onderzoek<sup>4</sup> werden enkele projecten nader bestudeerd.

De meeste projecten waren tamelijk geïsoleerde individuele initiatieven. Ze ontstonden uit de behoefte om het vakgebied of werkterrein te promoten door de apparatuur die in het bezit was van een instituut beschikbaar te maken voor een groter publiek. Voorbeelden van dergelijke projecten zijn Magnetic Domains<sup>5</sup>, SPMLive!<sup>6</sup> en OPTLAB<sup>7</sup>. Op de websites van deze projecten ligt de nadruk op het beschikbaar maken van een opstelling die normaal gesproken niet tot de beschikking staat van leerlingen en waarmee zij leuk en interessant onderzoek kunnen doen. Bij 'Magnetic Domains' gaat het om een opstelling waarmee de wet van Malus, het Faraday effect en hysteresis kunnen worden onderzocht. Bij SPMLive (diverse onderwerpen uit de nanotechnologie) krijgen de leerlingen de mogelijkheid om metingen met een Scanning Probe microscoop te doen. Ze kunnen hiervoor zelf samples insturen die ze willen gaan onderzoeken. Bij OPTLAB kunnen de leerlingen meten aan interferentie van licht met een atmosferische spectrometer.

Op de websites wordt naast toegang tot de opstelling achtergrondinformatie over het experiment gegeven. Deze informatie wordt veelal gegeven in de vorm van 'platte tekst' en in sommige gevallen met wat animaties. De leerlingen worden geacht deze informatie te lezen en verder is er niet tot nauwelijks sprake van interactie tussen de leerlingen en het materiaal en er zijn geen controle en feedback faciliteiten ingebouwd. Bij alle experimenten kan de opstelling bekeken worden. Ook de inhoud van de achtergrondinformatie komt overeen: de theorie wordt erin uitgewerkt en de meetopstelling wordt toegelicht. Bij SPMLive! worden daarnaast ook de 'key concepts', de leerdoelen en de vereiste voorkennis expliciet gemaakt.

Bij alle projecten wordt de onderzoeksvraag niet geformuleerd. Bij Magnetic Domains en SPMLive! lijken het experiment en de achterliggende theorie los van elkaar te staan en wordt geen expliciet verband tussen de achterliggende theorie en de uiteindelijke meetmethode gelegd. Bij OPTLAB is hiervoor wat meer aandacht door het formuleren van enkele 'educational problems' die richting kunnen geven aan het formuleren van de onderzoeksvragen.

Er zijn ook verschillen tussen de projecten. Bij Magnetic Domains kunnen de

4 Omdat er rond 2000 nog maar weinig andere experimenten op afstand beschikbaar waren is 'de start van het onderzoek' hier wat ruimer genomen en bespreken we experimenten die tot en met 2002 ontwikkeld werden. Ook is de doelgroep van voortgezet onderwijs verruimd naar voortgezet en hoger onderwijs omdat bij diverse projecten beide doelgroepen aangesproken werden.

5 Magnetic Domains: <http://labfiz.uwb.edu.pl/exp/domeny/doswiadczenia.php?lang=en> (Laboratory of Magnetism, University of Bialystok, Poland)

6 SPMLive!: <http://invsee.asu.edu/invsee/invsee.htm> (Center for Solid State Science, Arizona State University)

7 OPTLAB: [http://optics.phys.spbu.ru/~Arkhipov/distphys/eng\\_page.htm](http://optics.phys.spbu.ru/~Arkhipov/distphys/eng_page.htm) (Sint Petersburg State University Faculty of Physics, training lab)

leerlingen bijvoorbeeld ook gebruik maken van datasets die al door anderen gemeten zijn. Bij SPMLive! valt op dat er verschillende gebruiker-niveaus gedefinieerd zijn met verschillende rechten, waardoor het ook mogelijk is de uitvoering van een experiment als ‘Observer’ te bekijken, terwijl ‘Operators’ ook werkelijk parameters kunnen wijzigen en metingen kunnen doen. Bij OPTLAB valt op dat op de site, naast het deel met het experiment, ook een deel beschikbaar is waar de leerlingen de theorie kunnen toepassen en verkennen met behulp van simulatiesoftware.

Naast deze tamelijk geïsoleerde initiatieven ontstaan er vanaf 2000 ook enkele projecten die gericht zijn op het grootschaliger opzetten van experimenten op afstand zoals het project PEARL. Dit project liep van 2000 tot en met maart 2003 en werd geleid door het Institute of Educational Technology van de Open University (UK) in samenwerking met vier partners<sup>8</sup>. Het project werd gesubsidieerd door de Europese Commissie<sup>9</sup> en had een budget van 2 miljoen dollar. Doel was om, aan de hand van vier experimenten (spectrometer, computer vision, microcontroller/introductory logic design, cell biology) een systeem te ontwikkelen waarmee leerlingen samen met andere leerlingen konden werken aan op afstand bestuurbare experimenten. Het voornemen was hierbij aandacht te besteden aan zowel de technische als de didactische aspecten (Colwell *et al.*, 2002). Aan het einde van het project werd het PEARL-handbook opgeleverd. Hieruit wordt duidelijk dat de opbrengst ten aanzien van de didactische aspecten mager is. Het onderzoek was voornamelijk gericht op het functioneren van de gebruikers-interface. De aandacht voor de didactiek beperkt zich tot de ontwerpaanbeveling dat het belangrijk is om vooraf de leerdoelen te omschrijven en aan te laten sluiten bij het experiment. Hierbij worden twee aandachtsgebieden onderscheiden: ten eerste een verantwoording of het experiment op afstand een geschikte onderwijsvorm is om het leerdoel te behalen, ten tweede een ontwerp van de gebruikersinterface dat aansluit bij het leerdoel.

Opvallend kenmerk van zowel de PEARL-experimenten als de andere experimenten op afstand die rond 2002 beschikbaar waren is dat de opzet weinig afwijkt van de opzet van conventionele experimenten:

- Er kan een handleiding bij een experimentele opstelling worden gedownload waarin instructies worden gegeven voor het uitvoeren van de handelingen en beknopt de theoretische achtergronden bij de meetmethode en de opstelling worden geschetst.
- Er wordt van de leerlingen verwacht dat zij semi-zelfstandig met de handleiding aan de slag kunnen. Gedurende de uitvoering is een docent of onderwijskundig

---

8 Department of Applied Computing van de University of Dundee, Computer Science Department at Trinity College Dublin, Department of Computers and Electronic Engineering, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Portugal) en Zenon Robotics and Informatics (Greece)

9 Information Society Technologies Program

assistent ter plekke die kan inspringen om te helpen bij problemen en te waarborgen dat de leerlingen op de goede weg zijn en blijven.

- Na uitvoering schrijven de leerlingen een verslag dat vervolgens door de docent wordt beoordeeld.

Het enige verschil tussen de rond 2002 beschikbare experimenten op afstand en de conventionele experimenten lijkt te zijn dat het materiaal en de opstelling nu via internet beschikbaar zijn. Enkele experimenten op afstand zijn alleen websites die het uiteindelijke meten faciliteren en nauwelijks meer bevatten dan toegang tot de opstelling. Sommige websites geven daarnaast wat achtergrondinformatie. De achtergrondinformatie bestaat uit tekst en wat illustraties (zoals in een conventionele practicum instructie) en een enkele animatie, maar er wordt verder geen gebruik gemaakt van de (interactie)mogelijkheden die het internet ook toen al bood. De website voorziet niet in het sturen en begeleiden van leerlingen en er is geen sprake van controle en feedback. De docent zal dus een belangrijke rol moeten blijven spelen. Dit is op zichzelf niet bezwaarlijk, maar kan wel afbreuk doen aan het tijd- en plaatsonafhankelijk karakter van een experiment op afstand. De wijze waarop deze experimenten in de klas ingezet kunnen worden verschilt niet van die van conventionele experimenten.

## **1.3 Opzet van het onderzoek**

### **1.3.1 Probleemstelling**

Met het beschikbaar komen van technische mogelijkheden om experimentele opstellingen via internet bestuurbaar te maken ontstond in de werkgroep Fysische Informatica, maar ook bij andere instituten, de behoefte deze nieuwe mogelijkheden te verkennen voor inzet in het onderwijs. In eerste instantie vanuit de nieuwsgierigheid naar hoe dit technisch vormgegeven zou kunnen worden, maar al snel verschuivend naar een meer algemene interesse in hoe een experiment op afstand er als geheel, dus zowel technisch als inhoudelijk, qua opzet en werkwijze, uit zou moeten zien.

Er werd gestart met het ontwikkelen van een experiment op afstand voor het voortgezet onderwijs waaraan de eisen werden gesteld dat het technisch moest functioneren en uitvoerbaar zou zijn. Kortom, het doel was materiaal te maken dat in ieder geval ‘werkt’. De meest voor de hand liggende manier leek te zijn om in eerste instantie, net als vergelijkbare projecten, te kiezen voor een opzet die dicht bij het conventionele practicum lag. Daarom werd eerst de opstelling via internet bestuurbaar gemaakt. Een website moest toegang geven tot de opstelling en de informatie verschaffen die bij

## Hoofdstuk 1

een conventioneel practicum via een practicumhandleiding beschikbaar is. We kozen ervoor te streven naar een experiment op afstand dat het tijd- en plaatsafhankelijke karakter zoveel mogelijk benut. Dit betekende dat het experiment zodanig opgezet zou worden dat de leerlingen het zonder aanwezigheid van een docent zouden kunnen uitvoeren, wat bijzondere eisen stelde aan de practicumhandleiding. Om zicht te krijgen op deze bijzondere eisen was onderzoek nodig. Het onderzoek moest duidelijk maken aan welke voorwaarden de handleiding moest voldoen en wat, gezien de bijzondere eisen, een geschikte werkwijze zou zijn. Ook moest het helpen om de voordelen van het op afstand experimenteren zoveel mogelijk uit te buiten, de nadelen op te heffen of te omzeilen en tot transitie en transformatie (Simons, 2002) van dit type onderwijs te komen. Dit zou moeten leiden tot een goed functionerend experiment op afstand, waarbij ‘goed functionerend’ betekent dat het voldoet aan drie criteria:

### *Technisch criterium*

Het experiment moet technisch, zowel wat betreft de hardware als de software, zodanig functioneren dat de apparatuur van de opstelling zonder haperen te besturen en uit te lezen is. De leerlingen moeten, ondanks dat zij niet fysiek bij de opstelling aanwezig zijn, metingen kunnen verrichten en daarbij het gevoel houden dat ze een experiment aan het uitvoeren zijn.

### *Inhoudelijk criterium*

De leerlingen moeten het experiment zelfstandig en zonder tussenkomst van de docent of practicumassistent kunnen uitvoeren en de gewenste leeropbrengst behalen. Het moet voor de leerlingen een zekere mate van openheid hebben en begrijpelijk maar ook uitdagend en boeiend zijn, waardoor zij het uitvoeren van het experiment als een zinvolle activiteit ervaren.

### *Meerwaarde criterium*

Er moet verantwoord kunnen worden waarom het op afstand bestuurbaar zijn meerwaarde biedt ten opzichte van reeds beschikbare experimenten.

## 1.3.2 Onderzoeksvraag

Gelet op de bovenstaande criteria voor een ‘goed functionerend’ experiment op afstand luidt de globale onderzoeksvraag:

*Hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?*

Om de ontwikkeltijd van het experiment te minimaliseren leek het handig te kiezen voor een bestaand experiment. We hadden goede ervaringen met een experiment waarmee de lichtsnelheid in verschillende media bepaald kon worden. Dit experiment maakte deel uit van het eerstejaarspracticum van de opleiding natuur- en sterrenkunde aan de Universiteit Utrecht en werd tijdens voorlichtingsdagen ingezet om bezoekende leerlingen een idee te geven van hoe het practicum van eerstejaarsstudenten eruit zag.

Ook was een aangepaste versie onderdeel van het bovenbouwpracticum<sup>10</sup> voor leerlingen uit 5 en 6 VWO. Dit experiment leek, wanneer op afstand bestuurbaar, mogelijkheden te bieden om aan de genoemde criteria te voldoen. Allereerst was de opstelling in technisch opzicht geschikt om op afstand bestuurbaar te maken (criterium 1). Verder waren de ervaringen met het experiment positief, zowel bij de eerstejaars natuurkundestudenten als bij de leerlingen die de voorlichtingsdagen of het bovenbouwpracticum bezochten. Ook boden het onderwerp en het experiment voldoende aanleiding voor inhoudelijke verdieping (criterium 2). Ten slotte ging het om een opstelling die normaal gesproken niet op een middelbare school beschikbaar was. Een op afstand bestuurbare variant van dit experiment zou dus een nuttige en interessante toevoeging aan het scala van voor leerlingen beschikbare experimenten kunnen zijn (criterium 3).

### 1.3.3 Onderzoeksmethode

Omdat ten tijde van de start van het onderzoek op afstand bestuurbare experimenten nog maar beperkt beschikbaar waren en ook in de literatuur hierover nauwelijks iets te vinden was, leek een “ontwikkelingsonderzoek” een geschikte methode om zicht te krijgen op de kenmerken van een goed experiment op afstand.

In het algemeen kenmerkt ontwikkelingsonderzoek (Gravemeijer, 1994; Lijnse, 1995) zich door een cyclisch proces van reflectie op de inhoud en het onderwijsleerproces, kleinschalige lesmateriaal- of curriculumontwikkeling en onderzoek naar de interacties binnen het leerproces tijdens het gebruik van dat lesmateriaal. Het primaire doel van ontwikkelingsonderzoek is om na te gaan welk onderwijsleerproces geschikt is om het gewenste leerdoel te bereiken. Het proces van reflectie, ontwikkeling en onderzoek leidt uiteindelijk tot een op empirie gebaseerde beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces voor het behandelde onderwerp (Lijnse, 1995; Kortland, 2001).

---

<sup>10</sup> Het bovenbouwpracticum is een faciliteit van het departement Natuur- en Sterrenkunde van de Universiteit Utrecht. Het wordt georganiseerd door het Centrum voor Natuurkundedidactiek in samenwerking met het onderwijsinstituut van het departement. Het biedt leerlingen natuurkunde NG en NT uit de twee laatste klassen van HAVO en VWO de gelegenheid experimenten uit te voeren met opstellingen die normaal gesproken niet op school aanwezig zijn. Deze leerlingen bezoeken de universiteit gedurende een halve dag om een experiment uit te voeren. Meer informatie hierover op: <http://www.cdbeta.uu.nl/vo/bbp/>

In het ontwikkelingsonderzoek aan het experiment op afstand werden twee ontwikkelcycli doorlopen. De eerste cyclus, waarin twee producten werden ontwikkeld, had een verkennend karakter. In lijn met vergelijkbare projecten werd eerst geprobeerd het afstandsexperiment werkend te krijgen. Hierbij werd om pragmatische redenen nauw aangesloten bij de opzet van conventionele experimenten. De ervaringen van deze eerste cyclus werden vervolgens in de tweede cyclus gebruikt om zowel het globale ontwerp als de concrete uitwerking grondig te doordenken, te ontwikkelen en te testen. In het ontwikkelproces van deze tweede cyclus kunnen drie fasen worden onderscheiden:

1. Een *reflectiefase* waarin de problemen en kenmerken van de inhoud van het onderwerp en het daaraan gekoppelde leerproces met bijbehorende interacties in kaart worden gebracht, uitlopend op een globaal ontwerp van het lesmateriaal.
2. Een *ontwikkelingsfase* waarin het globale ontwerp wordt uitgewerkt tot concreet lesmateriaal, inclusief een verantwoording en een beschrijving van het gewenste en verwachte verloop van het onderwijsleerproces in de vorm van een scenario.
3. Een *testfase* waarin onderzocht wordt of het materiaal functioneert zoals bedoeld door het onderwijsleerproces van de leerlingen te vergelijken met het gewenste en verwachte verloop zoals weergegeven in het scenario.

De verwachte opbrengst van het ontwikkelingsonderzoek is een doordacht en goed functionerend lichtsnelheidsexperiment op afstand, met daaruit voortvloeiend meer gegeneraliseerde conclusies ten aanzien van de technische en inhoudelijke opzet van een experiment op afstand.

### 1.4 Leeswijzer

In de hierna volgende zes hoofdstukken volgt de rapportage van het ontwikkelingsonderzoek aan het lichtsnelheidsexperiment op afstand.

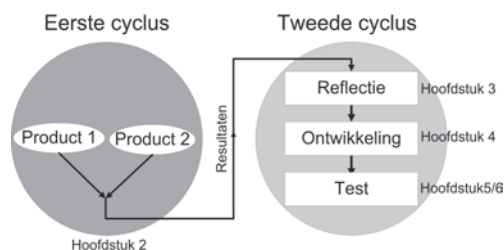
Hoofdstuk 2 gaat in op de eerste cyclus, waarin op intuïtieve wijze aan de hand van twee achtereenvolgens ontwikkelde versies van het experiment geprobeerd is een eerste indruk van de technische en didactische mogelijkheden en problemen te krijgen. De eerste cyclus had een duidelijk verkennende functie en de resultaten hiervan zijn gebruikt als input voor de tweede cyclus die beschreven wordt in de daarop volgende hoofdstukken.

In hoofdstuk 3 staat het ontwerp van het experiment centraal. Het beschrijft de reflectiefase van de tweede cyclus en heeft een didactische focus. Eerst wordt ingegaan op de probleemstellende didactiek, omdat deze wordt ingezet als oplossingsrichting voor de in de eerste cyclus geconstateerde problemen en het theoretische raamwerk

voor de uiteindelijke versie van het experiment levert. Hierbij is ook aandacht voor de inzet van de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus in het ontwikkelproces. Daarna wordt de probleemstellende didactiek concreet toegepast op het lichtsnelheidsexperiment om te komen tot een globaal ontwerp in de vorm van een didactische structuur. Vervolgens worden de ontwerpeisen aan de vormelementen, die gezamenlijk de concrete website vormen en ter ondersteuning van de didactische structuur dienen, beschreven. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een verfijning van de globale onderzoeksvraag in twee hoofdvragen gericht op de inhoud en de vorm van het lesmateriaal.

Hoofdstuk 4 gaat in op de ontwikkelfase van de tweede cyclus en beschrijft hoe het ontwerp (beschreven in hoofdstuk 3) is uitgewerkt naar concreet lesmateriaal. Eerst wordt een beschrijving van het lesmateriaal gegeven in de vorm van een scenario met daarin het gewenste en verwachte verloop van het onderwijsleerproces. Daarna worden de hoofdonderzoeksvragen verder uitgewerkt en wordt de onderzoeksmethode toegelicht om zicht te geven op hoe het ontwerp en het lesmateriaal geëvalueerd zullen gaan worden.

Nadat het ontwerp was uitgewerkt in lesmateriaal kon de testfase van de tweede cyclus gestart worden. Er werd in kaart gebracht of het materiaal zowel didactisch als wat vorm betreft functioneerde zoals gewenst en verwacht. De resultaten van dit onderzoek worden beschreven in de hoofdstukken 5 (inhoudelijk) en 6 (vorm). Figuur 1-1 geeft de opzet van het proefschrift weer en vat samen in welk hoofdstuk welke fase van het ontwikkelingsonderzoek aan bod komt.



**Figuur 1-1** – Opbouw van het ontwikkelingsonderzoek aan het lichtsnelheidsexperiment.

In hoofdstuk 7 wordt het onderzoek afgesloten. Er wordt teruggekeken op het onderzoek en de conclusies over het specifieke experiment worden gegeneraliseerd om de in 1.3.2 geformuleerde onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden.



## Hoofdstuk 1

# De inventarisatie:

## verkenning van de mogelijkheden en de problemen



2.1	Inleiding	26
2.2	Het experiment	26
2.3	Product 1 – Beschrijving	29
2.3.1	Inleiding	29
2.3.2	Opzet en Navigatie	30
2.3.3	Werkwijze	32
2.3.4	Inhoud	33
2.4	Product 1 – Onderzoeksactiviteiten	36
2.4.1	Inleiding	36
2.4.2	Onderzoeksmethode	36
2.4.3	Resultaten	39
2.4.4	Conclusie product 1	44
2.5	Product 2 – Beschrijving	46
2.5.1	Inleiding	46
2.5.2	Opzet en Navigatie	47
2.5.3	Werkwijze	48
2.5.4	Inhoud	48
2.6	Product 2 – Onderzoeksactiviteiten	50
2.6.1	Inleiding	50
2.6.2	Onderzoeksmethode	50
2.6.3	Resultaten	51
2.6.4	Conclusie product 2	53
2.7	Conclusie	54

## 2.1 Inleiding

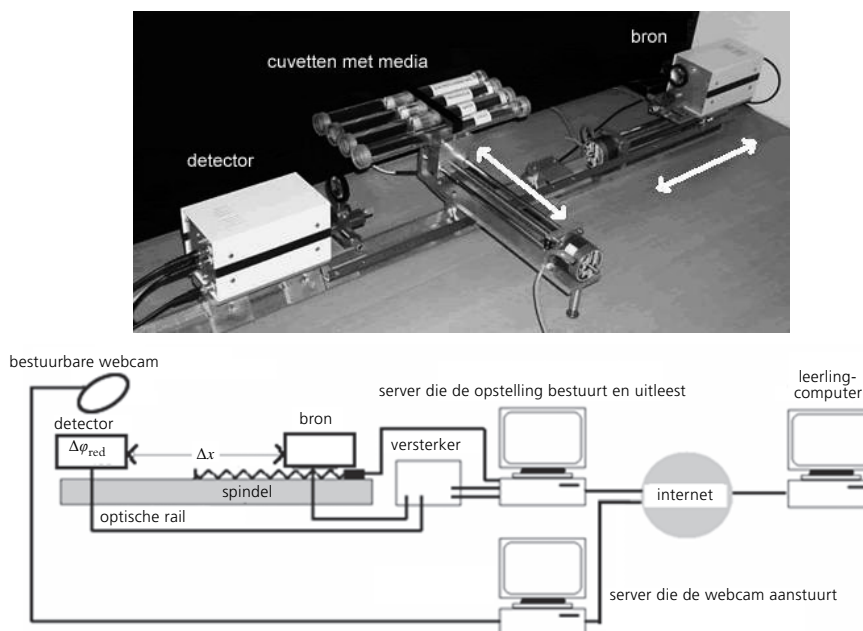
In hoofdstuk 1 is beschreven hoe de onderzoeksvraag tot stand kwam, is een indruk gegeven van vergelijkbare projecten en literatuur hierover ten tijde van de start van het onderzoek en is geschetst hoe het onderzoek in twee ontwikkelingscycli is vormgegeven. In dit hoofdstuk wordt de eerste ontwikkelingscyclus beschreven. Doel van deze cyclus was om, door op intuïtieve wijze te werken aan het ontwerp van een concreet experiment, een idee te krijgen van de technische en didactische mogelijkheden en problemen. Er werd gewerkt aan het ontwerpen en testen van een fysisch experiment dat via internet bestuurd en uitgelezen kan worden en waarmee leerlingen uit 5/6 VWO de lichtsnelheid kunnen bepalen.

Het hoofdstuk start met een beschrijving van de theorie van het experiment en de meetopstelling (2.2) zodat de problemen van de leerlingen met het materiaal die later beschreven worden makkelijker te begrijpen zijn. De ontwikkeling van het lesmateriaal in de eerste cyclus vond in twee rondes plaats.

De eerste versie van het materiaal (product 1, grotendeels ontwikkeld door van Yperen (2000)) en de ervaringen ermee worden respectievelijk in 2.3 en 2.4 beschreven. Vervolgens zijn enkele aanpassingen aan het materiaal (product 2) gedaan die in 2.5 toegelicht worden. In 2.6 worden de ervaringen hiermee beschreven. Op grond hiervan worden ten slotte in 2.7 aanbevelingen geformuleerd die de input voor de tweede cyclus van het ontwikkelingsonderzoek vormden.

## 2.2 Het experiment

De meetopstelling van Experimenteren op Afstand – Lichtsnelheid is weergegeven in figuur 2-1. De opstelling bestaat uit een hoogfrequent gemoduleerde lichtbron, een detector, vier cuvetten en twee lenzen voor een parallelle lichtbundel. De cuvetten zijn gevuld met water, suikeroplossing en paraffineolie en kunnen tussen de lichtbron en de detector geschoven worden. De bron en de cuvetten zijn gemonteerd op een spindel. Dit is een as die door een stappenmotor wordt aangedreven (zie de witte pijlen in figuur 2-1). Met deze spindels kan de afstand  $\Delta x$  tussen bron en detector gevarieerd worden en kan het gewenste medium tussen bron en detector geplaatst worden. De computer meet het verschil in fase tussen het signaal dat bij de bron vertrekt en het signaal dat bij de detector arriveert. Bij een grotere afstand tussen bron en detector zal een groter faseverschil geregistreerd worden (immers  $\Delta\varphi = \Delta x / \Delta\lambda$ ). Door gebruik te maken van  $c = \lambda \cdot f$  kan een relatie worden afgeleid waarin ook de lichtsnelheid voorkomt:  $c = (\Delta x / \Delta\varphi) \cdot f$ . Volgens deze relatie zou meting van  $\Delta x$  en  $\Delta\varphi$  tot de lichtsnelheid moeten leiden. Maar er zijn nog twee problemen die eerst opgelost moeten worden.



**Figuur 2-1** Foto (boven) en een schematische voorstelling (onder) van de meetopstelling voor het meten van de lichtsnelheid.

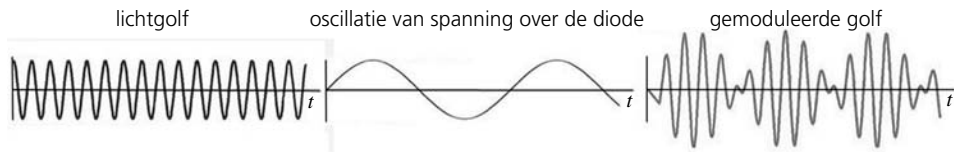
*De pijlen geven aan welke onderdelen op een spindel zijn gemonteerd en daardoor op afstand bestuurbaar zijn. Om de schematische weergave overzichtelijk te houden zijn de cuvetten met de media niet ingetekend.*

**Probleem 1:** De computer meet het gereduceerd faseverschil en daarom is het van belang dat de afstand tussen bron en detector kleiner is dan de golflengte van het gebruikte licht. In de beschikbare opstelling is de afstand tussen bron en detector echter veel groter (64–86 cm) dan de golflengte (700 nm). Omdat het verkleinen van de afstand tussen bron en detector tot maximaal 700 nm praktisch gezien geen optie is, moet gezocht worden naar een manier de golflengte te vergroten.

Het probleem wordt opgelost door met behulp van amplitudemodulatie het signaal zodanig te manipuleren dat de golflengte opgerekt wordt. Het principe achter moduleren is als volgt: de gebruikte lichtbron is een Licht Emitterende Diode (LED) die gevoed wordt met een wisselspanning van 50 MHz afkomstig van een kristaloscillator. Dit zorgt voor een lichtsignaal waarvan de intensiteit periodiek varieert. Door de fase van de intensiteit van het licht te meten en niet de fase van het lichtsignaal zelf kan het probleem van de korte golflengte omzeild worden: de computer meet het verschil in fase tussen de voedingsspanning van de oscillator en de spanning op de lichtdetector.

Figuur 2-2 geeft het modulatieprincipe schematisch weer en laat zien hoe het signaal door het moduleren ‘opgerekt’ wordt: de intensiteit van het oorspronkelijke

signaal (linker golf) wordt periodiek met een bekende frequentie ( $f_{\text{mod}} = 50 \text{ MHz}$ ) (middelste golf) gevarieerd. De computer meet niet het gereduceerde faseverschil van het lichtsignaal zelf (linker golf), maar van de omhullende van het nieuwe signaal waarvan de intensiteit varieert (rechter golf).



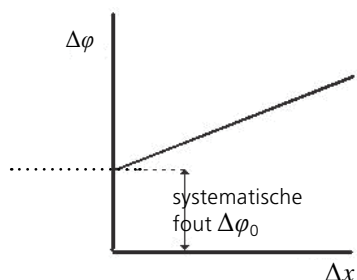
**Figuur 2-2** Schematische weergave van het principe van amplitudemodulatie

De golflengte van dit oscillerende signaal is  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 50 \cdot 10^6 = 6 \text{ m}$ . Omdat de afstand tussen bron en detector maximaal 0,86 m is, zal het faseverschil bij de detector nu wel altijd kleiner dan  $\pi$  zijn. Hiermee is het faseverschil dus, voor iedere mogelijk afstand tussen bron en detector, gelijk aan het *gereduceerde* faseverschil<sup>1</sup>. Omdat aan het gemoduleerde signaal gemeten wordt, moet in de eerder afgeleide relatie tussen de lichtsnelheid, de afstand tussen bron en detector en de frequentie nu de modulatiefrequentie ingevuld worden:  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$  (waarbij de modulatiefrequentie en de lichtsnelheid constanten zijn). Gebruik makend van deze relatie zou meting van  $\Delta x$  en  $\Delta \varphi$  nu tot de lichtsnelheid moeten leiden.

**Probleem 2:** Er moet echter eerst nog een tweede probleem met de opstelling worden opgelost. Dit probleem is bewust gecreëerd om de leerlingen zelf het elimineren van systematische fouten te laten ervaren. Door een verschil in lengte van de kabels tussen bron en computer en detector en computer is er sprake van een verschil in looptijd van de signalen waardoor er een extra faseverschuiving optreedt. Het faseverschil dat gemeten wordt is systematisch te groot:  $\Delta \varphi = \Delta \varphi_0 + (f_{\text{mod}}/c) \cdot \Delta x$ . Aangezien deze constante verschuiving ( $\Delta \varphi_0$ ) onafhankelijk is van de afstand  $\Delta x$  tussen bron en detector kan deze systematische fout geëlimineerd worden door het faseverschil niet slechts bij één afstand tussen bron en detector te meten maar als functie van de afstand tussen bron en detector. Uitzetten van het gemeten faseverschil tegen de afstand levert een lineair verband (zie figuur 2-3). De asafsnede representeert dan de constante verschuiving als gevolg van de systematische fout en met de richtingscoëfficiënt ( $f_{\text{mod}}/c$ ) kan de lichtsnelheid bepaald worden. Met de opstelling kan ook de lichtsnelheid in andere media dan lucht (water, paraffineolie en een suikeroplossing) bepaald worden door tussen de lichtbron en

<sup>1</sup> Omdat bij de gekozen opstelling het gereduceerd faseverschil in alle gevallen gelijk zal zijn aan het faseverschil wordt vanaf nu, wanneer wordt gesproken over 'faseverschil', hiermee altijd het gereduceerd faseverschil bedoeld, tenzij anders vermeld wordt.

detector een medium met bekende lengte  $L$  te plaatsen. Aan de hand van het extra faseverschil ten opzichte van het faseverschil in lucht kan dan de lichtsnelheid in het betreffende medium bepaald worden. De meetmethode zal bij de beschrijving van de producten 1 en 2 verder uitgewerkt worden.



**Figuur 2-3** Elimineren van de systematische fout

*De systematische fout is te elimineren door het faseverschil  $\Delta\phi$  te meten als functie van de afstand  $\Delta x$  tussen bron en detector*

## Product 1 – Beschrijving

### 2.2.1 Inleiding

Het eerste lesmateriaal werd op grond van intuïtieve keuzes en ideeën als een ‘proof of concept’ ontwikkeld. Het doel was te proberen binnen afzienbare tijd en met beperkte middelen een werkend experiment op afstand op te zetten. Om de ontwikkeltijd in eerste instantie beperkt te houden, werd het experiment gebaseerd op materiaal van een bestaand experiment uit het eerstejaars practicum voor natuurkundestudenten van de Universiteit Utrecht. Het lichtsnelheidsexperiment werd vaak tijdens voorlichtingsdagen aan de UU voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs gebruikt om hen een indruk te geven van de practica voor eerstejaars studenten en leek hen dan te boeien. Het lesmateriaal werd opnieuw opgezet om het beter te laten aansluiten bij de doelgroep. Van de leerlingen uit het voortgezet onderwijs kan immers minder zelfstandigheid en inhoudelijke diepgang verwacht worden. De doelgroep was leerlingen uit 5 of 6 VWO. Het experiment werd vormgegeven als opdracht van ongeveer 10 uur zoals gebruikelijk voor praktische opdrachten binnen de reguliere onderwijspraktijk.

Het doel van het experiment was het bepalen van de lichtsnelheid in lucht en de brekingsindex in verschillende media. Theoretische kennis die hierbij ingezet moest worden was: beschrijving van licht als golfverschijnsel, de begrippen fase, gereduceerde fase, faseverschil in een lopende golf en systematische fout en de relaties tussen de grootheden golflengte, faseverschil, frequentie en golfsnelheid. Bij het bestuderen van het materiaal zou nieuwe kennis ten aanzien van het optisch weglengteverschil opgedaan worden.

Algemene onderzoeksvaardigheden die aan bod kwamen waren het doorgronden van een geavanceerde meetopstelling en een ingewikkelde meetmethode, het verzamelen en verwerken van meetgegevens, het elimineren van een systematisch fout door de meetgegevens uit te zetten als een lineaire functie en het schrijven van een verslag.

### 2.2.2 Opzet en Navigatie

#### Opzet

Het materiaal, dat als ‘product 1’ zal worden aangeduid, was uitgevoerd als website<sup>2</sup> die alle informatie voor het uitvoeren van het experiment bevatte. De informatie over het experiment was gescheiden van het deel dat toegang tot de opstelling verschafte via respectievelijk de Experimentsite en de Meetsite.

De functie van de *Experimentsite* was de leerlingen te ondersteunen bij het uitvoeren van het experiment. De meetopstelling werd beschreven, de achterliggende theorie en meetmethode werden uitgelegd en er werd toegelicht hoe met Excel de gemeten data verwerkt konden worden. Daarnaast bood de Experimentsite toegang tot de ‘Agenda’ waarin meettijd kon worden gereserveerd.

Via de *Meetsite* kon de meetopstelling bestuurd, bekeken en uitgelezen worden. De gemeten data konden worden opgeslagen en via de Experimentsite gedownload worden om te verwerken. De leerlingen moesten bij binnenkomst van de Meetsite aangeven welk experiment ze wilden uitvoeren: lichtsnelheid in lucht en brekingsindex in water, suikeroplossing en paraffineolie (zie figuur 2-4). De keuze bepaalde de opmaak en de instelbare parameters van het scherm dat vervolgens verscheen en toegang gaf tot het besturen van de meetopstelling.



**Figuur 2-4** Startpagina van de Meetsite

De opzet van de Meetsite was zodanig dat zoveel mogelijk handelingen die in het conventionele practicum zouden moeten worden verricht ook een actie in het experiment op afstand vereisten. Zo moesten de leerlingen bijvoorbeeld zelf de afstand tussen bron en detector instellen en variëren en zelf het bij een bepaalde afstand gemeten faseverschil toevoegen aan de dataset. Om steeds zicht te houden op de status van de opstelling was op het scherm een indicator opgenomen. Deze gaf aan of de bron nog bezig was met verplaatsen (rood) of dat de

<sup>2</sup> <http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsiteoud/index.htm>

opstelling klaar was om te meten (groen). Daarnaast was de status van de opstelling ook te controleren met een camerabeeld. De camera kon door de leerlingen bestuurd worden en kon inzoomen op specifieke onderdelen van de opstelling. Er werd geprobeerd de besturing van de opstelling intuïtief begrijpelijk te laten zijn zodat hiervoor geen aparte instructie nodig was.

## Navigatie

De opzet van het materiaal was zodanig dat de leerlingen een specifieke voorgeschreven weg moesten afleggen om de meetmethode en achterliggende theorie goed te kunnen begrijpen. De leerlingen werden op de eerste pagina van de Experimentsite attent gemaakt op deze volgorde: ze moesten van 'meetopstelling' naar 'theorie' naar 'meetmethode' naar 'meten' naar 'data verwerken' (zie figuur 2-5).

Door te klikken op 'meten' wordt de Meetsite geopend en kan de meetopstelling bestuurd worden. De overige onderdelen bevinden zich op de Experimentsite.

site mapper

welkom  
agenda  
meetopstelling  
theorie  
meetmethode  
meten  
dataverwerking  
downloaden  
email

server tijd

## welkom op het experiment-deel

Welkom op de website waar je een experiment kunt doen met een meetopstelling die bij de Faculteit Natuurkunde van de Universiteit Utrecht staat. In dit experiment ga je de lichtsnelheid in lucht en de brekingsindices van een aantal media bepalen. Het volgende diagram geeft de werkwijze gedurende het experiment aan.

```
graph LR; A[meetopstelling] --> B[theorie]; B --> C[meetmethode]; C --> D[meten]; D --> E[data verwerken];
```

! tijd reserveren

! Het is erg belangrijk dat je meettijd reserveert in de Agenda voordat je gaat meten. Doe dit zo snel mogelijk, je kunt later altijd een reservering annuleren.

Start, voor op- of aanmerkingen, het messageboard: (dit is een soort prikbord waar je 'briefjes' kunt achterlaten).

Klik [hier](#) om terug te gaan de naar het informatiedeel.  
De uitleg bij meetopstelling, theorie en meetmethode kun je eventueel [hier](#) downloaden.

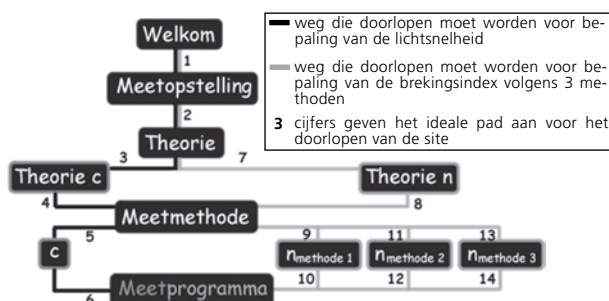
**Figuur 2-5** - Eerste pagina van de Experimentsite.

Op de eerste pagina werd de werkwijze aan de leerlingen duidelijk gemaakt door uit te leggen in welke volgorde de verschillende onderdelen van de site doorlopen dienen te worden. Het blokje 'data verwerken' verwijst niet naar een scherm, maar naar de actie die de leerlingen na het meten moeten ondernemen. Hoe ze de data moeten verwerken hebben ze dan al geleerd bij het bestuderen van de meetmethode. De link 'dataverwerking' (aan de linkerkant van de pagina) verwijst naar een praktische instructie over het gebruik van Excel bij het verwerken van de data. Linksbovenaan de pagina bevindt zich de 'Sitemapper'-knop die toegang geeft tot een schematisch overzicht van de website (zie verder figuur 2-6).

De leerlingen werden door het materiaal gestuurd door een link aan het einde van iedere pagina die verwees naar de volgende, maar de hoofdonderwerpen (meetopstelling, theorie enzovoort) waren ook via de knoppen aan de linkerkant van de pagina te bereiken. Door te klikken op de knop 'sitemapper' (links bovenaan



de pagina) verscheen een scherm waarop de structuur van het materiaal van ‘meetopstelling’ tot en met ‘meten’ gevisualiseerd werd (zie figuur 2-6).



**Figuur 2-6** Sitemapper

*In de sitemapper werd de aanbevolen volgorde van ‘Meetopstelling’ tot aan het meetprogramma zichtbaar gemaakt. De link naar de praktische informatie over de dataverwerking is niet via de sitemapper te bereiken*

De leerlingen kregen de aanwijzing te starten met het bestuderen van ‘Meetopstelling’. Daarna werden ze doorverwezen naar ‘Theorie’ waar werd aangekondigd dat het geheel in twee experimenten was opgedeeld:

- Meting van de lichtsnelheid in lucht
- Bepaling van de brekingsindex van andere media.

Dit tweede experiment omvatte drie subexperimenten:

1. bepaling van de brekingsindex van water
2. bepaling van de brekingsindex van een suikeroplossing
3. bepaling van de brekingsindex van paraffineolie

Analoog aan de opdeling in twee experimenten was de theorie ook opgesplitst in twee delen. Het eerste deel (lichtsnelheid in lucht: ‘c’ in de sitemapper) geeft de achtergronden bij het eerste experiment. Het tweede deel (brekingsindex van andere media: ‘n’ in de sitemapper) geeft de theorie behorend bij het tweede experiment. De leerlingen moesten eerst de pagina’s theorie en meetmethode van het eerste experiment bestuderen en de daaruit volgende metingen uitvoeren. Hierna mochten ze pas verder met de theorie van het tweede deel waarin achtergronden bij de metingen in andere media werden gegeven. Dit werd, analoog aan het eerste experiment, gevolgd door het onderdeel ‘Meetmethode’. Hier werden voor de drie subexperimenten verschillende meetmethoden uitgewerkt. De leerlingen kregen, wederom analoog aan het eerste experiment, het advies eerst een subexperiment af te ronden (specifieke meetmethode bestuderen en de metingen uitvoeren) om daarna pas te beginnen aan het volgende subexperiment. Het idee was te laten zien dat de brekingsindex met dezelfde opstelling op verschillende, in nauwkeurigheid oplopende, manieren gemeten kon worden. De aanname vooraf was dat de eerste meetmethode voor leerlingen intuïtief het makkelijkst zou zijn en een functionele rol kon vervullen bij het begrijpen van de tweede en derde methode.

### 2.2.3 Werkwijze

De verwachting was dat het doorlopen van de website ervoor zou zorgen dat de leerlingen zelfstandig de verschillende meetmethodes zouden kunnen begrijpen en uitvoeren. Hierbij zouden de leerlingen moeten kunnen volstaan met het bestuderen van de teksten op de site zonder verdere opdrachten uit te voeren of vragen te beantwoorden. Op enkele momenten in het materiaal werden er wel vragen gesteld, maar hierop werden de antwoorden direct in het materiaal gegeven. Voor alle experimenten werd, voorafgaand aan de metingen, de meetmethode samengevat in de vorm van een praktische meetinstructie.

### 2.2.4 Inhoud

Doel van de Experimentsite was de leerlingen voor te bereiden op en te ondersteunen bij het uitvoeren van het experiment. De onderdelen 'Meetopstelling', 'Theorie' en 'Meetmethode' en het onderdeel 'Dataverwerking' (met uitleg over het verwerken van de data met Excel) moesten ervoor zorgen dat de leerlingen zelfstandig in staat zouden zijn een waarde voor de lichtsnelheid in verschillende media te vinden.

#### Meetopstelling

'Meetopstelling' bevatte een overzichtsfoto van de opstelling en detailfoto's van de bron, de detector en de media. Er was te zien hoe de bron en de cuvetten op een spindel gemonteerd zijn om de opstelling op afstand bestuurbaar te maken. De opstelling werd toegelicht aan de hand van enkele vragen (met antwoorden):

- Wat kan ik met deze meetopstelling meten?
- Maakt het uit of de golflengte van het licht kleiner is dan de afstand tussen bron en detector? Wat is de golflengte van het licht dat de diode uitzendt?
- Waarom gebruiken we hier dan geen licht met een golflengte van een aantal meter?
- Hoe kunnen we dan toch het rode licht met een te kleine golflengte gebruiken?
- Hoe weet je dat een signaal met een frequentie van 50 MHz een golflengte van een aantal meter heeft?

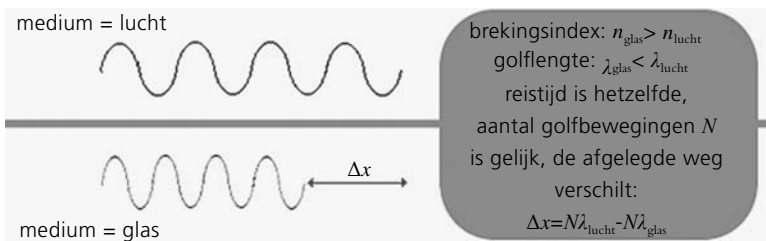
Deze vragen moesten de leerlingen ervan bewust maken dat de computer het gereduceerde faseverschil meet en dat er gemeten zou gaan worden aan de intensiteit van het oscillerende signaal.

#### Theorie

In de theorie over het meten van de lichtsnelheid in lucht werd de relatie tussen de lichtsnelheid, de frequentie, de afstand tussen bron en detector en het faseverschil afgeleid:  $c = 360 \cdot (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ . Dit wijkt met een factor 360 af van de relatie zoals afgeleid in 2.2 omdat het meetprogramma het faseverschil in graden meet. Ook het

## Hoofdstuk 2

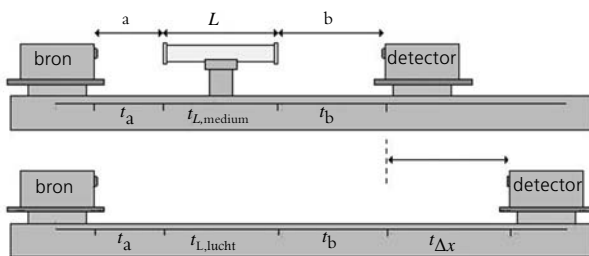
verband tussen de brekingsindex en de lichtsnelheid werd gegeven:  $n = c/c_{\text{medium}}$ . Bij de theorie voor experimenten in andere media werd vervolgens de term ‘optisch weglengteverschil’ geïntroduceerd en uitgelegd. Dit werd ingeleid door op te merken dat een lichtgolf, die in een tijd  $t$   $N$  periodes doorloopt, een totale afstand  $x_{\text{lucht}} = N \cdot \lambda_{\text{lucht}}$  aflegt. Analoog hieraan legt die golf in een medium dan een afstand  $x_{\text{medium}} = N \cdot \lambda_{\text{medium}}$  af. Omdat het licht zich in een medium voortplant met een golflengte die kleiner is dan de golflengte in lucht en de frequentie constant blijft zal bij gelijke tijd  $x_{\text{medium}}$  kleiner zijn dan  $x_{\text{lucht}}$ . Daarna werd het optisch weglengteverschil geïntroduceerd als het verschil in afgelegde weg:  $x_{\text{lucht}} - x_{\text{medium}}$ . Er werd afgesloten met een animatie die het verschijnsel visualiseerde (zie figuur 2-7).



**Figuur 2-7** Animatie waarin het optisch weglengteverschil gevisualiseerd wordt.

Een lichtgolf kan in lucht in een bepaalde tijd  $t$  een langere weg afleggen dan in een medium. Het optisch weglengteverschil is gedefinieerd als het verschil in de twee afgelegde afstanden (gedurende tijd  $t$ ).

Vervolgens werd preciezer gekeken naar wat over de tijd  $t$ , gedurende welke het licht zich verplaatst, gezegd kon worden. Aan de hand van figuur 2-8 moest duidelijk worden dat, wanneer het licht zich een bepaalde tijd  $t$  door lucht verplaatst, het een langere afstand kan afleggen dan wanneer het zich dezelfde tijd  $t$  door een medium zou verplaatsen.



**Figuur 2-8** Visualisatie van het optisch weglengteverschil

In het onderste plaatje is de extra afstand  $\Delta x$  (optisch weglengteverschil) gevisualiseerd die het licht bij gelijk faseverschil kan afleggen wanneer er geen medium (van lengte  $L$ ) tussen bron en detector is geplaatst.

De extra afstand die het licht in lucht kan afleggen is dan het optisch weglengteverschil. De totale reistijd van het licht kan dus worden opgesplitst in  $t_a + t_{L,\text{medium}} + t_b = t_a + t_{L,\text{lucht}} + t_b + t_{\Delta x}$ . Dit kan worden herschreven naar  $t_{L,\text{medium}} = t_{L,\text{lucht}} + t_{\Delta x}$ . Door hierin voor  $t$  het quotiënt van afgelegde afstand en snelheid in te vullen volgt:  $L/c_{\text{medium}} = L/c_{\text{lucht}} + \Delta x/c_{\text{lucht}}$ . Dit werd ten slotte herschreven naar:  $c_{\text{lucht}}/c_{\text{medium}} = n_{\text{medium}} = 1 + \Delta x/L$

### Meetmethode

In de sectie Opzet en Navigatie (2.3.2) is al besproken dat ‘Meetmethode’ werd opgesplitst in de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht en drie meetmethoden voor de subexperimenten van de brekingsindices in drie media. De drie meetmethoden van de subexperimenten zijn niet specifiek voor de media, maar er aan gekoppeld om de drie methoden te kunnen onderscheiden.

De methode voor het meten van de lichtsnelheid in lucht werd uitgelegd door expliciet naar de verschillende grootheden in de bij ‘Theorie’ afgeleide relatie ( $c = 360 \cdot (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ ) te kijken. De leerlingen werden erop gewezen dat de waarde voor  $f_{\text{mod}}$  kan worden nagezocht bij ‘Meetopstelling’ en dat  $\Delta x / \Delta \varphi$  uit de richtingscoëfficiënt van een  $\Delta \varphi, \Delta x$ -diagram bepaald kan worden (zonder verder in te gaan op de noodzaak van het uitzetten in een diagram).

De meetmethode voor het bepalen van de brekingsindex in water sloot aan bij de theorie over het optisch weglengteverschil. Bij deze meetmethode stelden de leerlingen het optisch weglengteverschil in de opstelling zelf in. Hiertoe maten ze eerst, bij een bekende afstand tussen bron en detector, het faseverschil in lucht. Vervolgens moesten ze met het medium ertussen het optisch weglengteverschil bepalen door de afstand tussen bron en detector zodanig in te stellen dat hetzelfde faseverschil werd gemeten als in de situatie zonder medium. De afstand waarover ze de bron hadden moeten verplaatsen is dan immers het optisch weglengteverschil ( $\Delta x$ ). Deze konden ze gebruiken om tot een waarde voor de brekingsindex te komen aan de hand van de bij ‘Theorie’ afgeleide relatie  $n_{\text{medium}} = 1 + \Delta x / L$ .

De meetmethode voor de suikeroplossing borduurde hierop voort maar maakte gebruik van de metingen zonder medium die in het ‘lichtsnelheid in lucht’-experiment al gedaan waren. De leerlingen hoefden nu alleen het faseverschil met medium te meten en in de eerdere metingen zonder medium opzoeken bij welke afstand hetzelfde faseverschil gevonden werd. Het verschil in afstand in de situatie met medium en de in de grafiek opgezochte afstand gaf opnieuw het optisch weglengteverschil. Dit optisch weglengteverschil kon, net als bij het eerste subexperiment, in de formule ingevuld worden om tot de waarde voor de brekingsindex te komen.

Bij de meetmethode voor het derde subexperiment werd eerst aannemelijk gemaakt dat, in de bij ‘Theorie’ afgeleide relatie  $c = 360 \cdot (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ ,  $\Delta x$  het optisch weglengteverschil en  $\Delta \varphi$  het verschil tussen het gemeten faseverschil met en zonder medium  $\Delta \varphi_{\text{paraffine}} - \Delta \varphi_{\text{lucht}}$  representeren. Door de relatie om te schrijven naar  $\Delta x = c \cdot \Delta \varphi / f_{\text{mod}}$  en bij dezelfde afstand tussen bron en detector tweemaal het faseverschil te meten (met en zonder medium) kon dus het optisch weglengteverschil bepaald worden. Dit leidde tot de brekingsindex door gebruik te maken van de relatie  $n_{\text{medium}} = 1 + \Delta x / L$ .

### **Dataverwerking**

Bij ‘Dataverwerking’ werd stap voor stap uiteengezet hoe Excel met data konden worden verwerkt. Er werd uitgelegd hoe een best passende rechte lijn door de meetpunten kon worden gevonden en hoe hieruit de richtingscoëfficiënt bepaald kon worden. Het onderdeel beperkte zich tot het leren gebruiken van Excel. Er werd niet uitgewerkt hoe met deze richtingscoëfficiënt de lichtsnelheid berekend kon worden omdat de leerlingen deze laatste stap zelf zouden moeten kunnen zetten.

## **2.3 Product 1 – Onderzoeksactiviteiten**

### **2.3.1 Inleiding**

Met de ontwikkeling van product 1 werd een eerste stap gezet in het vergaren van kennis over de eisen aan een experiment op afstand voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs. Doel was om, bij gebrek aan relevante literatuur, zelf ervaring op te doen met experimenteren op afstand en zo zicht te krijgen op de technische en didactische moeilijkheden en valkuilen. Het onderzoek aan het eerste product had daarom een open en inventariserend karakter. De onderzoeksvraag luidde:

*Lukt het om een ‘werkend’ experiment op te zetten dat technisch functioneert en door leerlingen uitvoerbaar is?*

Voordat de onderzoeksactiviteiten gestart werden, hadden we al aanwijzingen gekregen dat het product potenties had. De website werd namelijk beloond met de eerste prijs bij ‘Thinkquest voor de klas 2000’. Dit was een wedstrijd die werd georganiseerd in opdracht van het Ministerie van OC&W met als doel de beste Nederlandstalige educatieve website te bouwen, die gebruikt kon worden in het Nederlandse basis- of voortgezet onderwijs. De beoordeling van de websites gebeurde door een jury waar zowel leerlingen als docenten deel van uit maakten.

Met het bieden van de mogelijkheid op afstand een meetopstelling te bestuderen om zo experimenten uit te kunnen voeren die normaal gesproken niet beschikbaar zijn had de website zich duidelijk onderscheiden van de andere inzendingen. De jury waardeerde de opzet en de wijze waarop het uitgewerkt was. Zij waren van mening dat met het experiment op afstand een stap voorwaarts gezet werd wat betreft het benutten van de mogelijkheden van internet binnen het voortgezet onderwijs.

### **2.3.2 Onderzoeksmethode**

Het antwoord op de onderzoeksvraag werd gezocht door het product voor te leggen

aan leerlingen, leraren en didactisch experts. De verwachting was dat triangulatie van deze drie databronnen de mogelijkheden en problemen van het experiment voldoende zichtbaar zou maken en een globale eerste indruk over het functioneren zou geven. Het onderzoek vond plaats in vier verschillende contexten:

- een leerlingtest tijdens Natuurkunde-Masterclass 2000,
- een docententest tijdens Physics on Stage 2000,
- een demonstratie en interview met docenten op Woudschoten 2000,
- een expert-analyse uitgevoerd door twee onderzoekers van het Centrum voor Natuurkundendidactiek van de Universiteit Utrecht.

De keuze voor deze contexten was pragmatisch. De onderzoeksactiviteiten werden gepland op bijeenkomsten die met een ander doel georganiseerd werden, maar gelegenheid boden om gemotiveerde en geïnteresseerde leerlingen (de doelgroep) en docenten in contact te brengen met het materiaal, zonder hiervoor aparte activiteiten te moeten plannen en organiseren. De verwachting was dat deze onderzoeksactiviteiten voldoende zouden opleveren voor de beantwoording van de oriënterende en verkennende onderzoeksvraag, die er immers op gericht was een eerste idee van de technische en didactische potenties van het materiaal te krijgen. Het benutten van de Masterclass-situatie als onderzoekssituatie maakte het mogelijk om in een beperkte hoeveelheid tijd zowel het technisch als didactisch functioneren van het product voor een betrekkelijk grote groep leerlingen na te gaan. Door daarnaast bij de onderzoeksactiviteiten de docenten zelf met het materiaal aan de slag te laten gaan en hierover te laten discussieren werd met betrekkelijk beperkte middelen toch een brede indruk vanuit het docentperspectief verkregen. De analyse met de experts zorgde er ten slotte voor dat de analyse van het didactisch functioneren van het experiment verder verdiept kon worden.

### **Masterclass 2000<sup>3</sup>**

Op 23 oktober 2000 voerden tijdens de zogenaamde ‘Masterclass 2000 voor natuurkunde’ 16 leerlingen het experiment uit. De masterclass wordt ieder jaar in de herfstvakantie georganiseerd om geïnteresseerde leerlingen uit 5 of 6 VWO kennis te laten maken met het (onderzoek aan het) departement Natuur- en Sterrenkunde van de Universiteit Utrecht. Eén van de onderdelen van de Masterclass 2000 was de workshop ‘ICT en onderwijs’, waarbij de leerlingen het materiaal van product 1 bestudeerden. Onderzoeksdoel was een beeld te krijgen van wat de leerlingen er van vonden en te testen of de site functioneerde.

De onderzoeksdata werden verzameld door de leerlingen tijdens de uitvoering te observeren en na afloop een aantal vragen over het materiaal te laten beantwoorden.

---

3 <http://www1.phys.uu.nl/Masterclass/>

De enquête bestond uit vragen waarbij een cijferwaardering gevraagd werd, ja/nee vragen met motivering en enkele open vragen. Er werden vragen gesteld over de algemene indruk, over de site en over wat ze als moeilijk ervaarden. Omdat het binnen de workshop moest passen hadden de leerlingen slechts iets minder dan twee uur om de meetopstelling, theorie en de meetmethode te bestuderen, de metingen te doen en deze te verwerken. Het zou onmogelijk zijn om binnen deze tijd het hele experiment te doen en daarom doorliepen zij alleen het eerste experiment (lichtsnelheid in lucht). Na afloop werden veertien enquêtes ingeleverd (twee koppels leverden één enquête in).

### **Physics on Stage 2000<sup>4</sup>**

Physics on Stage 2000 was een vijfdaagse conferentie voor Europese docenten werkzaam in het voortgezet onderwijs die in november 2000 plaatsvond op het CERN in Genève. Doel van de conferentie was om, ten aanzien van de onderwijspraktijk, inspiratie op te doen en kennis te delen met Europese collega's. De Nederlandse delegatie bestond uit 15 personen. Enkelen waren werkzaam als onderzoeker in de didactiek en de meesten waren actieve, enthousiaste docenten. Vijf docenten uit deze delegatie hebben gedurende vrije momenten van de conferentie de site doorlopen. Na afloop bespraken zij in een open gesprek met de onderzoeker (ook deel van de delegatie) hun ervaringen. Doel van het gesprek was de eerste indruk in kaart te brengen. In een open gesprek werd geïnventariseerd wat onduidelijkheden, positieve en negatieve punten en gewaardeerde of juist gemiste onderdelen waren.

### **Woudschoten 2000<sup>5</sup>**

Tijdens een workshop op de Woudschoten 2000 conferentie in Noordwijkerhout (december 2000) werd het experiment gepresenteerd aan vijf docenten. De workshop, met aansluitend een demonstratie van het experiment, waarbij ook enkele metingen werden gedaan, nam twee uur in beslag. De presentatie werd afgesloten met een discussie van ongeveer 45 minuten tussen de deelnemende docenten en de onderzoeker. De open discussie werd geleid door de onderzoeker en geïnitieerd door vooraf omschreven richtvragen. Deze richtvragen werden na afloop van de demonstratie geprojecteerd en de docenten kregen enkele minuten de tijd om zich een mening te vormen. Daarna startte de open discussie over de volgende richtvragen:

- Wat is uw eerste indruk van het experiment?
- Wat zijn goede en slechte eigenschappen/kenmerken van het experiment?
- Is het bruikbaar in de klas? Wat zou de rol van de docent moeten zijn?
- Aan welke soort experimenten is er behoefte?

---

4 <http://physiconstage.web.cern.ch/physiconstage/>

5 <http://www.cdbeta.uu.nl/vo/woudschotennatuurkunde/default.php>

- Liever simulaties?
- Waar 'vallen' leerlingen voor?

De discussie werd geopend door de docenten te vragen hun eerste indruk ten aanzien van het experiment te verwoorden. De discussie die daarna ontstond richtte zich op onvolkomenheden en mogelijke verbeteringen aan de site en de mogelijke bruikbaarheid in een onderwijssituatie. De discussie werd vastgelegd op een geluidsbestand en op een later tijdstip door de onderzoeker geprotocolleerd.

### **Expert-analyse**

De expert-analyse vond plaats door een tweetal didactisch experts uit het Centrum voor Natuurkundendidactiek van de Universiteit Utrecht te vragen het experiment te bestuderen en hen na onderling overleg te laten rapporteren over hun algemene indruk en de te verwachten knelpunten. De onderzoeker was bij deze rapportage aanwezig, kon vragen om verduidelijking en maakte gedurende het gesprek zelf aantekeningen. De experts waren globaal reeds bekend met het materiaal en de bovengenoemde onderzoeksresultaten, maar hadden nu de opdracht gekregen het materiaal (opnieuw) uitgebreid kritisch op inhoud, vorm en opzet te beoordelen.

### **2.3.3 Resultaten**

Met het onderzoek werd geïnventariseerd in hoeverre het gelukt was een experiment op te zetten dat technisch functioneerde, door leerlingen uitvoerbaar en voor leerlingen begrijpelijk was. De resultaten van de drie onderzoeksactiviteiten worden gezamenlijk besproken en binnen de thema's 'Techniek', 'Inhoud', 'Opzet', 'Werkwijze' en 'Metingen' samengevat. Hierbij wordt, wanneer relevant, toegelicht wat de herkomst van een besproken resultaat is.

#### **Techniek**

Zowel docenten en leerlingen als didactische experts ondervonden geen grote technische problemen. Het reserveren van meettijd en vervolgens besturen en uitlezen van de meetgegevens functioneerden zoals gewenst.

#### **Inhoud**

De docenten die deelnamen aan de Woudschoten-workshop gaven aan dat het belangrijk is consequent in het gebruik van symbolen te zijn om onnodige verwarring bij de leerlingen te voorkomen. Ook benadrukten zij dat de gebruikte symbolen duidelijk gedefinieerd moesten worden. Voor dezelfde parameter zou steeds dezelfde notatie gebruikt moeten worden en voor (enigszins) verschillende parameters moesten verschillende symbolen worden ingezet. Door een 'Physics on



Stage'-docent werd opgemerkt dat het tussen 0 en 360 graden uitdrukken van het faseverschil (dus als faseverschilhoek) voor leerlingen onnodig verwarrend was omdat zij gewend zijn dat dit tussen 0 en  $\pi$  gedefinieerd is.

Dit vermoeden werd bevestigd doordat ook twee Masterclass leerlingen dit antwoordden op de vraag of ze moeite hadden met bepaalde onderdelen. Een andere leerling gaf aan moeite te hebben gehad met het faseverschil en een vierde leerling had het geheel als lastig ervaren. De overige acht leerlingen vulden in geen moeite met bepaalde onderdelen te hebben gehad. Uit observatie van de Masterclass leerlingen tijdens het bestuderen van de meetmethode bleek dat veel leerlingen ook het stuk over moduleren moeilijk vonden. Ze wekten de indruk de betreffende pagina's slechts vluchtig te lezen zonder echt te weten waar ze mee bezig waren. Ze leken vooral 'op weg' naar het starten van de werkelijke metingen.

Op grond van de scores op de vraag om met een cijfer tussen 1 en 5 aan te geven hoe makkelijk (5) of moeilijk (1) de theorie en de verwerking waren, kan geconcludeerd worden dat de meeste leerlingen de verwerking moeilijk vonden (8 leerlingen vonden het moeilijk tot zeer moeilijk, gemiddelde score<sup>6</sup>  $2,3 \pm 1,0$ ). De theorie werd maar door 2 leerlingen als moeilijk ervaren en door 6 leerlingen als makkelijk tot zeer makkelijk (gemiddelde score  $3,4 \pm 1,0$ ). Wat ze precies moeilijk vonden aan de dataverwerking werd niet goed duidelijk uit de onderzoeksresultaten omdat hier niet expliciet naar gevraagd werd. Dat niet meer leerlingen aangeven ergens moeite mee gehad te hebben betekent niet dat ze alles begrepen hebben. Slechts vier leerlingen antwoordden 'ja' op de vraag of ze de theorie goed hadden doorgelezen voordat ze begonnen, de overige acht hebben de site alleen globaal gelezen.

Uit observaties tijdens de masterclass werd wel duidelijk dat de leerlingen ook moeite hadden met het gebruik van Excel voor de dataverwerking. Eén leerling merkte hierover bij het enquêteonderdeel 'Overige opmerkingen/suggesties' op: 'het verwerken van de data in een grafiek zou makkelijker moeten kunnen en in minder stappen'. Ook een 'Physics On Stage' docent liet weten te vermoeden dat dit onderdeel wel eens voor problemen zou kunnen zorgen omdat slechts weinig leerlingen gewend zijn met Excel te werken en leerlingen liever een grafische rekenmachine of IPCoach<sup>7</sup> gebruiken voor het berekenen van een richtingscoëfficiënt. Dit probleem is overigens

---

6 Met ' $\pm 1,0$ ' wordt de standaarddeviatie aangeduid. De antwoorden van de koppels die slechts één enquête inleverden zijn één keer meegeteld omdat niet duidelijk was of de antwoorden de mening van beide leerlingen representeerden.

7 IPCoach is een programma ontwikkeld door het CMA dat verbonden is aan het Amstel Instituut van de Universiteit van Amsterdam <http://www.cma.science.uva.nl/Software/>. Het kan worden gebruikt voor het aansturen en uitlezen van meetopstellingen en het analyseren en verwerken van meetgegevens en wordt op veel scholen ingezet bij praktisch werk.

ondertussen door de tijd opgelost, want tegenwoordig zijn leerlingen wel bedreven in het werken met Excel.

De analyse door experts bracht nog enkele andere inhoudelijke onvolkomenheden naar voren:

- In het eerste deel van de theorie werd  $n_{\text{medium}} = c_{\text{vacuum}}/c_{\text{medium}}$  gegeven als de relatie voor de brekingsindex. Deze voor leerlingen onbekende relatie werd verder niet toegelicht. De leerlingen kenden het begrip brekingindex al wel in een andere context, namelijk de wet van Snellius:  $n = \sin(i)/\sin(r)$ . In het materiaal werd hier echter geen verbinding mee gelegd. Dit zou voor leerlingen wel eens verwarrend kunnen zijn. Meer algemeen geformuleerd werd hier op onzorgvuldige wijze voorkennis opgeroepen en werd de nieuwe theorie hieraan niet gerelateerd.
- In het tweede deel van de theorie werd het begrip ‘optisch weglengteverschil’ geïntroduceerd. Leerlingen kenden dit begrip nog niet en hadden waarschijnlijk moeite om het te kunnen plaatsen en hanteren. Dit zou voor onrust kunnen zorgen terwijl de meetmethode ook prima ontwikkeld kon worden zonder gebruik te maken van optisch weglengteverschil, maar direct aan de hand van het extra faseverschil, zoals toegelicht in 2.2. Meer algemeen geformuleerd werd hier dus onnodig een nieuw concept geïntroduceerd.
- Om te illustreren dat licht in lucht met een grotere golflengte beweegt dan in glas was aan de site een animatie toegevoegd waarin twee sinusoides zich voortplanten (figuur 2-7). De animatie liet zien dat de beide golven hetzelfde aantal golflengtes (in dezelfde tijd) afleggen, maar dat de golf die door lucht beweegt wel een grotere afstand aflegt. Het zou voor de leerlingen wel eens verwarrend kunnen zijn dat in deze animatie de golf meerdere golflengtes aflegt terwijl er bij ‘Meetopstelling’ juist de nadruk op werd gelegd dat de golf niet meer dan één golflengte aflegt tussen bron en detector. Meer algemeen geformuleerd was hier dus sprake van inconsistent gepresenteerde theorie.
- Bij de theorie van het eerste experiment ( $c$  in lucht) werd  $\Delta x$  gedefinieerd als de afstand tussen de bron en de detector. Bij het tweede experiment ( $n$  in andere media) werd met  $\Delta x$  echter het optisch weglengteverschil aangeduid, zonder deze andere invulling te benoemen. Meer algemeen geformuleerd was dus sprake van inconsistent gebruik van symbolen.
- Er werd bij de beschrijving van de meetmethode niet toegelicht waarom het nodig is een lineaire relatie tussen het faseverschil en de afstand tussen bron en detector te meten in plaats van te volstaan met het meten bij één afstand tussen bron en detector. Er werd niet uitgewerkt dat de systematische fout veroorzaakt werd door verschil in kabellengte. Hierdoor zagen de leerlingen waarschijnlijk niet in waarom er een relatie moest worden gemeten en ze niet konden volstaan met de meting bij één afstand tussen bron en detector. Meer algemeen geformuleerd werd hier onvoldoende aandacht besteed aan het toelichten en aannemelijk maken van de theorie en de meetmethode.

- Ook bij de lichtsnelheid in andere media was de aandacht voor het aannemelijk maken van de meetmethode te beperkt. Het was verwarrend dat de meetmethoden expliciet aan een specifiek medium waren gekoppeld terwijl de verschillende media op zichzelf geen specifieke meetmethode vereisten. Er was te weinig aandacht voor het verschil tussen de methoden en de reden voor het gebruik van drie verschillende methoden werd onvoldoende toegelicht.
- In het materiaal werd nauwelijks ingegaan op vragen als waarom je een experiment als dit zou willen uitvoeren, waarom het lastig is de lichtsnelheid te bepalen, waarom dat interessant is en wat te verwachten problemen zijn. Bovendien was nergens aandacht voor het opstellen van een onderzoeksvraag. Meer algemeen geformuleerd werd in het materiaal te weinig aandacht besteed aan het verantwoorden van de meetopstelling, de meetmethode en het experiment als geheel.

### **Metingen**

De beperkt beschikbare tijd voor het bestuderen van het experiment lijkt geen invloed te hebben gehad op het kunnen uitvoeren van de metingen. Geen van de leerlingen bleek hierbij hulp nodig te hebben. De vraag hoe makkelijk (5) of moeilijk (1) ze het uitvoeren van de metingen vonden scoorde  $4,4 \pm 0,67$ .

### **Opzet: navigatie/overzicht**

Zowel enkele 'Physics On Stage'-docenten als een aantal Masterclassleerlingen gaven aan moeite te hebben gehad met het vinden van de juiste informatie op de site. Ook bleken niet alle leerlingen het woord 'Agenda' te associëren met het reserveren van meettijd. Daarnaast werd de sitemapper niet door iedere gebruiker herkend. Ze leken de aanwezigheid niet op te merken en gebruikten hem daardoor ook niet. Ook werd duidelijk dat in het ontwerp van de website en de navigatiemogelijkheden onvoldoende was ingespeeld op de wijze waarop leerlingen gewend zijn met internetpagina's om te gaan. De aanbevolen weg door de site werd te vrijblijvend gepresenteerd en was, noch qua opmaak, noch qua inhoud, genoeg herkenbaar. De tekst op de pagina's moest tot en met de laatste regel gelezen worden om de link naar de volgende aanbevolen pagina te vinden. Deze link was qua opmaak niet te onderscheiden van de overige tekst, maar dus ook niet van andersoortige links die verwezen naar pagina's met extra informatie. Deze onzichtbaarheid van het gewenste pad vergrootte de kans dat leerlingen de weg in de site kwijtraakten.

Dit probleem werd versterkt doordat het voor hen waarschijnlijk ook nog eens lastig was de inhoudelijke hoofdlijn in het materiaal te herkennen. Er werd weinig aandacht besteed aan het inkaderen van de inhoud. Er werd geen overzicht gegeven van welke onderwerpen waar behandeld werden (of zouden gaan worden) en er werd niet geëxpliciteerd wat de relevantie en samenhang met de rest van het materiaal was. Meer algemeen geformuleerd zou in het ontwerp de rode draad duidelijk herkenbaar moeten worden gemaakt, zowel in de inhoud als bij de navigatie door de site.

### **Werkwijze: interactie/openheid**

Gedurende de uitvoering van het experiment en ook in de gesprekken na afloop wekten de Masterclassleerlingen de indruk het leuk te hebben gevonden het experiment te doen. Ze werkten enthousiast, stelden vragen en waren gemotiveerd om op de verwachte waarde voor de lichtsnelheid uit te komen. In de enquête werd gevraagd of ze het eens waren met de stelling 'ik vond het leuk om dit experiment te doen'. De meeste leerlingen gaven hierop een positief antwoord. Slechts één leerling gaf aan dat hij het helemaal niet leuk had gevonden. De Woudschotendocenten gaven aan dat de site wel wat levendiger had mogen zijn. Er zou meer interactie ingebouwd moeten worden en de leerlingen zouden feedback moeten krijgen tijdens het doorlopen van de site.

Daarnaast gaven deze docenten aan dat het experiment minder gesloten zou moeten zijn om de leerlingen meer uit te dagen en de mogelijkheden te geven om onderzoek te doen in plaats van alleen maar data te verzamelen en te verwerken op een manier die al volledig op de site beschreven was. Dit werd ondersteund door een opmerking van een Masterclassleerling (in een antwoord op de vraag: had je het gevoel dat je een 'echt' experiment aan het doen was): 'Ik had het idee dat ik iets deed wat zeer veel mensen voor mij al deden'.

Tijdens de Woudschoten-discussie werd het idee geopperd de leerlingen een meer actieve rol te geven in de voorbereidingsfase. Bijvoorbeeld door niet te vertellen dat de afstand tussen bron en detector kleiner is dan een golflengte, maar hen dit met een opdracht zelf te laten uitvinden.

Ook de experts merkten op dat de interactiemogelijkheden op dit moment slechts zeer beperkt benut werden. Er waren dan wel enkele animaties toegevoegd, maar hier was geen interactie mee mogelijk. Bij 'Meetopstelling' werden wel vragen gesteld waardoor enige interactie tussen leerling en scherm gegenereerd zou kunnen worden, maar deze vragen werden daaronder in het materiaal direct beantwoord. Hierdoor werden de leerlingen te weinig geactiveerd om eerst zelf over het antwoord na te denken. Daarnaast waren nergens in het materiaal controlemomenten ingebouwd, zodat de leerlingen niet goed konden weten of ze nog steeds alles goed begrepen hadden. Dit gaf vooral problemen toen de leerlingen de data wilden gaan verwerken. Het bestuderen van de meetmethode en het verwerken van de data waren gescheiden onderdelen en werden achtereenvolgens afgewerkt. De leerlingen ontdekten pas bij het daadwerkelijk verwerken van de data dat ze de meetmethode toch nog niet helemaal begrepen hadden. Er ontbrak dus interactie die de leerling zou kunnen sturen en controleren bij het bestuderen van het materiaal en het ontbrak aan mogelijkheden om zelf de meetmethode te ontwikkelen.

## Hoofdstuk 2

Over de vraag in hoeverre dit afstandsexperiment afweek van een conventioneel experiment varieerden de meningen. De helft van de leerlingen had het gevoel een echt experiment te hebben uitgevoerd. Ze ondersteunden dit met argumenten als:

- Je kan de meetopstelling zelf zien en je kon alles zelf regelen
- Via de webcam kon je het karretje zien bewegen en dat gaf wel een gevoel van "echtheid"
- Je hebt de gegevens echt ergens uitgehaald (internet)

De andere helft van de leerlingen was minder positief:

- Je hebt geen overzicht
- Ik vind het prettiger (en leuker) om alles met de hand te doen, dan weet je wat je doet
- Het leek alsof er een programma bezig was
- Het ging langzaam en ik had niet het idee dat ik de proef deed

Niet alle leerlingen hadden trouwens een duidelijk positieve of negatieve mening, één leerling antwoordde: "Het zal wel kloppen, wat maakt het uit of het echt is?"

Ten slotte bracht het observeren van de Masterclass-leerlingen nog aan het licht dat het, naast de statusinformatie via de indicator op de website ('klaar om te meten' of 'bezig met verplaatsen'), belangrijk was dat veranderingen in de opstelling ook werkelijk (en snel) via de webcam zichtbaar werden. Als het te lang duurde werden de leerlingen ongeduldig of vroegen ze zich af of de opstelling wellicht kapot was.

### 2.3.4 Conclusie product 1

De vraag die beantwoord moest worden was of het gelukt was een 'werkend' experiment op te zetten dat technisch functioneerde, door leerlingen uitvoerbaar en voor leerlingen begrijpelijk was. Het onderzoek moest naar voren brengen welke onderdelen een positief of negatief effect op de uitvoerbaarheid en begrijpelijkheid hadden en welke ingrediënten hierbij belangrijk waren.

Het experiment functioneerde technisch naar behoren. De meetopstelling was goed bestuurbaar, de leerlingen ondervonden geen problemen bij het meten en hadden er plezier in de opstelling te besturen. Belangrijk hiervoor bleek wel te zijn dat de opstelling snel zichtbaar op een instructie reageerde. Technische elementen die zeker gehandhaafd zouden moeten worden zijn de bestuurbare camera, het meettijd-reserveersysteem en de statusindicator die aangeeft waar de opstelling mee bezig is. De onderzoeksactiviteiten maakten ook duidelijk dat er, wat de uitvoerbaarheid en begrijpelijkheid betreft, nog wel de nodige problemen opgelost moesten worden. Deze kunnen gebundeld worden tot drie hoofdproblemen die om een oplossing of verbetering vragen: problemen als gevolg van inhoudelijke knelpunten, problemen met de werkwijze en problemen als gevolg van een ondoorzichtige opzet.

### *I. Inhoudelijke knelpunten:*

Het onderzoek bracht vijf concrete inhoudelijke knelpunten aan het licht.

Ten aanzien van het bepalen van de lichtsnelheid in lucht:

- Het onderwerp 'moduleren' zorgde voor inhoudelijke problemen. Er werd nog niet goed helder waar precies het probleem van de leerlingen zit.
- Het niet kunnen volstaan (als gevolg van de systematische fout) met het meten bij één afstand bleek een inhoudelijk knelpunt. Het werd naar de leerlingen niet duidelijk gemaakt waarom het faseverschil als functie van de afstand moest worden gemeten waardoor deze handeling voor hen waarschijnlijk uit de lucht kwam vallen.
- Het faseverschil werd uitgedrukt tussen 0 en 360°. Dit is verwarrend voor leerlingen aangezien zij gewend zijn dat deze tussen 0 en 1 kan variëren.

Ten aanzien van het bepalen van de brekingsindex van de verschillende media:

- De introductie van het voor leerlingen nieuwe begrip 'optisch weglengteverschil' leek niet bij te dragen aan het begrijpen van de meetmethode.
- Het koppelen van de meetmethode aan een specifiek medium zou verwarrend kunnen zijn omdat het zorgt voor een complexe navigatiestructuur. Bovendien werkt het geven van drie verschillende meetmethoden waarschijnlijk ook verwarrend.

Naast deze inhoudelijke knelpunten kwamen ook enkele meer algemene op de inhoud betrekking hebbende aspecten naar voren die verbeterd zouden moeten worden:

- De voorkennis werd niet opgeroepen en aan de nieuwe theorie gerelateerd.
- De theorie werd enkele malen op inconsistente wijze gepresenteerd en symbolen werden inconsistent gebruikt.
- Er werd te weinig aandacht besteed aan het verantwoorden van de meetopstelling, de meetmethode en het experiment als geheel.

### *II Werkwijze*

Het tweede hoofdprobleem had betrekking op de werkwijze en in het bijzonder op de manier waarop de leerlingen in de voorbereiding op het experiment gestuurd werden in het bestuderen van theorie en meetmethode.

De leerlingen werden geïnstrueerd aan de hand van een receptmatig opgebouwde tekst, die vooral beschreef wat er moest gebeuren en weinig aandacht besteedde aan het waarom van deze handelingen. Ook waren er geen faciliteiten ingebouwd om te controleren of de leerlingen begrepen waar ze mee bezig waren. Dit zorgde ervoor dat de leerlingen tamelijk probleemloos en zelfstandig het materiaal leken te doorlopen en in staat waren de juiste metingen uit te voeren door simpelweg

de instructies te volgen. Bij de dataverwerking bleek echter dat ze eigenlijk niet goed begrepen hadden waar ze mee bezig waren geweest.

### *III Opzet*

Het derde hoofdprobleem had betrekking op de ondoorzichtige opzet van het materiaal, die ervoor zorgde dat de leerlingen gemakkelijk verdwaalden in de site en moeite hadden de juiste informatie te vinden. In het ontwerp bleek de sitemapper niet voldoende herkenbaar en bruikbaar voor leerlingen. Niet iedereen merkte de knop (zie de beschrijving bij figuur 2-5) op. En degenen die de knop wel herkenden hadden er niet veel steun aan. Het was slechts een statisch plaatje waar niet op zichtbaar werd welke delen van de site reeds afgewerkt waren. Daarnaast was de structuur van de site zelf te ingewikkeld. Verder bleek dat niet alle leerlingen bij het woord 'Agenda' begrepen dat daar meettijd gereserveerd kon worden.

## **2.4 Product 2 – Beschrijving**

### **2.4.1 Inleiding**

De ervaringen met product 1 lieten zien dat het uitgewerkte experiment op afstand zeker potentie had om geschikt, bruikbaar en leerzaam lesmateriaal te worden, maar dat hiervoor verder ontwikkelingsonderzoek noodzakelijk was. Want, al werkte het technisch al zeer behoorlijk, er was zeker nog verbetering nodig (en mogelijk) ten aanzien van de inhoud, werkwijze en opzet.

Voorafgaand aan een nieuwe gedegen ontwerpfasen werd eerst nog, met behulp van een al bestaand product (vanaf hier: product 2), geprobeerd wat beter zicht te krijgen op de eisen en aanbevelingen voor een experiment op afstand. Er werd gebruik gemaakt van een handleiding bij vrijwel dezelfde, weliswaar conventionele, opstelling. Het experiment was ontwikkeld voor dezelfde doelgroep in het kader van het bovenbouwpracticum (hierna: BBP). Ook de omstandigheden waarin beide experimenten uitgevoerd moesten worden vertoonden parallellen. In beide gevallen ging het om leerlingen uit 5 of 6 VWO die een middag de beschikking kregen over een (al opgebouwde) opstelling die normaal gesproken niet op school aanwezig is met daarbij een speciaal voor hen geschreven handleiding.

De producten 1 en 2 overlapt dus wat betreft het onderwerp, opstelling en omstandigheden van het experiment, maar verschilt in hoe dit concreet in de handleidingen was uitgewerkt. Omdat de verschillen betrekking hadden op de inhoud en de werkwijze voor de leerlingen was de verwachting dat het onderzoeken van de

ervaringen met product 2 extra kennis zou kunnen opleveren ten aanzien van twee van de drie bij product 1 geconstateerde hoofdproblemen (inhoud en de werkwijze). Daarbij moet wel worden aangetekend dat de handleiding bij het experiment van het BBP was ontwikkeld voor een situatie met ingebouwde docent-leerling-interactie. De belangrijkste verschillen tussen product 2 en 1 met betrekking tot de inhoudelijke knelpunten waren:

- Het begrip ‘optisch weglengteverschil’ werd niet meer gebruikt om de meetmethode uit te werken.
- Er werd maar één meetmethode voor het bepalen van de brekingsindex in een medium uitgewerkt en deze was niet meer gekoppeld aan een specifiek medium.
- Het probleem van de te korte afstand tussen bron en detector moeten leerlingen zelf opmerken naar aanleiding van een vraag. De oplossing wordt gegeven zonder daarbij het woord moduleren te gebruiken.

Ook de werkwijze van product 2 verschilde van die van product 1. De leerlingen waren niet meer, zoals bij product 1, alleen bezig met het lezen van teksten op de website. Bij product 2 werd van hen verwacht dat ze de meetmethode zelf door vragen te beantwoorden zouden gaan ontdekken. Product 1 werd gemaakt door, op dat moment vooral technisch georiënteerde, onderzoekers van de werkgroep Fysische Informatica. Het schrijfproces van product 1 werd gekenmerkt door intuïtief ontwerpen met nadruk op het afleveren van een eerste werkend prototype. Het was dan ook niet onwaarschijnlijk dat het meer didactisch doordachte ontwerp van product 2 een aantal van de inhoudelijke knelpunten van product 1 zou kunnen verhelpen. Bovendien bood het reeds beschikbaar zijn van het product de gelegenheid om met betrekkelijk weinig inspanning extra informatie te verzamelen. Doel van het onderzoek aan product 2 was om (binnen de eerste cyclus van het ontwikkelingsonderzoek) het zicht op de al geconstateerde inhoudelijke knelpunten en problemen met de werkwijze te verscherpen. De onderzoeksvraag luidde:

*Zijn de bij product 1 geconstateerde inhoudelijke knelpunten en problemen met de werkwijze opgelost in product 2?*

## 2.4.2 Opzet en Navigatie

Product 2 was, net als product 1, vormgegeven als website<sup>8</sup>. De toegang tot de opstelling werd verkregen via dezelfde Meetsite als bij product 1 maar op de Experimentsite waren de onderdelen ‘Meetopstelling’, ‘Theorie’ en ‘Meetmethode’ vervangen door de pdf-handleiding van het lichtsnelheidsexperiment uit het BBP. Verder bevatte de Experimentsite enkele foto’s van de meetopstelling, de uitleg over

8 [http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsite/index\\_new.htm](http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsite/index_new.htm)



de dataverwerking in Excel en toegang tot faciliteiten om de data te downloaden en meettijd te reserveren. De BBP-handleiding bestond uit de onderdelen Inleiding, Meetopstelling, Onderzoeksvragen en Werkplan, Meetmethode, Experimenteel onderzoek, Theorie en Rapportage.

De opbouw van het materiaal verschilde. Er werd niet meer gesproken over subexperimenten. De leerlingen verdiepten zich eerst in het meten van de lichtsnelheid in lucht en gebruikten deze kennis om vervolgens aan de hand van slechts één methode de lichtsnelheid in andere media te bepalen. Waar product 1 uitgebreid aandacht besteedde aan het beschrijven van de opstelling, de achterliggende theorie en de meetmethode was in product 2 deze informatie teruggebracht tot een document van ongeveer drie pagina's uitleg en twee pagina's met vragen. De navigatie van product 2 hoeft gezien deze eenvoudige opzet dan ook niet verder toegelicht te worden. Analooq aan de situatie in een conventioneel practicum werkten de leerlingen een document door dat hen stuurde in het uitvoeren van het experiment. De enige mogelijke afwijking van de conventionele situatie was dat dit document digitaal werd aangeboden.

### 2.4.3 Werkwijze

Een belangrijk verschil met betrekking tot de werkwijze was dat de leerlingen bij product 2 een actieve rol speelden bij het ontwikkelen van de meetmethode. Ze waren niet, zoals bij product 1, alleen bezig met het lezen van de achtergronden maar maakten zich de meetmethode eigen door stap voor stap vragen te beantwoorden. Omdat het materiaal was ontworpen voor een situatie waarin de docent aanwezig was om in te springen en te controleren of de leerlingen nog op de juiste weg waren, was het eigenlijk niet geschikt om volledig zelfstandig door leerlingen te laten uitvoeren. Er werden bijvoorbeeld geen antwoorden gegeven op de vragen, waardoor de kans dat de leerlingen vastliepen wat groter was geworden.

### 2.4.4 Inhoud

#### Inleiding

De inleiding startte met het oproepen van de relevante voorkennis wat betreft faseverschil en golflengte door leerlingen de relaties tussen faseverschil, golflengte en afstand tussen bron en detector te laten afleiden om aansluitend tot een relatie tussen lichtsnelheid, afstand tussen bron en detector, faseverschil en frequentie te komen. Vervolgens werd geprobeerd de leerlingen ervan bewust te maken dat de afstand tussen bron en detector veel groter is dan de golflengte van het gebruikte licht en dat dit voor problemen zorgde. Anders dan bij product 1 werd ook aandacht besteed aan de algemene structuur van

een experimenteel onderzoek door aan het einde van de inleiding vooruit te wijzen naar de rest van het experiment en aan te geven hoe hierbij gewerkt zal gaan worden aan onderzoeksvraag, werkplan en meetmethode.

### Meetopstelling

Om aan te sluiten bij de handleiding in het bovenbouwpracticum waren de beschikbare cuvetten met media in de meetopstelling dezelfde als in de conventionele opstelling van het bovenbouwpracticum: perspex, water en lucht.

Voortbordurend op het geconstateerde probleem met de te kleine golflengte moesten de leerlingen vervolgens aantonen dat het laten oscilleren van het signaal met een frequentie van 50 MHz het probleem zou oplossen. Het onderdeel 'Meetopstelling' werd vervolgd met een vraag waarbij de leerlingen zelf moesten uitleggen waarom het signaal dat zich ook door het medium moet verplaatsen later aankomt dan een signaal dat zich alleen door lucht verplaatst. De leerlingen werden ten slotte gevraagd de relatie af te leiden voor het extra faseverschil als gevolg van het tussenplaatsen van een medium en aan te geven hoe hiermee de lichtsnelheid in een medium te bepalen was. De leerlingen moesten hiervoor zelf uitwerken dat het tussenplaatsen van het medium zorgt voor een extra faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  (bovenop het voor lucht gemeten faseverschil), wat leidt tot een verticaal verschoven lijn in het  $\Delta\varphi, \Delta x$ -diagram (zie figuur 2-3). Vervolgens zouden ze zelf moeten begrijpen dat dit extra faseverschil bepaald kan worden door het faseverschil te meten zonder en met medium tussen bron en detector:  $\Delta\varphi_{\text{extra}} = \Delta\varphi_{\text{medium+lucht}} - \Delta\varphi_{\text{lucht}}$ .

Wanneer er alleen lucht tussen bron en detector aanwezig is, wordt het faseverschil gegeven door  $\Delta\varphi_{\text{lucht}} = \Delta x \cdot f_{\text{mod}} / c$ . Wanneer er een medium tussen bron en detector aanwezig is, verplaatst het licht zich door het medium met snelheid  $c_m$  en door het overige deel van de afstand tussen bron en detector met snelheid  $c$ . Dit levert het volgende faseverschil:  $\Delta\varphi_{\text{medium+lucht}} = (\Delta x - L) \cdot f_{\text{mod}} / c + L \cdot f_{\text{mod}} / c_m$ . Uit het gemeten extra faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  (voor minstens één maar bij voorkeur een aantal waarden van  $\Delta x$ ) en de gegeven waarde van  $L$  (0,35 m) is dan de lichtsnelheid  $c_m$  in het medium te bepalen:  $\Delta\varphi_{\text{extra}} = \Delta\varphi_{\text{medium+lucht}} - \Delta\varphi_{\text{lucht}} = (\Delta x - L) \cdot f_{\text{mod}} / c + L \cdot f_{\text{mod}} / c_m - \Delta x \cdot f_{\text{mod}} / c = (L / c_m - L / c) \cdot f_{\text{mod}}$ .

De met lucht gevulde cuvet kan ten slotte gebruikt worden om de metingen te corrigeren voor de dikte van de glasplaatjes waarmee de cuvetten aan de kopse kanten afgesloten zijn. Het begrip 'optisch weglengteverschil' werd dus niet meer gebruikt in product 2 en er was ook geen sprake meer van verschillende meetmethoden gekoppeld aan specifieke media.

### Theorie

Bij het onderdeel theorie werd ingegaan op het begrip breking. Dit werd gedefinieerd

als de verhouding tussen de lichtsnelheid in lucht en een ander medium. Om aan te sluiten bij de al bestaande voorkennis ten aanzien van breking werd hier ook de wet van Snellius genoemd en vervolgens de tot dan toe nog onbekende relatie  $n = c/c_m$  gegeven.

## 2.5 Product 2 – Onderzoeksactiviteiten

### 2.5.1 Inleiding

Met het onderzoek aan product 2 werden de mogelijkheden en problemen van het experiment op afstand verder verkend. Het onderzoek aan product 1 maakte duidelijk dat voor het beantwoorden van de globale onderzoeksvraag (Hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?) het inhoudelijk goed functionerend krijgen van een experiment de meeste aandacht zou vergen. Het opzetten van een technisch functionerend experiment leek bij product 1 al aardig gelukt, maar wat betreft het tweede deel van de onderzoeksvraag werden drie probleemgebieden geïdentificeerd die betrekking hadden op de inhoudelijke knelpunten, de opzet en de werkwijze van het lichtsnelheidsexperiment. Met het onderzoek aan product 2 werden twee van deze probleemgebieden verder verkend: inhoudelijke knelpunten en werkwijze. Product 2 had een sterk vereenvoudigde opzet ten opzichte van product 1 en bestond alleen nog maar uit een webpagina met daarop links naar de meetopstelling en naar een pdf-document met de opdrachten en uitleg.

### 2.5.2 Onderzoeksmethode

Het onderzoek aan product 2 werd opgezet als een inventariserend en verkennend onderzoek. De dataverzameling werd gedaan door leerlingen het experiment te laten uitvoeren en hen hierover na afloop te interviewen aan de hand van een vooraf opgesteld interviewschema. In het interview werden de leerlingen gevraagd hoe ze zich hadden voorbereid, welke problemen ze tegen waren gekomen en wat ze van het experiment vonden. Daarnaast werden de aantekeningen en resultaten van de leerlingen bestudeerd. De verwachting was dat het in kaart brengen van de ervaringen van de leerlingen voldoende relevante onderzoeksdata zou opleveren om de eerder geconstateerde problemen verder te verkennen en de onderzoeksvraag te beantwoorden. Vanwege het verkennende karakter van het onderzoek werd het slechts met een klein aantal leerlingen uitgevoerd. De verwachting was dat de ervaringen van deze kleine groep toch voldoende globaal zicht op de problemen zouden bieden. Het

experiment werd uitgevoerd door zes koppels leerlingen van twee verschillende scholen (een gymnasium en een scholengemeenschap voor Atheneum, HAVO en VMBO) (drie koppels 5V, drie koppels 6V, allen natuurkunde NT).

Om pragmatische redenen voerden alle koppels het experiment uit in een reguliere onderwijscontext. Drie koppels waren deelnemers aan het bovenbouwpracticum en voerden het experiment uit als praktische opdracht. De overige drie koppels voerden het experiment uit als praktisch schoolexamen. Vier koppels hebben de metingen op afstand uitgevoerd. Twee koppels bezochten in de periode waarin het onderzoek aan product 2 werd uitgevoerd het bovenbouwpracticum om het lichtsnelheidsexperiment aan tafel uit te voeren. Omdat het onderzoek aan product 2 zich richtte op de inhoudelijke aspecten was de verwachting dat ook hun ervaringen relevante informatie zouden opleveren.

### 2.5.3 Resultaten

#### Inhoud

De inhoudelijke knelpunten die uit product 1 naar voren kwamen waren:

- problemen met het begrip optisch weglengteverschil
- de koppeling van de meetmethoden aan verschillende media
- het moduleren
- het niet kunnen volstaan met het meten bij één afstand.
- het meten van faseverschilhoek (tussen 0 en 360 graden)

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden moesten de ervaringen met deze onderwerpen in product 2 in kaart gebracht worden. De eerste twee knelpunten uit product 1 waren bij product 2 niet meer aanwezig omdat het begrip optisch weglengteverschil niet meer werd geïntroduceerd om de meetmethode uit te werken. Ook werd niet gesuggereerd dat de meetmethode voor de brekingsindex in andere media op verschillende manieren moest worden uitgewerkt. Van de verwarring die dit veroorzaakte bij product 1 is dan ook geen sprake meer. Toch waren niet alle problemen hiermee opgelost. Het begrijpen van de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media bleek ook in het tweede product lastig voor de leerlingen. Eén koppel vond het moeilijk dat niet de gehele ruimte tussen bron en detector opgevuld werd met het medium:

- We hadden er geen rekening mee gehouden dat het perspex maar 35 cm zou zijn en dat de rest lucht is. We dachten dat het helemaal perspex zou zijn.

Twee leerlingen gaven expliciet aan dat de handleiding meer aandacht had moeten besteden aan de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media:

- Er had in de handleiding meer aandacht besteed moeten worden aan dat extra faseverschil. We

## Hoofdstuk 2

snapt niet welke berekening we nu moesten gaan doen om ook echt tot de lichtsnelheid te komen in het andere medium.

Verder hadden de leerlingen moeite te begrijpen wat er met het extra faseverschil bedoeld werd en vooral ook hoe dit gebruikt kon worden om de brekingsindex in andere media te bepalen. Een meerderheid van de leerlingen gaf aan dit lastig te hebben gevonden en het niet zonder hulp te hebben kunnen doen.

Het derde knelpunt, het begrijpen van het moduleren, bleek ook in product 2 voor problemen te zorgen. Vier leerlingen hadden moeite in te zien dat je in de berekeningen de frequentie van het oscillerende signaal moet gebruiken in plaats van de frequentie van licht.

Wat betreft het vierde knelpunt begrepen de leerlingen ook bij product 2 niet goed dat ze niet konden volstaan met het meten bij één afstand. Ze zagen niet in dat, omdat bij een afstand van nul tussen bron en detector het faseverschil niet nul bleek, ze genoodzaakt waren tot het meten van de  $\Delta\varphi, \Delta x$ -relatie. Er was overigens bij het ontwerp van het BBP-materiaal bewust voor gekozen de docent op dit punt in het materiaal een controlerende en ondersteunende rol te laten spelen. Het is dan ook niet verwonderlijk dat het ontbreken van de docent een negatief effect heeft op de voortgang van de leerlingen in de afstandssituatie.

Vier koppels gaven in het interview aan dat ze dit eerst lastig vonden, maar het uiteindelijk (na extra uitleg) wel hadden begrepen. Ze gaven ook aan dat ze het gevoel hadden dat ze dit niet zelf hadden kunnen afleiden, bijvoorbeeld:

- Peter (de docent) heeft even geholpen met die hele formule omschrijven, want daar waren we echt noooit opgekomen. En dan moest je met de grafische rekenmachine allemaal waarden invullen en dan kwam er uiteindelijk ook een formule uit en dat was getal a ( $y=ax+b$ ) en die kon je dan weer saven. We snappen het nu wel, maar ja, zelf zou je dit nu net niet bedenken.

Het vijfde knelpunt van product 1 bleek ook in het materiaal van product 2 voor (weliswaar kleine) onduidelijkheid te zorgen. Er werd evenals bij product 1 gewerkt met de gereduceerde faseverschilhoek in plaats van het gereduceerde faseverschil. Twee leerlingen gaven expliciet aan dat ze waren vergeten te delen door 360 om de faseverschilhoek naar faseverschil om te schrijven.

Het al dan niet op afstand uitvoeren van het experiment leek, zoals verwacht, geen invloed te hebben op mogelijke problemen met de inhoud. De leerlingen die het experiment aan tafel uitvoerden liepen tegen dezelfde inhoudelijke problemen op als de leerlingen die het experiment op afstand uitvoerden. Dit is geheel volgens de verwachting, aangezien de leerlingen in beide gevallen met hetzelfde inhoudelijk materiaal werkten en ook op dezelfde wijze begeleid werden.

### **Werkwijze**

De werkwijze van product 2 verschilde sterk van die van product 1. De leerlingen

waren, zoals verwacht, op een actieve manier met het experiment bezig. Ze beantwoordden vragen en werkten zo stap voor stap zelf toe naar het bepalen van de lichtsnelheid in lucht en de brekingsindex in verschillende media.

De werkwijze met vragen vereiste echter wel interactie tussen leerlingen en docent, die zonnodig de leerlingen van feedback kon voorzien. Bovendien was er één moment van opgelegde interactie nadat de leerlingen de onderzoeksvraag hadden opgesteld. Deze onderzoeksvragen werden, voordat de leerlingen het werkelijke experiment konden gaan uitvoeren eerst door de docent nagekeken. De onderzoeksvragen van twee koppels moesten gecorrigeerd worden. Het ene koppel had geen hypothese geformuleerd en het andere koppel had de vraag te ingewikkeld gemaakt (en wilde niet alleen het verschil in lichtsnelheid waarnemen maar ook verklaren).

De gewijzigde werkwijze leek er voor te zorgen dat de leerlingen niet meer het gevoel hadden dat het experiment maar ‘een simpele proef’ was zoals dat wel bij product 1 geconstateerd werd. Leerlingen gaven nu zelfs aan dat een goede voorbereiding noodzakelijk was voor het succesvol uitvoeren van dit experiment. Twee leerlingen die zich beperkt hadden tot het slechts even doorlezen van de handleiding gaven aan dat ze door deze beperkte voorbereiding moeite hadden het experiment te begrijpen. Hun intuïtie over de werkwijze bleek niet juist. Op de vraag hoe zij zich hadden voorbereid antwoordden ze:

- Handleiding doorgekeken vantevoren. We hadden het heel simpel bekeken: je weet de afstand en je weet de tijd die het licht erover doet en dan weet je dus de snelheid. Maar (haha) je hebt de tijd helemaal niet. Aan faseverschil hadden we helemaal niet gedacht.

Later in het interview geven ze op de vraag wat ze geleerd hebben van het experiment nog twee keer aan dat ze meer tijd aan de voorbereiding hadden moeten besteden. Dat een goede voorbereiding essentieel was voor het succesvol afronden van het experiment werd ook bevestigd door twee andere leerlingen die het experiment juist wel goed voorbereid hadden. Zij antwoordden op de vraag of ze terugkijkend op het experiment meer tijd aan de voorbereiding hadden moeten besteden:

- Nee, we hadden het echt goed voorbereid en dat was maar goed ook. Dan was de proef wel gelukt, maar dan hadden we bij het verwerken van de data een probleem gehad. Zo van: hoe gaan we dit uitwerken?

## 2.5.4 Conclusie product 2

Doel van het onderzoek aan product 2 was de eisen aan het lichtsnelheidsexperiment verder te verkennen door na te gaan in hoeverre de bij product 1 geconstateerde inhoudelijke knelpunten en problemen met de werkwijze opgelost werden door product 2. Het onderzoek was opgezet als een oriënterend en verkennend onderzoek en de onderzoeksmethode staat niet toe om harde conclusies te trekken. Toch kunnen er

wel enkele voorzichtige conclusies ten aanzien van de problemen met de inhoud getrokken worden.

De oplossing voor de problemen met de (te korte) golflengte bleef, ook zonder het gebruik van de term ‘moduleren’ een struikelblok. De leerlingen begrepen bijvoorbeeld niet dat de modulatiefrequentie gebruikt moest worden in de formule. Het niet meer introduceren van het begrip ‘optisch weglengteverschil’ en het niet meer presenteren van drie meetmethoden gekoppeld aan een specifiek medium leken voor verbetering te hebben gezorgd. Toch hielden de leerlingen moeite om de lichtsnelheid in andere media te bepalen en ze kwamen hier zonder hulp van de docent niet uit. Ze vonden het vooral lastig om in te zien wat het extra faseverschil was en hoe dit gebruikt kon worden. Ook het niet geheel met medium opgevuld zijn van de ruimte tussen bron en detector verwarde hen.

Bij product 1 was ook als inhoudelijk knelpunt geconstateerd dat niet kon worden volstaan met het meten bij één afstand. Bij het ontwerp van het BBP-materiaal was geanticipeerd op mogelijke problemen ten aanzien van dit onderdeel door hier docent-leerling-interactie te laten plaatsvinden. Hier kon echter in de onderzoekssituatie van product 2 geen sprake van zijn en het is dan ook niet verwonderlijk dat ook de leerlingen van het onderzoek aan product 2 het lastig vonden om in te zien waarom het nodig was om de  $\Delta\varphi, \Delta x$ -relatie te meten. De inhoudelijke knelpunten waren met product 2 dus nog steeds niet opgelost, maar het onderzoek gaf wel wat meer aanwijzingen over wat de leerlingen lastig vonden.

Wat betreft het hoofdprobleem met betrekking tot de werkwijze was wel een duidelijke verbetering zichtbaar. De vraaggestuurde en verbeterde inhoudelijke opbouw van product 2 zorgde ervoor dat de leerlingen met een actieve houding aan het materiaal werkten en dat zij de complexiteit van de meetmethode beter zagen. Het leek erop dat het leerlingen vraaggestuurd zelf tegen problemen aan laten lopen tot betere resultaten leidde. Gevolg was echter wel dat de leerlingen weliswaar actiever, maar niet geheel zelfstandig te werk konden gaan omdat ze op enkele momenten feedback van de docent nodig hadden.

## 2.6 Conclusie

Wat heeft nu het onderzoek in de eerste cyclus opgeleverd? Doel van de eerste cyclus was zicht te krijgen op de technische en didactische mogelijkheden en problemen. Hiertoe werd achtereenvolgens ervaring opgedaan met twee versies van het experiment. Het onderzoek aan de eerste intuïtief ontwikkelde versie, product 1, maakte duidelijk dat het experiment technisch behoorlijk functioneerde en dat

de meetopstelling goed op afstand bestuurbaar kon worden gemaakt. Wat betreft de didactische kant van het experiment kwamen echter enkele problemen aan het licht. Deze hadden betrekking op inhoudelijke knelpunten, de werkwijze en de opzet. De inhoudelijke knelpunten belemmerden de voortgang door het materiaal en bovendien leken de leerlingen soms niet goed te weten waar ze mee bezig waren en waarom.

Ook werden problemen geconstateerd met de wijze waarop de leerlingen door het materiaal moesten gaan. De leerlingen waren alleen maar bezig met het lezen van de theorie en meetmethode zonder dat er verder sprake was van interactie tussen materiaal en de leerlingen. De kennis van de leerlingen werd voor het eerst getoetst bij het verwerken van de meetgegevens en vaak werd toen pas duidelijk dat ze het voorgaande eigenlijk niet goed begrepen hadden. Hier kwam bij dat de opzet van het materiaal voor extra verwarring bleek te zorgen. De leerlingen verdwaalden in de site, zagen door de bomen het bos niet meer en hadden moeite de rode draad te vinden.

Met het onderzoek aan product 2 werd geprobeerd verder in te zoomen op de problemen met inhoud en werkwijze. De inhoudelijke problemen leken in product 2 verminderd. Toch zorgden twee van de in product 1 geconstateerde knelpunten ook in product 2 nog steeds voor problemen: de leerlingen hadden moeite met het begrijpen van het oprekken van de golfengete (moduleren in product 1) en ook het moeten meten bij meerdere afstanden tussen bron en detector zorgde opnieuw voor problemen. Bovendien bleek dat ook het bepalen van de lichtsnelheid in andere media lastig voor hen was.

De werkwijze aan de hand van vragen zorgde er wel voor dat de leerlingen het materiaal met een actievere houding bestudeerden, maar bracht de zelfstandige uitvoerbaarheid in het geding. Deze werkwijze vereiste namelijk wel leerling-docent interactie om ervoor te zorgen dat leerlingen bleven begrijpen waar ze mee bezig waren. Het materiaal van product 2 was geschreven voor een situatie waarin een docent gedurende de uitvoering aanwezig is, de leerlingen kan sturen en feedback geven en kan inspringen en anticiperen op de ontstane knelpunten. Aangezien ons streven was een experiment op afstand te ontwikkelen dat volledig zelfstandig door de leerlingen zou kunnen worden uitgevoerd, zouden deze knelpunten op het gebied van inhoud en werkwijze in de volgende ronde van het ontwikkelingsonderzoek moeten worden opgelost.

Er zou daarin dus gezocht moeten worden naar een manier om het materiaal zodanig uit te lijnen dat voorkomen werd dat er echte knelpunten ontstaan. De mogelijke valkuil die product 1 aan het licht bracht en vermeden moest worden was het te receptmatig opzetten van het materiaal. Leerlingen zouden dan slechts



## Hoofdstuk 2

de aanwijzingen in het recept uitvoeren zonder echt te weten waar ze mee bezig waren. De inhoudelijke knelpunten dienden dus niet gladgestreken te worden, maar moesten zodanig benaderd worden dat de leerlingen zelf een rol zouden gaan spelen bij het ontwikkelen van de meetmethode. Zij zouden zelf de problemen moeten constateren en werk verzetten om de oplossingen hiervoor te leren begrijpen.

# Het doel:

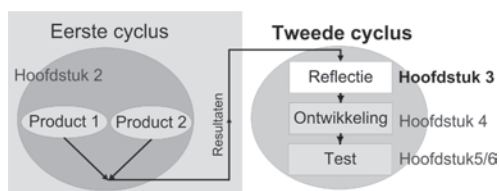
## een didactisch verantwoord experiment op afstand

# 3

<b>3.1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>Ontwerpaanbevelingen</b>	<b>58</b>
<b>3.3</b>	<b>Didactische strategie: probleemstellende benadering</b>	<b>60</b>
3.3.1	Uitgangspunten	60
3.3.2	Methodologie: expliciteren van de didactische structuur	61
3.3.3	Authentieke handelingspraktijk	65
3.3.4	Terugkoppeling aanbevelingen: waarom probleemstellend?	67
<b>3.4</b>	<b>Inhoudelijke uitlijning</b>	<b>68</b>
3.4.1	Inleiding	68
3.4.2	Handelingspraktijk experimenteel fysisus	68
3.4.3	Voorkennis en leerdoelen	70
3.4.4	Dragende en sturende elementen	71
3.4.5	Uitgewerkte didactische uitlijning	72
<b>3.5</b>	<b>Vormelementen</b>	<b>79</b>
3.5.1	Inleiding	79
3.5.2	Automatisch vragen- en feedbacksysteem	80
3.5.3	'Waar ben ik'- window	81
3.5.4	Structuur van de pagina	82
3.5.5	Animaties	83
3.5.6	Facultatieve pagina's	83
3.5.7	Webcams	84
<b>3.6</b>	<b>Onderzoeksvragen</b>	<b>84</b>
3.6.1	Inleiding	84
3.6.2	Het functioneren van het didactisch ontwerp	85
3.6.3	Het functioneren van de vormelementen	88

### 3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk werd de eerste cyclus van het ontwikkelingsonderzoek beschreven waarin de mogelijkheden en problemen van het lichtsnelheidsexperiment op afstand verkend werden. Deze verkennende cyclus legde de basis voor de tweede cyclus van het ontwikkelingsonderzoek. De geconstateerde problemen en de daaruit voortvloeiende aanbevelingen vormden namelijk de input voor de reflectiefase van de tweede cyclus die in dit hoofdstuk beschreven wordt (figuur 3-1).



**Figuur 3-1** Hoofdstuk 3 beschrijft de reflectiefase van de tweede cyclus

Hoofdstuk 3 beschrijft hoe in de tweede cyclus is gewerkt aan het ontwerpen van materiaal waarmee leerlingen volledig zelfstandig het experiment moesten kunnen uitvoeren. In tegenstelling tot de eerste cyclus, waarin vooral intuïtieve keuzes werden gemaakt, werden in de tweede cyclus de ontwerpkeuzes verantwoord door vooraf de onderliggende didactiek en de hieraan gekoppelde verwachtingen te expliciteren zodat deze vervolgens gestructureerd en navolgbaar konden worden onderzocht.

In dit hoofdstuk worden eerst in 3.2 de resultaten uit de eerste cyclus kort samengevat en verwerkt tot ontwerpaanbevelingen. Daarna wordt in 3.3 de probleemstellende benadering als theoretisch raamwerk voor het nieuwe ontwerp toegelicht om vervolgens te beschrijven hoe deze didactiek kon bijdragen aan het oplossen van de in de eerste cyclus geconstateerde problemen. In 3.4 en 3.5 wordt beschreven hoe de aanbevelingen uit de eerste cyclus concreet zijn uitgewerkt tot een ontwerp van de inhoud en de vorm van het materiaal: in 3.4 wordt de inhoudelijke uitlijning van het materiaal gegeven en in 3.5 het ontwerp van de vormelementen die de inhoudelijke uitlijning moesten ondersteunen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een vooruitblik op de onderzoeksvragen die in de laatste fase van de tweede cyclus, de testfase, beantwoord moesten gaan worden.

### 3.2 Ontwerpaanbevelingen

De eerste cyclus maakte duidelijk dat het de moeite waard was om het ontwikkelingsonderzoek aan het experiment op afstand voort te zetten. De leerlingen waren in staat de benodigde meetgegevens te verzamelen, doorliepen het materiaal, ondanks geconstateerde onvolkomenheden, zonder tegenzin (en vaak zelfs met plezier), en waardeerden het besturen van de opstelling op afstand en het werkelijk verzamelen

van de data. Bij product 1 leken de leerlingen het experiment zelfstandig succesvol uit te kunnen voeren, maar nauwkeuriger analyse liet zien dat de leerlingen niet goed wisten waar ze mee bezig waren en waarom. Bij product 2 was dat laatste minder het geval, maar daar was (geplande) docent-leerling-interactie nodig. In beide gevallen waren er dus knelpunten op het gebied van inhoud, opzet en werkwijze. Om te voorkomen dat de in de eerste cyclus geconstateerde problemen ook bij het nieuwe ontwerp zouden ontstaan, leek het verstandig de conclusies uit de eerste cyclus om te schrijven tot aanbevelingen voor de tweede cyclus. Op grond van de conclusies uit de eerste cyclus kunnen twee categorieën van aanbevelingen worden geformuleerd. De eerste categorie heeft betrekking op de inhoud:

#### *Aanbevelingen-categorie I - Inhoud*

- a. *Voorkomen van inhoudelijke knelpunten* wat betreft (de noodzaak van) het moduleren, het bepalen van  $c$  uit de  $\Delta\phi, \Delta x$ -relatie en het bepalen van  $c$  in andere media.
- b. *Zorgen dat de leerlingen steeds weten waar ze mee bezig zijn en waarom ze wat doen.*

Uit de ervaringen in de eerste cyclus volgde ook dat het belangrijk is te zorgen voor consistente theorie waarin niet meerdere betekenissen aan begrippen worden toegekend. Daarnaast zou het onnodig introduceren van nieuwe concepten moeten worden voorkomen. Deze aanbevelingen zijn echter relatief eenvoudig in het ontwerp mee te nemen en zullen daarom in dit hoofdstuk geen verdere aandacht krijgen.

De tweede categorie van aanbevelingen had betrekking op opzet en de werkwijze. De opzet en de werkwijze van het materiaal zouden moeten aansluiten op het doordachte ontwerp van de inhoud en ervoor zorgen dat de leerlingen een actieve rol krijgen bij het begrijpen van de meetmethode. De aanbevelingen met betrekking tot opzet en werkwijze luiden:

#### *Aanbevelingen-categorie II - Opzet en werkwijze*

- a. *Voorkomen van problemen met doorgronden van de structuur van de site*, door ervoor te zorgen dat de structuur helder en herkenbaar is, dat het voor de leerlingen altijd duidelijk is welk deel ze aan het bestuderen zijn en hoe ze kunnen terugbladeren zonder te verdwalen.
- b. *Inbouwen van interactie en controle-, feedback- en reflectie-faciliteiten*, die ervoor zorgen dat de leerlingen gestuurd worden en actief met het materiaal bezig zijn en geen lange stukken tekst van het scherm hoeven lezen.

Uitwerken van de aanbevelingen zou ertoe moeten leiden dat de leerlingen gemotiveerd, geboeid en volledig zelfstandig het experiment op afstand kunnen uitvoeren en op ieder moment weten wat ze aan het doen zijn en waarom. Omdat dit precies de kern van de probleemstellende benadering raakt, leek de keuze voor dit theoretisch raamwerk een verstandige strategie.

## 3.3 Didactische strategie: probleemstellende benadering

### 3.3.1 Uitgangspunten

De probleemstellende benadering bouwt voort op het constructivistische uitgangspunt dat nieuwe kennis geconstrueerd moet worden op basis van al aanwezige kennis (Ogborn, 1997). Dit moet ertoe leiden dat het onderwijs leerlingen stimuleert om verder te denken en hen aanspoort hun eigen ideeën in te zetten bij verdere kennis- of vaardighedenontwikkeling. De probleemstellende benadering concretiseert deze onderwijsvisie verder. Kortland & Klaassen (2008) beschrijven de kern van de probleemstellende benadering als:

*‘...leerlingen tijdens het onderwijsleerproces in een zodanige positie te brengen dat ze voortdurend weten waar ze mee bezig zijn en waarom. Of, met andere woorden: dat ze op inhoudelijke gronden intentioneel handelen (Klaassen, 1995) – met als achterliggend idee dat de leerlingen daardoor de leerstof beter zullen leren begrijpen.’*

Om dit voor elkaar te krijgen moet in het sturen van de leerlingen een balans gevonden worden tussen de noodzakelijke vrijheid van onderop en de even noodzakelijke begeleiding van bovenaf. Lijnse (2002) schrijft:

*‘Het houdt in dat we proberen leerlingen te (bege)leiden in een bottom-up leerproces dat begint bij een gemeenschappelijk startpunt (common ground). En dat we een onderwijstraject ontwerpen dat het leerlingen geleidelijk mogelijk maakt om juist die begrippen en vaardigheden te construeren die we hen ook willen onderwijzen.’*

Uitgangspunten bij het ontwerpen van dat onderwijstraject binnen het raamwerk van de probleemstellende didactiek zijn:

1. *Uitgaan van/aansluiten bij intuïties van leerlingen*

Er wordt ervan uitgegaan dat de intuïties van leerlingen over hun ervaringswereld grotendeels correct zijn (Klaassen, 1995) en dat er altijd een bruikbaar gemeenschappelijk startpunt te vinden zou moeten zijn voor het onderwijsleerproces.

2. *Voor leerlingen zinvolle kennisuitbreiding*

Leerlingen moeten zelf de zin zien van het uitbreiden van hun kennis voordat ze activiteiten ontplooiën om de kennis ook werkelijk uit te breiden. Eenvoudiger gezegd, de leerlingen zouden op elk moment tijdens het onderwijsleerproces moeten inzien waarom ze wat aan het doen zijn. Als dat het geval is, zal het onderwijsleerproces voor de leerlingen zinvoller zijn, en dus zal het waarschijnlijker worden dat ze dan ook nieuwe kennis zullen construeren of accommoderen op voor henzelf begrijpelijke gronden (Lijnse, 2002).

Deze uitgangspunten moeten leiden tot een onderwijsleerproces waarin leerlingen

voortdurend weten waar ze mee bezig zijn en waarom. Dit probleemstellende karakter wordt bereikt door bij start van het leerproces bij de leerlingen, aansluitend bij hun intuïties, een globaal motief op te roepen om zich te willen verdiepen in het onderwerp. Het oproepen van het globale motief moet hen zicht geven op de relevantie en de richting van het onderwijsleerproces. Vervolgens moet geprobeerd worden de kennisverwerving van de leerlingen te sturen door achtereenvolgens lokale motieven op te roepen die ervoor zorgen dat de leerlingen zelf de zin zien van het uitbreiden van hun kennis, ervaringen en overtuigingen en hierin ook de coherentie herkennen (Klaassen, 1995).

Het belang van het sturen van de leerlingen in het onderwijsleerproces is niet alleen binnen de probleemstellende benadering van belang. Ook in andere literatuur wordt bevestigd dat adequate sturing belangrijk is om verzekerd te zijn van een afdoende voorbereiding en het behalen van de gewenste leeropbrengst (Kirschner *et al.*, 2006; Mayer, 2004). Kirschner *et al.* bespreken diverse onderzoeken waarin de leerlingen in meer of mindere mate gestuurd worden en trekken op grond hiervan de conclusie dat een adequate sturing van leerlingen leidt op zijn minst dezelfde, maar voor zwakkere leerlingen zelfs tot een hogere leeropbrengst (pagina 83-84):

*After a half-century of advocacy associated with instruction using minimal guidance, it appears that there is no body of research supporting the technique. In so far as there is any evidence from controlled studies, it almost uniformly supports direct, strong instructional guidance rather than constructivist-based minimal guidance during the instruction of novice to intermediate learners. Even for students with considerable prior knowledge, strong guidance while learning is most often found to be equally effective as unguided approaches. Not only is unguided instruction normally less effective; there is also evidence that it may have negative results when students acquire misconceptions or incomplete or disorganized knowledge.*

### **3.3.2 Methodologie: expliciteren van de didactische structuur**

#### **Lesmateriaal, scenario en didactische structuur**

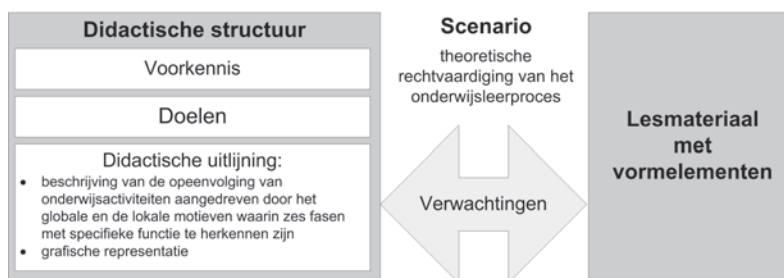
Om te verhelderen hoe de probleemstellende benadering op het ‘experiment op afstand’-onderzoek kan worden toegepast wordt eerst de methodologie van de probleemstellende benadering, waarin het expliciteren van het gewenste onderwijsleerproces centraal staat, samengevat. In de concrete invulling van de probleemstellende benadering wordt enerzijds *lesmateriaal* ontwikkeld, waarin een nagestreefde oplossing voor een bepaald didactisch probleem tot in detail is uitgewerkt; anderzijds wordt, parallel aan dit lesmateriaal, een zogenaamd *scenario* opgesteld (Klaassen, 1995; Lijnse, 2002). Het scenario geeft een beschrijving en een theoretische rechtvaardiging van het

onderwijsleerproces door te expliciteren wat de verwachtingen bij het lesmateriaal zijn en waar deze op gebaseerd zijn. Tijdens het ontwikkelen van het scenario wordt veel aandacht besteed aan het zorgvuldig doordenken van de geplande onderwijsactiviteiten en het verbinden van deze activiteiten. Dit doordenken moet antwoord geven op vragen als:

*‘Bereiden de voorgaande activiteiten, gezien vanuit de leerling, echt goed voor op de volgende, en worden de volgende activiteiten echt voldoende voorbereid door de voorafgaande?’ (Ten Voorde, 1977).*

Centraal bij de ontwikkeling van zowel het lesmateriaal als het scenario staat de zogenaamde *didactische structuur* van het materiaal. De didactische structuur geeft op hoofdlijnen een beschrijving en verantwoording van het gewenste en verwachte onderwijsleerproces (Kortland & Klaassen, 2008). In de didactische structuur worden de verwachtingen ten aanzien van de voorkennis, de gewenste leerdoelen en de belangrijkste stappen in het begripsmatige en inhoudelijk motivationele onderwijstraject samengevat. Deze hypothetische beschrijving van het beoogde en verwachte onderwijsleerproces wordt de zogenaamde *didactische uitlijning* genoemd en beschrijft ‘de sequentie van samenhangende onderwijsleeractiviteiten die moeten leiden tot het realiseren van de leerdoelen’ (Kortland & Klaassen, 2008, pp 8).

Hulpmiddelen bij het maken van de didactische uitlijning zijn de fasering van het onderwijsleerproces en de grafische representatie daarvan. In figuur 3-2 zijn de belangrijke termen die in het ontwikkelproces aan de orde komen samengevat.



**Figuur 3-2** Overzicht van centrale termen uit de probleemstellende benadering.

### Fasering

In het te doorlopen leerproces kunnen zes fasen met een specifieke didactische functie worden onderscheiden (Kortland, 2001; Lijnse & Klaassen, 2004). Deze fasering geeft een operationalisering van de uitgangspunten van de probleemstellende benadering maar kan ook dienst doen als richtinggevend hulpmiddel in het ontwerpproces. Eerdere onderzoeken (bijvoorbeeld Klaassen, 1995; Vollebregt, 1998; Kortland, 2001) hebben laten zien dat voor verschillende typen onderwijsleerprocessen de eerste vier

fasen steeds overeenkomen. De functies van de vier fasen zijn (Kortland, 2001; Lijnse & Klaassen, 2004):

*Fase 1:* oriënteren op en oproepen van een globale interesse in en een globaal motief voor het bestuderen van het betreffende onderwerp.

*Fase 2:* inperken en toespitsen van dit globale motief tot een inhoudspecifieke behoefte aan meer kennis.

*Fase 3:* uitbreiden van de bestaande kennis van de leerlingen, in het licht van het globale motief en de specifiekere geformuleerde kennisbehoefte.

*Fase 4:* toepassen van de nieuwe kennis in situaties waarvoor de kennisuitbreiding bedoeld was.

De fasen 5 en 6 zijn bij alle genoemde onderzoeken gericht op respectievelijk reflectie en metacognitie, maar de precieze formulering hangt af van het onderwerp en type leerproces (bijvoorbeeld uitwerken van een abstract begrip of meer gericht op ontwikkelen van vaardigheden). In bijvoorbeeld het onderzoek van Kortland, dat gericht is op het ontwikkelen van besluitvormingsvaardigheden, zijn de laatste twee fasen gericht op vaardighedenontwikkeling:

*Fase 5:* in het licht van het globale motief creëren van een behoefte aan reflectie op het kunnen hanteren van de betreffende vaardigheid.

*Fase 6:* ontwikkelen van een (mogelijk nog gecontextualiseerd) metacognitief instrument voor het op een hoger niveau kunnen uitvoeren van de vaardigheid.

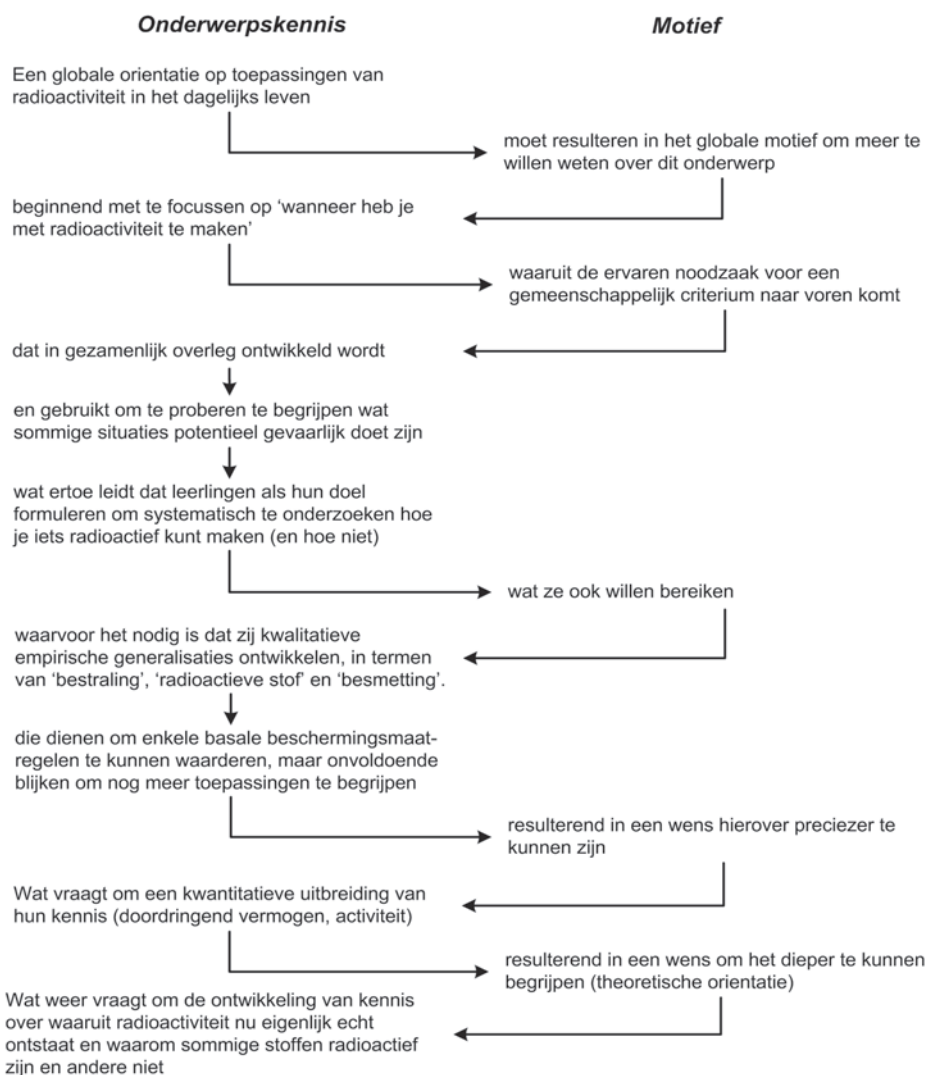
### **Grafische representatie**

In de probleemstellende didactiek wordt met de ‘didactische uitlijning’ vaak een grafische representatie bedoeld. De representatie visualiseert het onderwijsleerproces in de vorm van één doorlopende zin waarin de fasering, het globale motief en de lokale motieven herkenbaar zijn. De grafische representatie bestaat, afhankelijk van de precieze invulling, uit twee of drie kolommen.

Figuur 3-3 geeft een voorbeeld van een uitlijning over radioactiviteit (Klaassen, 1995) die uit twee kolommen bestaat. Met pijlen wordt aangegeven hoe onderwerpskennis tot een volgend kenniselement of motief zou moeten leiden. Door de pijlen te volgen en de structuur van boven naar beneden te lezen wordt een samenvatting van het hypothetisch onderwijsleerproces verkregen.

In sommige gevallen is sprake van twee gekoppelde leerprocessen die elkaar als het ware aandrijven. In de driekoloms didactische structuren representeren de twee kolommen de doelen die beoogd worden. Bij Vollebregt (1998) bijvoorbeeld gaat de linkerkolom over het leren van het deeltjesmodel en de rechterkolom over de aard van natuurwetenschap waarmee de onderwerpsgerelateerde linkerkolom in een breder kader wordt geplaatst.

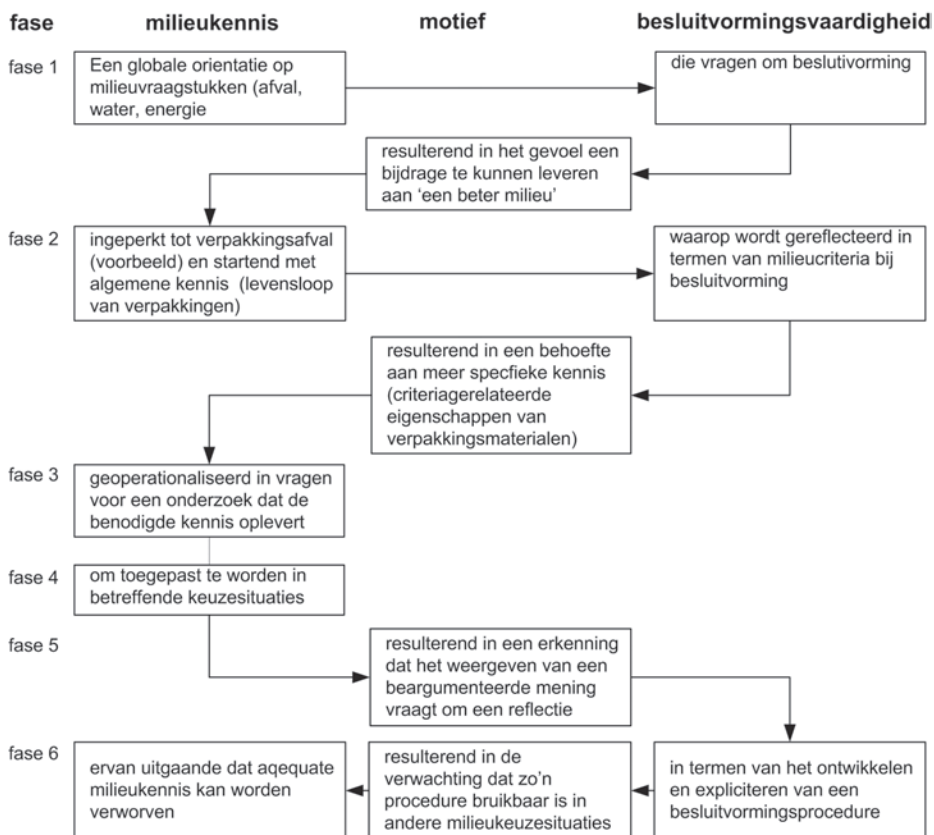




**Figuur 3-3** Voorbeeld van een 2-koloms-uitlijning van een probleemstellend ontwerp van het onderwerp 'introductie van radioactiviteit'. Bron: Lijnse (2002)

Figuur 3-4 geeft een voorbeeld van een andere driekolomsstructuur: de didactische structuur van het materiaal van Kortland gericht op het aanleren van besluitvormingsvaardigheden voor afvalverwerking. Net als bij Vollebregt is bij Kortland de linkerkolom ook onderwerpsgerelateerd, maar is het andere proces, dat in de rechterkolom wordt gevisualiseerd, gericht op het ontwikkelen van een vaardigheid, in dit geval ten aanzien van besluitvorming. In beide gevallen visualiseert de middelste motieven-kolom hoe de twee processen elkaar motiveren en aandrijven.

*Didactische structuur van de module Verpakkingsafval*



**Figuur 3-4** Voorbeeld van een 3-koloms uitlijning voor het probleemstellend onderwijzen van besluitvorming over het afvalvraagstuk. Bron: Kortland (2001)

### 3.3.3 Authentieke handelingspraktijk

Het werk van onder andere Klaassen, Kortland en Vollebregt had laten zien dat, hoewel de probleemstellende benadering een geschikte didactiek leek te zijn, het concreet uitwerken ervan en bijvoorbeeld het expliciteren van het globale motief en de lokale motieven niet eenvoudig is en voor ieder nieuw onderwerp weer bijzondere inspanning en inspiratie vereist. Vanuit de behoefte deze bijzondere inspanning te verminderen ontstond binnen het Centrum voor Bèta didactiek rond 2005 het idee om authentieke handelingspraktijken in te zetten als bron van inspiratie voor het uitwerken van de probleemstellende benadering.

Westbroek (2005) introduceerde het idee om een bestaande authentieke praktijk

te didactiseren en deze een richtinggevende rol in het ontwerpproces te laten vervullen. De verwachting was dat dit zou kunnen inspireren bij het expliciteren van het globale motief en de lokale motieven en zo houvast zou kunnen bieden bij het ontwerpen van een coherent leerproces. Geïnspireerd door de observatie dat leerlingen scheikunde vaak een abstract en weinig relevant vak vinden startte Westbroek een ontwikkelingsonderzoek naar een manier om leerlingen in het onderwijsleerproces meer betrokken te laten zijn. Het onderzoek richtte zich op het ontwikkelen van een voor leerlingen betekenisvol effectief onderwijsleerproces voor de beoordeling van waterkwaliteit. De gedachte hierbij was dat inzet van zo'n gedidactiseerde handelingspraktijk het makkelijker zou kunnen maken om probleemstellend onderwijs te ontwerpen waarbij leerlingen zicht hebben op de relevantie en de richting van het leerproces (globaal motief) en op de noodzaak en richting van de kennisuitbreiding (lokale motieven):

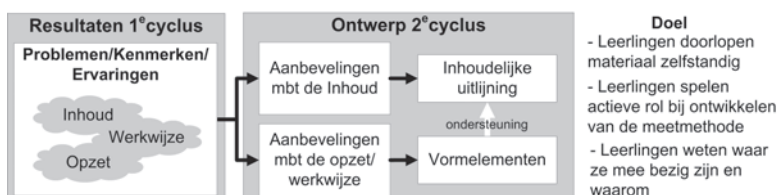
*'Het idee is als volgt. In een authentieke praktijk wordt een karakteristieke procedure gevolgd om bepaalde duidelijke doelen te bereiken. In dit geval: waterkwaliteit wordt getest en beoordeeld om te kunnen beslissen of het aan de criteria voor de waterfunctie voldoet. Met andere woorden: de procedure is functioneel om het doel van de authentieke praktijk te bereiken. De karakteristieke procedure kan gebruikt worden om de relatie tussen context en need-to-know te versterken en om de procedure als vanzelf te integreren in het onderwijsleerproces.'* (Westbroek, 2005, p 315)

De gedachte is dat het werken aan het oplossen van een praktisch of theoretisch probleem in een gedidactiseerde authentieke praktijk het makkelijker maakt een globaal motief bij de leerlingen op te roepen omdat het zorgt voor een voor leerlingen herkenbaar doel in de beginfase van het onderwijsleerproces. Daarnaast kunnen de karakteristieke werk- en denkwijzen van de handelingspraktijk bovendien als inspiratiebron dienen voor het in kaart brengen van de lokale motieven en bijdragen aan het ontwerpen van een coherent leerproces. De aanname is namelijk dat, wanneer de leerlingen enigszins bekend zijn met de handelingspraktijk, de karakteristieke werkwijze uit deze praktijk voor hen intuïtief invoelbaar is en daardoor helpt om een globaal zicht te krijgen op wat ze gaan doen en waarom ze dat gaan doen. Op deze manier vervult de karakteristieke werk- en denkwijze uit de handelingspraktijk een dragende en sturende functie bij het uitbreiden van de functionele kennis en wordt dit uitbreiden bovendien als zinvol ervaren. Een geschikte authentieke handelingspraktijk kan dus een rijke inspiratiebron en richtinggevend hulpmiddel voor het ontwerpen van probleemstellend onderwijs zijn. Bovendien kan de handelingspraktijk het leerproces voor de leerlingen in een breder kader plaatsen waardoor zij het als (meer) zinvol ervaren. Bijkomend voordeel is ten slotte nog dat hierdoor een bijdrage aan de beeldvorming van het vak wordt geleverd.

### 3.3.4 Terugkoppeling aanbevelingen: waarom probleemstellend?

Zoals al aan de orde is geweest (in 3.2) heeft het onderzoek in de eerste cyclus geleid tot enkele ontwerpaanbevelingen die ervoor zouden moeten zorgen dat de leerlingen op ieder moment weten waar ze mee bezig zijn en waarom. De probleemstellende benadering beoogt onderwijsleerprocessen zodanig vorm te geven dat leerlingen voortdurend weten waarom ze waar mee bezig zijn en zicht op hun eigen leerproces houden. De probleemstellende benadering zou daarom een geschikt theoretisch kader kunnen leveren voor een didactisch verantwoord product 3. Door het leerproces zo te ontwerpen dat de juiste lokale motieven worden opgeroepen en de leerlingen de inhoudelijke functie van de benodigde kennisontwikkeling zien (tweede hoofdpunt van de probleemstellende benadering) kan gehoor gegeven worden aan aanbeveling Ia (voorkomen van inhoudelijke knelpunten). Door te proberen aan te sluiten bij de vragen van leerlingen ten aanzien van de inhoudelijke knelpunten zouden deze juist als lokaal motief kunnen fungeren. Hiermee zou ook gehoor gegeven worden aan aanbeveling Ib (zorgen dat leerlingen weten waarom ze wat doen).

De aanbevelingen uit de tweede categorie hebben betrekking op de meer concrete invulling, faciliteiten en vormgeving van het materiaal. Gezocht moet worden naar technische middelen om de rol van de docent te minimaliseren en de mogelijkheden van interactie tussen leerling en computer te benutten. De bij product 2 gekozen vorm waarbij leerlingen zelf werken aan het ontwikkelen van een meetmethode lijkt geschikt, maar vereist nog wel de aanwezigheid van een docent. Daarom moet gezocht worden naar een faciliteit die de rol van de docent kan overnemen. Deze faciliteit zou de leerlingen moeten begeleiden in het bestuderen van het materiaal en ervoor zorgen dat ze in niet te grote (maar ook niet te kleine) stappen zelfstandig te werk kunnen gaan. De leerlingen zouden feedback moeten ontvangen en hun antwoorden zouden gecontroleerd moeten worden zodat ze op de goede weg blijven, niet vast komen te zitten en niet gedemotiveerd raken. In Figuur 3-5 is het verloop van het ontwerpproces samengevat.



**Figuur 3-5** - Schematische weergave van het verloop van het ontwerpproces

De resultaten uit de eerste cyclus hebben geleid tot aanbevelingen met betrekking tot de inhoud (categorie I) en de opzet en werkwijze (categorie II). Door het materiaal

inhoudelijk uit te lijnen werd geprobeerd de aanbevelingen uit de eerste categorie te verwerken. Daarnaast waren enkele vormelementen nodig om de inhoudelijke uitlijning te ondersteunen en de aanbevelingen uit de tweede categorie te verwerken. De verwachting was dat dit zou leiden tot lesmateriaal dat de leerlingen zelfstandig zouden kunnen doorlopen terwijl ze steeds zouden begrijpen waar ze mee bezig waren.

### **3.4 Inhoudelijke uitlijning**

#### **3.4.1 Inleiding**

Het ontwerpproces bestond uit het opstellen van de didactische structuur van het materiaal waarin de voorkennis, leerdoelen, het te doorlopen leerproces (didactische uitlijning) en de verwachtingen daarbij stap voor stap werden geëxpliciteerd. Rekening houdend met het eerste uitgangspunt van de probleemstellende benadering (zie 3.3.1) moest allereerst bij de leerlingen een globaal motief opgeroepen worden zodat het hen interessant leek om verder te gaan. Om ook het tweede uitgangspunt uit te werken werd geprobeerd het materiaal zodanig op te bouwen dat de leerlingen de inhoudelijke zin zouden zien van het in een bepaalde richting uitbreiden van hun kennis. Hiertoe werd geprobeerd bij de leerlingen lokale motieven op te roepen die hen moesten sturen in het bestuderen van het materiaal, het doorgronden van de meetopstelling en het ontwikkelen van de meetmethode. Dit moest ervoor zorgen dat de leerlingen zicht zouden houden op de oplossingsrichting en de volgende stappen als logisch en zinvol zouden ervaren.

Als onderdeel van deze inhoudelijke uitlijning kreeg in de tweede cyclus ook de handelingspraktijk van de experimenteel fysisce een plaats. Dit was niet direct gerelateerd aan de resultaten van de eerste cyclus, maar een gevolg van ontwikkelde inzichten ten aanzien van de probleemstellende benadering (Westbroek, 2005; Klaassen, 2006).

#### **3.4.2 Handelingspraktijk experimenteel fysisce**

##### **Inleiding**

De verwachting dat een authentieke handelingspraktijk dienst zou kunnen doen als inspiratiebron bij het zoeken naar globale en lokale motieven leek aantrekkelijk in de fase van het project waarin het ontwerpen juist zijn aanvang nam. Daarnaast zou het integreren van een authentieke praktijk wellicht de mogelijkheid bieden om het gehele experiment voor de leerlingen in een breder kader te plaatsen. Het materiaal zou hierdoor niet meer alleen zorgen voor kennisuitbreiding over het zeer specifieke, en weinig transfereerbare, onderwerp van het meten van de lichtsnelheid, maar

bijvoorbeeld ook voor meer algemeen toepasbare kennis over experimenteren.

### **Handelingspraktijk – Experimentele fysica**

Een geschikte authentieke praktijk die goed aansluit bij het onderwerp van het experiment op afstand, waarin geprobeerd wordt een fundamentele grootheid uit de natuurkunde te bepalen, leek die van de experimenteel fysicus te zijn. De handelingspraktijk van een experimenteel fysicus betreft immers, onder andere, ook het meten van (fundamentele) natuurconstanten en/of het bepalen van de relatie tussen twee of meer grootheden. Daarbij zet een experimenteel fysicus bekende natuurkundige theorieën in bij het ontwikkelen en evalueren van een geschikte meetopstelling en meetmethode. Dat gaat meestal in een aantal opeenvolgende stappen, vertrekkend vanuit een eerste idee en toewerkend naar het eindresultaat. De inhoud van deze stappen vormt geen vaste algemene procedure, maar wordt bepaald door de specifiek te meten grootheid of relatie tussen grootheden. Steeds terugkerende elementen zijn echter wel: het gebruik van theorie om een meetopstelling en meetmethode te bedenken, het stapsgewijs ontwikkelen en tussentijds evalueren van de meetopstelling en meetmethode, en het gebruik van wiskunde om de meetresultaten te verwerken.

### **Gedidactiseerde handelingspraktijk**

Om de authentieke praktijk in te kunnen zetten moet deze eerst worden gedidactiseerd en toegespitst op het onderwerp van het experiment op afstand. Eerst moet de *hoofdvraag* voor het experiment op de handelingspraktijk worden afgestemd: hoe kun je zoiets groots als de lichtsnelheid meten? Of, wat meer specifiek:

*Wat is een geschikte meetopstelling en meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht en andere media?*

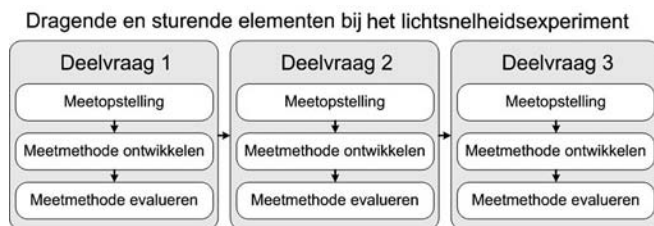
In de authentieke handelingspraktijk van een experimenteel fysicus zal een hoofdvraag worden opgesplitst in een aantal (specifieke) deelvragen. In de gedidactiseerde handelingspraktijk van de leerling als experimenteel fysicus geeft de beschikbare meetopstelling van het lichtsnelheidsexperiment aanleiding tot drie deelvragen:

1. Hoe gebruiken we de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven?
2. Hoe manipuleren we het lichtsignaal om die theorie te kunnen gebruiken?
3. Hoe elimineren we de optredende systematische fout in de metingen?

Samen met de hoofdvraag moeten deze *drie deelvragen* richting geven aan het leerproces en vormen ze een *eerste dragend en sturend element* van de didactische structuur.

In de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus zijn het ontwikkelen van een meetopstelling en een meetmethode sterk met elkaar verweven. In de gedidactiseerde handelingspraktijk van de leerling als experimenteel fysicus bij het

lichtsnelheidsexperiment kan dat niet het geval zijn. Vanwege het afstandskarakter van het experiment is de meetopstelling immers een niet te beïnvloeden gegeven. Daarom zal deze meetopstelling voor de leerlingen steeds het vertrekpunt vormen bij het zoeken naar een antwoord op de bovengenoemde deelvragen. Bij ieder van de deelvragen zullen de leerlingen moeten nagaan of de tot dan toe ontwikkelde meetmethode bij de gegeven opstelling tot het gewenste resultaat leidt. De leerling krijgt daarom bij elk van de deelvragen, in een vaste volgorde, met de volgende drie stappen te maken: bekijken van de meetopstelling, ontwikkelen van de meetmethode en evalueren van deze methode. Deze drie stappen sturen het proces en vormen een *tweede dragend en sturend element* van de didactische structuur (figuur 3-6).



**Figuur 3-6** Schematische weergave van de dragende en sturende elementen

Met deze dragende en sturende elementen staat dus niet zozeer de vraag wat de lichtsnelheid in lucht is centraal, maar meer hoe een geschikte meetmethode om de lichtsnelheid te bepalen eruit zou moeten zien. Hieronder zullen nu eerst de voorkennis en de leerdoelen toegelicht worden, waarna de hierboven kort geschetste didactische uitlijning verder uitgewerkt wordt.

### 3.4.3 Voorkennis en leerdoelen

#### **Voorkennis**

Bij de uitwerking van de didactische structuur is het uitgangspunt dat de leerling uit de doelgroep (natuurkunde-NT uit 5 of 6VWO) voldoende voorkennis heeft van het leerstofdomein “trillingen en golven” (beperkt tot lopende golven) en het golfkarakter van licht. Meer specifiek betreft dit begrippen als frequentie, golflengte, golfsnelheid, fase en faseverschil en hun onderlinge relaties. Daarnaast wordt voortgeborduurd op de voorkennis ten aanzien van toevallige en systematische fouten en hun wiskundige vaardigheden wat betreft het verwerken van relaties in diagrammen.

#### **Leerdoelen**

Vanuit deze voorkennis moet de didactische structuur (en de uitwerking daarvan) leiden tot het realiseren van het volgende globale leerdoel: *de leerling heeft een procedure ontwikkeld voor het, met de gegeven meetopstelling, meten van de*

*lichtsnelheid in lucht en in andere media en is in staat om deze procedure toe te passen.*

Meer specifiek zijn daarbij de volgende subdoelen te onderscheiden:

De leerling is in staat om (bij de gegeven meetopstelling) uit te leggen:

- waarom een rechtstreekse meting van de lichtsnelheid (uit afstand en tijdsduur) lastig is,
- waarom het gebruik van het golfkarakter van licht wel een mogelijkheid biedt,
- waarom het dan noodzakelijk is om het lichtsignaal te moduleren,
- waarom er sprake is van het optreden van een systematische fout,
- hoe deze systematische fout kan worden geëlimineerd,
- hoe de ontwikkelde procedure voor het meten van de lichtsnelheid in lucht kan worden aangepast voor het meten van de lichtsnelheid in andere media.

Daarnaast is in het perspectief van een later uit te voeren experimenteel onderzoek (bijvoorbeeld een profielwerkstuk) sprake van een meer algemeen leerdoel: *De leerling heeft enig inzicht verkregen in de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. Deze praktijk wordt gekenmerkt door het stapsgewijs ontwikkelen en evalueren van een meetopstelling en meetmethode. Belangrijke elementen zijn: de theorie achter een verschijnsel inzetten, het manipuleren van signalen, het zoeken naar en elimineren van systematische fouten en het hierbij inzetten van wiskunde.*

### 3.4.4 Dragende en sturende elementen

Zoals toegelicht in de beschrijving van de gedidactiseerde handelingspraktijk, ging het bij het lichtsnelheidsexperiment dus niet om het meten van de lichtsnelheid, maar om 'het ontwikkelen van een meetmethode (of, meer algemeen: een meetprocedure) voor de lichtsnelheid'. Er werd ervan uitgegaan dat de leerlingen intuïtief vertrouwd waren met een procedure voor het zoeken naar een bekende waarde waarbij het ontwikkelen van de procedure (hier: het meten van de lichtsnelheid) wordt afgewisseld met het evalueren of de procedure voldoet (hier: de literatuurwaarde oplevert).

Zoals in de beschrijving van de gedidactiseerde handelingspraktijk al is aangegeven verloopt de procedure aan de hand van drie deelvragen (eerste dragende en sturende element) waarbij steeds drie stappen (tweede dragende en sturende element) doorlopen worden: eerst twee stappen waarin kennis wordt ingezet en uitgebreid ('Meetopstelling' en 'Meetmethode ontwikkelen'), waarna in de derde stap wordt nagegaan of dit tot het gewenste resultaat heeft geleid ('Evaluatie'):

- *Meetopstelling*: aan welke eigenschappen van licht en/of de meetopstelling zou een procedurele stap ontleend kunnen worden voor het meten van de lichtsnelheid?
- *Meetmethode ontwikkelen*: welk probleem met de meetmethode is geconstateerd en hoe kan dit opgelost worden?
- *Evaluatie*: valt op deze manier inderdaad de lichtsnelheid te meten? Het antwoord op deze vraag, met aandacht voor vervolgvragen als: 'zijn de eventueel geconstateerde



## Hoofdstuk 3

problemen te omzeilen' en 'tot welke aanpassing van de procedurele stap leidt dat?' vormt vervolgens de input voor de kennisinzet bij de volgende deelvraag.

Figuur 3-7 geeft, net als figuur 3-6, een schematische weergave van de dragende en sturende elementen, nu uitgebreid met een korte omschrijving van de invulling van de drie stappen die per deelvraag gezet moeten worden. Bij de beschrijving van de didactische uitlijning (3.4.5) worden deze stappen verder uitgewerkt.

Hoofdvraag: Wat is een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht?		
<b>Deelvraag 1:</b> Hoe gebruiken we de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven?	Stap 1	<b>Meetopstelling</b> Meetopstelling meet faseverschil
	Stap 2	<b>Ontwikkelen meetmethode</b> In te zetten relatie: $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f$
	Stap 3	<b>Evaluatie</b> Opstelling meet $\Delta \varphi_{\text{red}} \rightarrow \lambda$ te klein
<b>Deelvraag 2:</b> Hoe manipuleren we het lichtsignaal om die theorie te kunnen gebruiken?	Stap 1	<b>Meetopstelling</b> Oprekken $\lambda$ door te moduleren
	Stap 2	<b>Ontwikkelen meetmethode</b> Aanpassen relatie: $c = (\Delta x / \Delta \varphi_{\text{red}}) \cdot f_{\text{mod}}$
	Stap 3	<b>Evaluatie</b> Meting $c : 2 \cdot 10^8$ ipv $3 \cdot 10^8$ m/s
<b>Deelvraag 3:</b> Hoe elimineren we de optredende systematische fout in de metingen?	Stap 1	<b>Meetopstelling</b> Lengteverschil kabels veroorzaakt extra $\Delta \varphi$
	Stap 2	<b>Ontwikkelen meetmethode</b> Elimineren syst. Fout uit $\Delta x, \Delta \varphi_{\text{red}}$ -diagram
	Stap 3	<b>Evaluatie</b> Meting $c$ : correct

**Figuur 3-7** Schematisch overzicht van de dragende en sturende elementen.

*De dragende en sturende elementen zijn de drie deelvragen en daarbinnen steeds de stappen Meetopstelling, Ontwikkelen meetmethode en Evaluatie.*

### 3.4.5 Uitgewerkte didactische uitlijning

#### Inleiding

De grafische representatie van de didactische uitlijning is schematisch weergegeven in figuur 3-8. Het gaat hier om een driekoloms representatie omdat hier, net als bij bijvoorbeeld Kortland (2001) (zie 3.3.2) sprake is van twee gekoppelde leerprocessen die elkaar aandrijven: de linkerkolom representeert de ontwikkeling van de specifieke procedure om de lichtsnelheid te bepalen en de rechterkolom visualiseert de algemene aspecten van het werk van een experimenteel fysicus die in het lesmateriaal aan bod komen. De middelste kolom verwoordt de motieven die opgeroepen worden en koppelt deze twee leerprocessen.

De opeenvolgende cycli van kennisinzet en evaluatie zijn in de representatie respectievelijk met zwart en grijs aangegeven. Gelet op de eerder gemaakte opsplitsing van 'kennisinzet' in de stappen meetopstelling en meetmethode ontwikkelen gaan aan elk grijs blokje (meetmethode evalueren) twee zwarte blokjes (meetopstelling en meetmethode ontwikkelen) vooraf. Verder inzoomend op de blokjes zelf en

vanaf linksboven de pijlen volgend geeft deze figuur de didactische uitlijning van het materiaal op hoofdlijnen. De bijbehorende uitwerking wordt per fase van de didactische structuur verder toegelicht. In aansluiting op de fasering van Kortland (2001) (3.3.2) doorlopen de leerlingen de fasen:

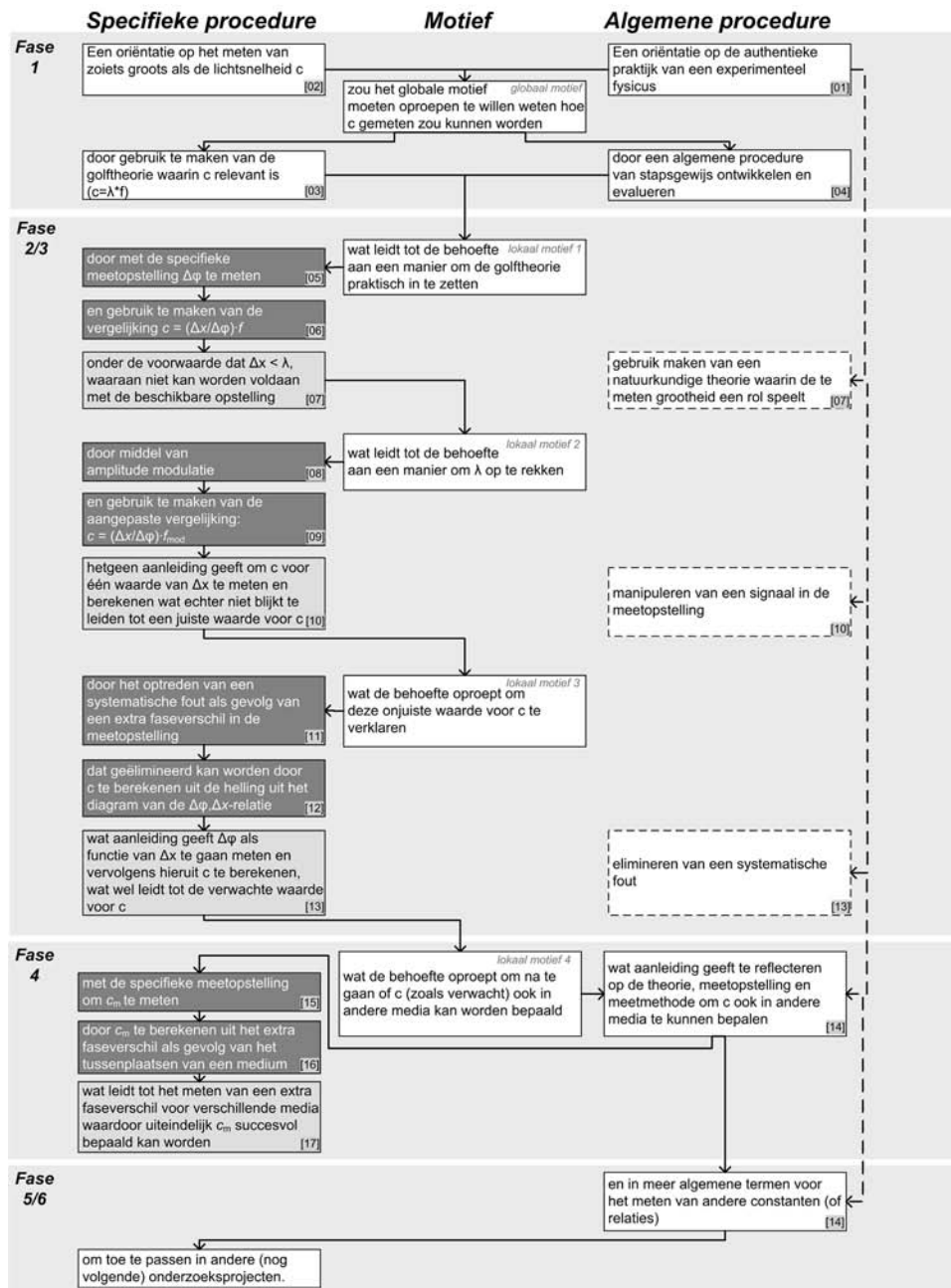
- 1: Motivering
- 2/3: Procedureontwikkeling en Evaluatie
- 4: Proceduretoepassing
- 5/6: Metacognitie.

In de toelichting op de didactische structuur wordt verwezen naar de nummering die in de figuur rechtsonder in de blokken te vinden is. De koppeling tussen het lesmateriaal en de didactische structuur is eenvoudig in de nummering terug te vinden: ieder scherm in het lesmateriaal behandelt één blokje in de didactische structuur. Dit zal in het volgende hoofdstuk verder toegelicht worden.

### **Fase 1: Motivering**

Gebruik makend van de fasering uit de probleemstellende benadering is de didactische functie van deze eerste fase te omschrijven als ‘oriënteren op en oproepen van een globale interesse in en een globaal motief voor het leren over het betreffende onderwerp’. Vanuit een oriëntatie op een ‘algemene procedure’ uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus [blok 01] en een oriëntatie op het relatief lastig zijn van het rechtstreeks bepalen van de lichtsnelheid (door berekening uit gemeten afstand en tijdsduur) [blok 02] moet bij de leerlingen een globale interesse voor het onderwerp en een motief ontstaan om het experiment te gaan uitvoeren: hoe meet je nu eigenlijk zoiets groots als de lichtsnelheid? Dat laatste kan hier al gespecificeerd worden (want dit zal intuïtief helder zijn voor de leerlingen) in termen van een globale procedure als: ‘door gebruik te maken van een theorie waarin de lichtsnelheid relevant is’.

De verwachting is dat voor leerlingen van de doelgroep de initiële vraag ‘hoe meet je nu eigenlijk zoiets groots als de lichtsnelheid’ voldoende interessant en uitdagend is om aan de voorbereiding op en de uitvoering van het experiment te beginnen. Zeker als duidelijk is dat een ‘rechtstreekse’ meting problemen gaat opleveren (voor zover hen dat vooraf al niet duidelijk is) en ze op basis van hun voorkennis het idee hebben dat gebruik maken van het golfkarakter van licht daarvoor wel een mogelijkheid zou kunnen bieden zonder nog te weten hoe dat dan precies zou moeten [*globaal motief*, eerste blok in motievenkolom]. In dit geval is dat de tot de voorkennis van de leerlingen behorende theorie over trillingen, lopende golven en het golfkarakter van licht [blok 03]. Op grond daarvan kan de leerlingen een vooruitblik worden geboden op de verdere manier van werken bij het uitvoeren van dit experiment [blok 04].



**Figuur 3-8** Schematische weergave van de didactische structuur voor Experimenteren op Afstand – Lichtsnelheid.

In het schema zijn kennisinzet en evaluatie respectievelijk met zwart en grijs weergegeven. Er zijn twee blokjes met nummer 14 omdat deze beide blokjes in het materiaal op hetzelfde scherm (14) zijn uitgewerkt.

Dit globale motief wordt verder versterkt door informatie over de manier waarop het experiment zal worden uitgevoerd: in een drietrapsbenadering ontwikkelen van een meetmethode, het sturen en meten met de computer via internet en een complexe meetopstelling, die niet eenvoudig op school te realiseren valt. Hierbij worden ook de deelvragen van die drietrapsbenadering gegeven en wordt vooruit gewezen naar de manier waarop deze beantwoord zullen gaan worden.

### Fase 2/3: Procedureontwikkeling en evaluatie

De didactische functie van de tweede fase is te omschrijven als ‘inperken van het globale motief tot een inhoudspecifieke behoefte om de procedure uit te werken’. Een logisch vervolg hierop is dan een derde fase met als didactische functie ‘evalueren van de toepasbaarheid van de ontwikkelde inhoudspecifieke procedure’<sup>1</sup>. De fasen 2 en 3 worden in combinatie beschreven omdat de leerlingen drie maal de procedureontwikkeling (fase 2) en -evaluatie (fase 3) doorlopen. De procedureontwikkeling en -evaluatie gebeurt aan de hand van de eerder genoemde lokale motieven c.q. deelvragen die aan de meetopstelling te ontleen zijn:

**Deelvraag 1 (Golftheorie praktisch inzetten)** - Het is aan het eind van de eerste fase niet te verwachten - maar misschien wel plausibel te maken (zie fase 1) - dat leerlingen zelf op het idee komen om voor het bepalen van de lichtsnelheid de golfeigenschappen van licht te gebruiken. Dat idee wordt hen dus aangereikt. Dit zou vervolgens het eerste lokale motief (gekoppeld aan de eerste deelvraag) moeten oproepen om te willen weten *hoe* die golfeigenschappen praktisch ingezet kunnen gaan worden [*eerste lokaal motief*, tweede blok motievenkolom].

Vervolgens wordt de beschikbare meetopstelling [blok 05] aangeboden en wordt de vraag ‘aan welke eigenschappen van licht zou een procedurele stap ontleend kunnen worden voor het meten van de lichtsnelheid?’ verder uitgewerkt.

De verwachting is dat leerlingen - met sturing vanuit vragen/opdrachten en feedback op hun antwoorden - vanuit hun bestaande voorkennis uit het domein ‘trillingen en golven’ in staat zullen zijn om in te zien dat meting van het faseverschil tussen twee punten in een lopende golf de gevraagde lichtsnelheid oplevert [blok 06]:  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f$ . En ook dat dit alleen kan onder de voorwaarde dat die twee punten binnen een golflengte van elkaar liggen omdat met de meetopstelling

---

1 In eerdere didactische structuren (bijvoorbeeld (Kortland, 2001; Vollebregt, 1998)) ging het in de fasen 2 en 3 om ‘kennisbehoefte’ resp. ‘kennisuitbreiding’. De didactische functie van de tweede fase werd daarbij omschreven als ‘het inperken en toespitsen van dit globale motief tot een inhoudsspecifieke behoefte aan meer kennis’. Een logisch volgende stap was dan een derde fase met als didactische functie ‘het uitbreiden van de bestaande kennis van de leerlingen, in het licht van het globale motief en de specifiekere geformuleerde kennisbehoefte’. Omdat het bij Experimenteren op Afstand – Lichtsnelheid niet gaat om kennisontwikkeling maar om procedureontwikkeling, moet de zowel de naamgeving als de formulering van de didactische functie van deze fasen worden aangepast.

alleen het gereduceerde faseverschil kan worden gemeten. Vanuit hun voorkennis zullen ze zich ook – met sturing en feedback – wel kunnen realiseren dat dat laatste in de praktijk van een meetopstelling ook problemen gaat opleveren: de golflengte van licht is erg klein [blok 07].

In het voorgaande is een eerste stap in de procedureontwikkeling gezet (bepalen van de lichtsnelheid uit het meten van het gereduceerde faseverschil tussen twee punten in een lopende golf) en geëvalueerd (het meten van het gereduceerde faseverschil is bij deze meetopstelling nog een probleem). De verwachting is dat met deze evaluatie een tweede lokale motief (gekoppeld aan de tweede deelvraag) is opgeroepen in de vorm van een vraagstelling waarop het antwoord niet op voorhand duidelijk is: hoe gaan we dit probleem van die te kleine golflengte oplossen? (*tweede lokale motief*, derde blok motievenkolom)

**Deelvraag 2 (Moduleren)** – Wederom is niet te verwachten dat leerlingen nu zelf op het idee komen om het lichtsignaal laagfrequent te gaan moduleren, waardoor de golflengte (van de modulatie) wordt opgerekt. Ook deze oplossing wordt hen dus aangereikt [blok 08]. Hierbij is dan overigens wel sprake van enige kennisuitbreiding: het modulatieprincipe zal de leerlingen niet bekend zijn.

De eerder ontwikkelde meetmethode moet nu uiteraard aan het gemoduleerde lichtsignaal worden aangepast:  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) f_{\text{mod}}$  [blok 09].

Nu kan voor de tweede maal in de procedureontwikkeling worden geëvalueerd: de leerlingen voeren een meting uit en berekenen uit de meetresultaten de lichtsnelheid in lucht [blok 10].

Dan blijkt echter dat dit een onjuiste waarde van de lichtsnelheid in lucht oplevert. De verwachting is dat hiermee een derde lokale motief (gekoppeld aan de derde deelvraag) is opgeroepen: wat is de oorzaak van deze onjuiste waarde? Verkeerd gemeten misschien? Nogmaals meten levert eenzelfde onjuist resultaat op, dus dat kan het niet zijn. De verwachting is dat hierdoor de leerlingen inzien dat er een probleem is en de behoefte wordt opgeroepen de meetmethode nogmaals aan te passen zodat ook dit probleem opgelost wordt (*derde lokale motief*, vierde blok motievenkolom).

**Deelvraag 3 (Systematische fout)** – Verwacht mag worden dat het mogelijk is om – met sturing en feedback – bij de leerlingen vanuit hun voorkennis over mogelijke meetfouten het idee op te roepen dat hier wel eens sprake zou kunnen zijn van een systematische fout. Het is niet te verwachten dat leerlingen zelf op het idee komen dat er sprake is van een systematische fout als gevolg van een extra faseverschil in de meetopstelling, dus ook dat laatste wordt weer aangereikt [blok 11]. De verwachting is dat (met sturing en feedback) de leerlingen in staat zullen zijn om op het idee te komen dat meten van het faseverschil op verschillende

onderlinge afstanden tussen bron en detector de mogelijkheid biedt om uit de helling van het  $\Delta\phi, \Delta x$ -diagram de lichtsnelheid in lucht te bepalen [blok 12].

Het voor de derde maal evalueren van de procedure bestaat natuurlijk uit het uitvoeren en verwerken van de benodigde metingen, leidend tot een correcte waarde voor de lichtsnelheid in lucht [blok 13]. Daarmee is dan de procedureontwikkeling voor het meten van de lichtsnelheid in lucht (met de gegeven opstelling) afgerond. De verwachting is dat de succesvolle ervaring met het ontwikkelen van de meetmethode in lucht tot de behoefte leidt de procedure ook voor andere media toe te passen [*vierde lokale motief*].

**Afsluiting** – Het is nu zinvol om, met het oog op het verder ontwikkelen van een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht, terug te kijken op de meetopstelling en de meetmethode voor het succesvol meten van de lichtsnelheid in lucht – zoveel mogelijk gekoppeld aan de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus en in dat kader vooruitwijzend naar een eventueel experimenteel onderzoek in het kader van het profielwerkstuk van de leerlingen [blok 14] (zie verder de beschrijving van fase 5/6 op pagina 83). Dit is zinvol omdat de verwachting is dat leerlingen met behulp van deze terugblik in staat zullen zijn relatief zelfstandig de ontwikkelde procedure verder uit te bouwen tot een meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht om zo het tweede deel van hoofdvraag (*wat is een geschikte meetopstelling en meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media?*) te kunnen beantwoorden.

#### **Fase 4: Proceduretoepassing<sup>2</sup>**

De didactische functie van de vierde fase is nu ‘toepassen van de ontwikkelde en geëvalueerde inhoudsspecifieke procedure in andere (vergelijkbare) situaties’. Of, in termen van *Experimenteren op Afstand – Lichtsnelheid*: het toepassen van de ontwikkelde en geëvalueerde procedure voor het meten van de lichtsnelheid in lucht op het probleem van het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht (waarop in fase 1 al enigszins wordt geanticipeerd).

De verwachting is dat leerlingen – met beperkte sturing en feedback – in staat zullen zijn te bedenken dat het plaatsen van een ander medium tussen bron en detector zal leiden tot een verticale verschuiving van de gemeten relatie in het  $\Delta\phi, \Delta x$ -diagram ten

---

2 In eerdere didactische structuren ging het in fase 4 om kennistoepassing. De didactische functie van deze fase was daarbij ‘het toepassen van de nieuwe kennis in situaties waarvoor de kennisuitbreiding bedoeld was’. In het geval van *Experimenteren op Afstand – Lichtsnelheid* is echter, analoog aan fase 2/3, sprake van een procedureontwikkeling waarbij het meten van de lichtsnelheid een logisch slotstuk vormt als evaluatie van de laatste stap in die procedureontwikkeling, zodat een met kennistoepassing vergelijkbare stap als proceduretoepassing eigenlijk niet meer aan de orde is. Toch handhaven we een vierde fase onder de naam ‘procedure-toepassing’ waarin het gaat om een bredere toepassing van de ontwikkelde en geëvalueerde procedure voor het meten van de lichtsnelheid in lucht op het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht.

opzichte van de eerder gemeten relatie bij het medium lucht en dat uit deze verticale verschuiving de lichtsnelheid in het tussengeplaatste medium te berekenen is [blok 15]. Gezien het voorgaande gaat het hier toch om iets meer dan alleen maar toepassing van de in fase 2/3 ontwikkelde procedure: die procedure moet enigszins worden aangepast. Zo nodig kan de leerling daarom terugvallen op meer sturing bij het aanpassen van de ontwikkelde meetmethode [blok 16]. Daarna moet de aangepaste procedure weer worden geëvalueerd. Die evaluatie bestaat uit het uitvoeren en verwerken van de benodigde metingen – leidend tot een correcte waarde voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht [blok 17]. De verwachting is dat op zijn minst een deel van de leerlingen in staat zal zijn om – gegeven de beschikbare meetopstelling – dit verder uitbouwen van de ontwikkelde procedure relatief zelfstandig uit te voeren. Of, in termen van het lesmateriaal: dat zij de gegeven sturing en feedback [van blok 16] niet nodig zullen hebben. Bij deze verdere uitbouw van de ontwikkelde meetprocedure gaat het overigens om twee aspecten: een relatief ‘eenvoudige’ procedure voor de lichtsnelheid in perspex, en een iets gecompliceerdere procedure voor de lichtsnelheid in water waarbij ook sprake is van het optreden en elimineren van een systematische fout als gevolg van het feit dat het water is opgesloten tussen twee glasplaatjes.

### **Fase 5/6: Reflectie en metacognitie**

Aansluitend bij het werk van Kortland (2001) is de didactische functie van de – hier uit pragmatische overwegingen gecombineerde – vijfde en zesde fase ‘het in het licht van het globale motief creëren van een behoefte aan reflectie op het kunnen hanteren van de betreffende vaardigheid, en het ontwikkelen van een metacognitief instrument voor het op een hoger niveau kunnen uitvoeren van de vaardigheid’. Met andere woorden: de functie is een reflectie op de verworven kennis over de meetopstelling en de meetmethode vanuit het oogpunt van een bredere toepassing in ander experimenteel onderzoek.

**Specifieke procedure** – De behoefte aan een reflectie op de in fase 2/3 ontwikkelde specifieke procedure wordt opgeroepen door het perspectief van het verder ontwikkelen van een geschikte meetopstelling en meetprocedure voor de lichtsnelheid in andere media in fase 4 (zie de beschrijving van de afsluiting van fase 2/3 (pagina 81)). Het expliciteren van de in fase 2/3 ontwikkelde specifieke procedure [blok 14, fase 4] levert de leerlingen een ‘gecontextualiseerd metacognitief instrument’ voor gebruik in fase 4 – ‘gecontextualiseerd’ omdat het hier nog steeds gaat om een experimentele bepaling van de lichtsnelheid, zij het dan in andere media dan lucht.

**Algemene procedure** – Daarnaast wordt in deze reflectie weer de verbinding gelegd met de handelingspraktijk van de experimenteel fysisch die (onderdelen van)

de bij een bepaald experiment ontwikkelde meetopstelling en meetmethode ook vaak gebruikt in andere experimenten voor het bepalen van andere grootheden en/of relaties tussen grootheden [blok 14, fase 5/6].

Het leggen van deze verbinding wordt voorbereid door bij het doorlopen van de drie deelvragen in fase 2/3 de specifieke procedure in het bredere kader van de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus te plaatsen. In figuur 3-8 wordt dit gevisualiseerd door de gestippeld omlijnde blokken [rechterkolom: blok 07, 10 en 13]:

- theorie gebruiken waarin de te meten grootte voorkomt,
- manipuleren van signalen,
- elimineren van systematische fouten.

De stippellijnen tussen deze blokken visualiseren dat deze blokken voor de leerlingen geen actief sturende, maar een meer passief reflecterende en perspectief verbredende functie hebben als concrete uitwerking van een algemene procedure van stapsgewijs ontwikkelen en evalueren [blok 04]. De verticale positie van deze blokken in figuur 3-8 geeft aan op welk moment tijdens het ontwikkelen van de specifieke procedure de leerlingen gewezen worden op de overeenkomsten tussen de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus en hun eigen werk. Om in deze reflectie [blok 14, fase 5/6] de koppeling aan de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus zo functioneel mogelijk te maken, worden ook andere voorbeelden van het manipuleren van signalen en het optreden van systematische fouten gegeven. Bovendien wordt de leerlingen gevraagd om vanuit hun eigen experimentele ervaring met voorbeelden te komen. De verwachting is dat leerlingen hierdoor een zekere mate van gevoeligheid zullen ontwikkelen voor het zelf inzetten van dit soort elementen uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus, bijvoorbeeld in een eventueel experimenteel onderzoek in het kader van het profielwerkstuk. Daarmee levert deze reflectie ook iets wat een 'gedecontextualiseerd metacognitief instrument' voor het (beter) uitvoeren van zo'n experimenteel onderzoek genoemd zou kunnen worden. Al moet daarbij wel worden aangetekend dat dit instrument nog onvolledig is. Deze verwachting zal overigens in het kader van het lichtsnelheidsexperiment om voor de hand liggende redenen van beperkt beschikbare tijd en het geïsoleerde karakter van het experiment als onderdeel van een onbekende 'leerlijn experimenteren' niet onderzoeksmatig worden getoetst.

## 3.5 Vormelementen

### 3.5.1 Inleiding

De eerste cyclus liet zien dat problemen met het materiaal niet alleen door



onvolkomenheden in de inhoudelijke opbouw veroorzaakt werden, maar ook deels door mankementen in de praktische uitwerking. Het ontwerpen van een didactisch verantwoord experiment op afstand kon dan ook niet beperkt blijven tot alleen het inhoudelijk uitlijnen van materiaal. De wijze waarop de inhoud aan de leerlingen wordt aangeboden is minstens even belangrijk en speelt een essentiële rol in het ondersteunen van de inhoud en het sturen van de leerlingen, vooral omdat we ernaar streefden dat het experiment geheel zelfstandig uit te voeren zou zijn. Al zal de docent nooit helemaal met automatische middelen vervangen kunnen worden, toch wilden we voor het experiment op afstand zoeken naar vormelementen die de inhoudelijke uitlijning zodanig zouden ondersteunen dat de leerlingen, ook in de situatie waarin ze het experiment zelfstandig op afstand uitvoeren, voldoende zicht op hun eigen onderwijsleerproces hielden. In een conventionele situatie heeft de docent niet alleen een aan de onderwijsleeractiviteiten gekoppelde, inhoudelijk docerende taak. De docent vervult ook een metadidactische rol door op regelmatige momenten het verloop van het onderwijsleerproces tezamen met de leerlingen te expliciteren en daarop te reflecteren in het licht van de globale en lokale motieven (Lijnse, 2002). Deze rol zou door ontbreken van de docent dus ook door het materiaal opgevangen moeten worden. Product 3 was, net als de producten uit de eerste cyclus, een website. Toch verschilde het onmiskenbaar van de vorige producten. Om aan de aanbevelingen ten aanzien van de vorm te kunnen voldoen en om de inhoudelijke uitlijning maximaal tot zijn recht te laten komen werden in het nieuwe ontwerp enkele ondersteunende vormelementen opgenomen: een automatisch vragen- en feedbacksysteem, een 'Waar ben ik'-window, een vaste opbouw van de pagina's, animaties, facultatieve pagina's en webcams. In dit hoofdstuk worden alleen de functie en eisen aan het ontwerp van deze vormelementen beschreven en wordt een terugkoppeling naar de aanbevelingen gemaakt. De concrete vormgeving en inbedding in de uiteindelijke website komen in het volgende hoofdstuk aan bod.

### **3.5.2 Automatisch vragen- en feedbacksysteem**

In het lesmateriaal is een automatisch vragen- en feedbacksysteem verwerkt. De leerlingen doorlopen het materiaal door (voor)kennisopwekkende, controlerende, sturende en evaluatieve vragen te beantwoorden, ontvangen gerichte feedback op hun antwoorden en worden zo stap voor stap gestuurd in het ontwikkelen van de meetmethode. De feedback die de leerlingen krijgen wordt, behalve bij de open vragen, bepaald door het gegeven antwoord. Dit moet helpen voorkomen dat de leerlingen vastlopen in het materiaal. Het vragensysteem bevat verschillende typen vragen: multiple choice, vragen met numerieke antwoorden, open vragen waarin de

leerlingen moeten reflecteren en vooruitkijken, en vragen aan de hand van animaties. Deze animaties zijn toegevoegd op plekken waar statisch materiaal of tekst minder goed de inhoud zouden kunnen overbrengen of waar, in een conventionele situatie, een docent zou inspringen om extra toelichting te geven.

Doordat de leerlingen het materiaal bestuderen aan de hand van vragen is er sprake van een continue interactie tussen de leerlingen en het materiaal. Het belang van interactie in leerprocessen wordt al lange tijd erkend (Dewey, 1938; Vygotsky, 1978). In het bijzonder voor online materiaal wordt in veel literatuur benadrukt hoe belangrijk interactie is. Woo & Reeves (2007) merken bijvoorbeeld op:

*'One of the key components of good pedagogy, regardless of whether technology is involved is interaction'*

Hirumi (2002) benadrukt dat de interactie op zichzelf niet voldoende is: interactie moet betekenisvol zijn en niet 'just sharing personal opinions'.

Muirhead & Juwah (2004) specificeren een vijftal functies van interactie in het leerproces, die allemaal ook op het experiment op afstand van toepassing zijn:

*'promoting active learning, enabling effective facilitation, allowing learner input in the learning process, enabling the development of higher order knowledge and abilities, enhancing the quality of the learning experiences'.*

### **Terugkoppeling naar aanbevelingen**

De functie van het vragensysteem is allereerst de leerlingen te sturen door het materiaal. Daarnaast moet het de leerlingen activeren, de werkwijze verlevendigen, de leerlingen betrekken bij de ontwikkeling van de meetmethode en hen inzicht geven in de eigen voortgang. De verwachting is dat de werkwijze aan de hand van het vragensysteem de leerlingen zal helpen te weten waarom ze wat aan het doen zijn. Dit sluit aan bij aanbeveling Ib. Bovendien wordt het materiaal, door de opbouw aan de hand van vragen, in stappen opgedeeld waardoor voorkomen kan worden dat de leerlingen lange stukken tekst moeten bestuderen. Ten slotte zorgt het vragensysteem voor interactie en faciliteert het de controle, feedback en reflectie. Dit is belangrijk omdat, vooral in een situatie waar alleen leerling-computer interactie plaatsvindt, leerlingen zelfvertrouwen zullen halen uit de bevestiging van goede antwoorden (Powell, 2003). Dit vormelement sluit dus ook aan bij aanbeveling IIb (inbouwen van interactie, controle en feedback- en reflectiefaciliteiten).

### **3.5.3 'Waar ben ik'- window**

Het 'Waar ben ik'-window is zichtbaar vanaf elk scherm en geeft de leerlingen op ieder moment zicht op de drie deelvragen met opsplitsing in ontwikkel- en

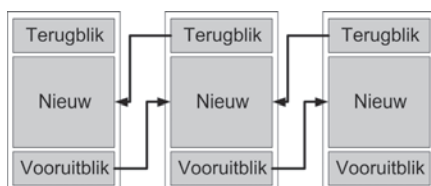
evaluatiestappen. Het laat dus de structuur van het materiaal zien en geeft bovendien zicht op welke deelvraag op dat moment aan de orde is, welke deelvragen al afgerond zijn en welke stappen nog volgen. Doel hiervan is de leerlingen houvast te bieden bij het inzien waar ze zich in het leerproces, maar ook in het concrete materiaal bevinden. Daarnaast biedt het de mogelijkheid om voor- en achteruit te bladeren. De pagina's waar naartoe teruggebladerd wordt, openen in een apart kleiner window waarvan de opmaak herkenbaar verschilt van die van de standaardpagina's. Dit moet voorkomen dat het terugbladeren in het materiaal de leerling laat verdwalen.

### Terugkoppeling naar aanbevelingen

De inhoudelijke uitlijning binnen het kader van de probleemstellende didactiek zou moeten leiden tot een inzichtelijke coherente opbouw van het materiaal waarin de structuur duidelijk te herkennen is voor leerlingen. Het 'Waar ben ik'-window brengt een continue explicitering van de structuur van het materiaal in beeld, laat zien waar de leerlingen zich op dat moment in de structuur bevinden en ondersteunt zo de inhoudelijke uitlijning doordat ze zo weten waar ze mee bezig zijn (aanbeveling Ib). Bovendien sluit de functie van het 'Waar ben ik window' direct aan bij aanbeveling IIa doordat het continu zicht geeft op de rode draad van het materiaal.

### 3.5.4 Structuur van de pagina

De structuur van de pagina wordt als apart vormelement omschreven omdat ze steeds terugkomt als een duidelijk herkenbare vaste opbouw in de opeenvolgende schermen. Deze opbouw moet ervoor zorgen dat op een globaal niveau de samenhang tussen de schermen en activiteiten gewaarborgd wordt en de grote lijn in het verhaal behouden en zichtbaar blijft. Om ervoor te zorgen dat de leerlingen op ieder moment duidelijk weten waar zij staan wordt aan het begin van ieder scherm teruggeblikt naar het vorige scherm en aan het einde van het scherm vooruitgeblikt naar het volgende scherm (zie figuur 3-9).



**Figuur 3-9** Opbouw van de opeenvolgende schermen in het lesmateriaal

### Terugkoppeling naar aanbevelingen

De structuur van de schermen en de expliciete verbindingen hiertussen moeten de leerlingen helpen bij het doorzien van de samenhang tussen de opeenvolgende schermen en activiteiten. Het expliciet aangeven van deze samenhang in het materiaal

is nodig omdat er, zoals in de conventionele situatie, geen docent aanwezig is die (zonodig) kan bijspringen om activiteiten in te leiden en te verantwoorden naar de leerlingen toe. Samenhang geven is ook belangrijk voor een afstandsexperiment omdat het lesmateriaal, zoals gebruikelijk bij websites, versnipperd gepresenteerd wordt. De hoeveelheid tekst per pagina moet namelijk, om het lezen van scherm werkbaar te houden, beperkt worden gehouden. Doordat er steeds terug en vooruit verwezen wordt, houdt de leerling zicht op de samenhang tussen de betreffende pagina en de voorgaande en volgende pagina, wat het gevoel van versnippering zou moeten tegengaan. Hierdoor draagt dit vormelement, evenals het 'Waar ben ik'-window, bij aan het herkenbaar maken van de rode draad in het materiaal (aanbeveling Ib).

### **3.5.5 Animaties**

Animaties worden al jaren gewaardeerd om hun mogelijkheden lesmateriaal te verlevendigen en moeilijke en nieuwe begrippen voor leerlingen te visualiseren en conceptionaliseren (bijvoorbeeld Cox *et al.*, 2003; Dancy & Beichner, 2006; Krusberg, 2007).

#### **Terugkoppeling naar aanbevelingen**

De inzet van animaties in het materiaal sluit aan op aanbeveling IIa (problemen met doorgronden van de structuur voorkomen): door een nieuw of lastig verschijnsel met een animatie te visualiseren kan de hoeveelheid tekst die nodig is om het verschijnsel uit te leggen beperkt worden. Leerlingen zien het letterlijk voor zich, krijgen de mogelijkheid om parameters aan te passen en hiervan de effecten te bestuderen en kunnen zo het verschijnsel beter doorgronden. Door animaties in te zetten bij de eerder geconstateerde inhoudelijke knelpunten kunnen de voor leerlingen lastige onderdelen verhelderd worden. De inzet van animaties sluit hiermee ook aan op aanbeveling Ia (voorkomen van inhoudelijke knelpunten).

### **3.5.6 Facultatieve pagina's**

In het ontwerp zijn ook facultatieve pagina's opgenomen. Deze bieden de mogelijkheid om aan geïnteresseerde leerlingen achtergrondinformatie aan te bieden maar tegelijkertijd de hoofdlijn van het materiaal herkenbaar te houden. De facultatieve pagina's bevatten verdiepend materiaal, gerelateerd aan wat op dat moment in het standaardmateriaal behandeld wordt. Uit de vaste opmaak van de link naar deze extra informatie is herkenbaar dat het om facultatief materiaal gaat. Door de pagina te openen in een kleiner en apart window met afwijkende opmaak blijft het voor de leerling duidelijk hoe weer teruggekeerd kan worden naar de hoofdlijn van het materiaal.

### **Terugkoppeling naar aanbevelingen**

Belangrijk doel van de inhoudelijke uitlijning was het expliciteren van het onderwijsleerproces vanuit de gedachte dat hiermee de rode draad in het materiaal voor leerlingen op ieder moment zichtbaar was. Een gevolg hiervan zou moeten zijn dat de leerlingen in staat zijn de hoofdzaken te onderscheiden van de bijzaken. Om de leerlingen hierbij te helpen zijn de bijzaken in facultatieve pagina's opgenomen die duidelijk als zodanig herkenbaar zijn. Dit biedt voor de geïnteresseerde leerling de mogelijkheid zich te verdiepen, maar voorkomt ook dat de leerlingen door de bomen het bos niet meer zien. Door zo de hoofdweg duidelijk van de zijwegen te onderscheiden wordt aanbeveling IIa (voorkomen van problemen met doorgronden van de structuur van de site) ondersteund.

#### **3.5.7 Webcams**

De leerlingen kunnen via twee webcams de opstelling bekijken. Dit geeft hen het gevoel aanwezig te zijn bij de opstelling en de mogelijkheid de status ervan te bekijken. Door twee webcams aan te bieden kan de opstelling vanuit meerdere posities geïnspecteerd worden waardoor er een goede indruk van kan worden verkregen.

### **Terugkoppeling naar aanbevelingen**

De inzet van de webcams sluit niet heel direct aan op de aanbevelingen maar op grond van de positieve ervaringen uit de eerste cyclus moet dit element zeker deel uitmaken van het nieuwe product.

## **3.6 Onderzoeksvragen**

### **3.6.1 Inleiding**

In hoofdstuk 1 werd de globale onderzoeksvraag geformuleerd als:

Hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?

De ervaringen van de eerste cyclus verhelderden wat onder "goed functioneren" kan worden verstaan: materiaal dat goed functioneert zorgt ervoor dat leerlingen niet verdwalen, actief zelf bezig zijn en zicht hebben op hun voortgang. Het realiseert dus een leerproces waarin leerlingen steeds weten waar ze mee bezig zijn en waarom ze daarmee bezig zijn.

De eerste cyclus maakte duidelijk dat dit goed functioneren eisen stelt aan zowel

de inhoud als aan de werkwijze en de vorm waarin het materiaal uitgewerkt is. Het onderzoek van de tweede cyclus concentreerde zich dan ook op deze beide aspecten. Het onderzoek moest nagaan of de problemen uit de eerste cyclus in de tweede cyclus opgelost werden door het materiaal inhoudelijk uit te lijnen en deze uitlijning in het concrete materiaal te ondersteunen met enkele vormelementen.

In de formulering van de onderzoeksvragen worden deze twee kenmerken van het ontwerp expliciet onderscheiden: het functioneren van het didactisch ontwerp en het functioneren van de vormelementen.

### 3.6.2 Het functioneren van het didactisch ontwerp

In de inhoudelijke uitlijning is geprobeerd de leeractiviteiten onderling af te stemmen met als doel de didactische kwaliteit van het experiment op afstand te optimaliseren. Om dit op verantwoorde wijze te kunnen doen werd de in 3.4.5 beschreven didactische structuur opgezet als middel om de eerder geconstateerde inhoudelijke en procesmatige problemen bij vorige versies van het materiaal op te lossen. Centraal element in de didactische structuur is het, gevoed door bij de leerlingen al bestaande kennis, op het juiste moment oproepen van inhoudelijke motieven voor de ontwikkeling van een meetprocedure voor het meten van de lichtsnelheid. Door bij de leerling steeds weer vragen op te roepen wordt de leerling inhoudelijk gemotiveerd om verder te gaan met het ontdekken van de meetprocedure. Aanname was dat dit ervoor zou zorgen dat de leerlingen weten waar ze mee bezig zijn, zich betrokken voelen en inhoudelijk niet meer struikelen of verdwalen.

Onderzoek moest duidelijk maken of de leerlingen inderdaad het materiaal doorliepen op de zoals in de didactische structuur omschreven wijze en of ze hierbij voldoende inzicht hadden in het doel van de handelingen. Dit leidde tot de eerste hoofdvraag van het onderzoek (met onderzoeksvragen A1, A2, A3 en A4):

A. Voldoet de didactische structuur zodanig dat de leerlingen in staat zijn het experiment zelfstandig, inhoudelijk gemotiveerd en met voldoende zicht op waar ze mee bezig zijn uit te voeren?

In 3.4 is de didactische structuur beschreven met zeventien opeenvolgende blokjes die het proces weergeven dat de leerlingen geacht worden te doorlopen. Om gestructureerd na te kunnen gaan of het ontwerp functioneerde, concentreerde de eerste onderzoeksvraag (A) zich op deze didactische structuur. Hiervoor is de gehele didactische structuur opgedeeld in drie clusters, ieder met een specifieke functie. Figuur 3-10 geeft een grafische representatie van de clustering te zien. Antwoorden op de vraag of de structuur voldoet betekent nagaan of de functies van de

drie clusters gerealiseerd zijn. Hier werd nog één onderzoeksvraag aan toegevoegd die gewijd was aan de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus die als een rode draad door het lesmateriaal loopt.

In het eerste cluster (blokjes 1 t/m 4) werd van de leerlingen verwacht dat zij nieuwsgierig raken naar een meetmethode voor de lichtsnelheid en een globaal inzicht krijgen op de manier waarop ze te werk zouden gaan. Doel van onderzoeksvraag A1 was na te gaan in hoeverre dit gelukt is:

*A1. Worden de leerlingen globaal gemotiveerd om de lichtsnelheid te bepalen en krijgen ze zicht op hoe ze dat zullen gaan doen?*

In het tweede cluster (blokjes 5 t/m 13) werd van de leerlingen verwacht dat zij, bij de gegeven meetopstelling, een geschikte meetmethode ontwikkelen voor de lichtsnelheid in lucht. Gestuurd door de vragen op de site zouden er drie lokale motieven (golfkarakter gebruiken, lichtsignaal moduleren en systematische fout elimineren) bij de leerlingen opgeroepen moeten worden die een inhoudelijk motief vormen om de meetmethode steeds verder te ontwikkelen, te evalueren en aan te passen. Onderzoeksvraag A2 gaat dit na:

*A2. Zien de leerlingen in hoe de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht er met de beschikbare meetopstelling uit moet zien en kunnen ze deze toepassen?*

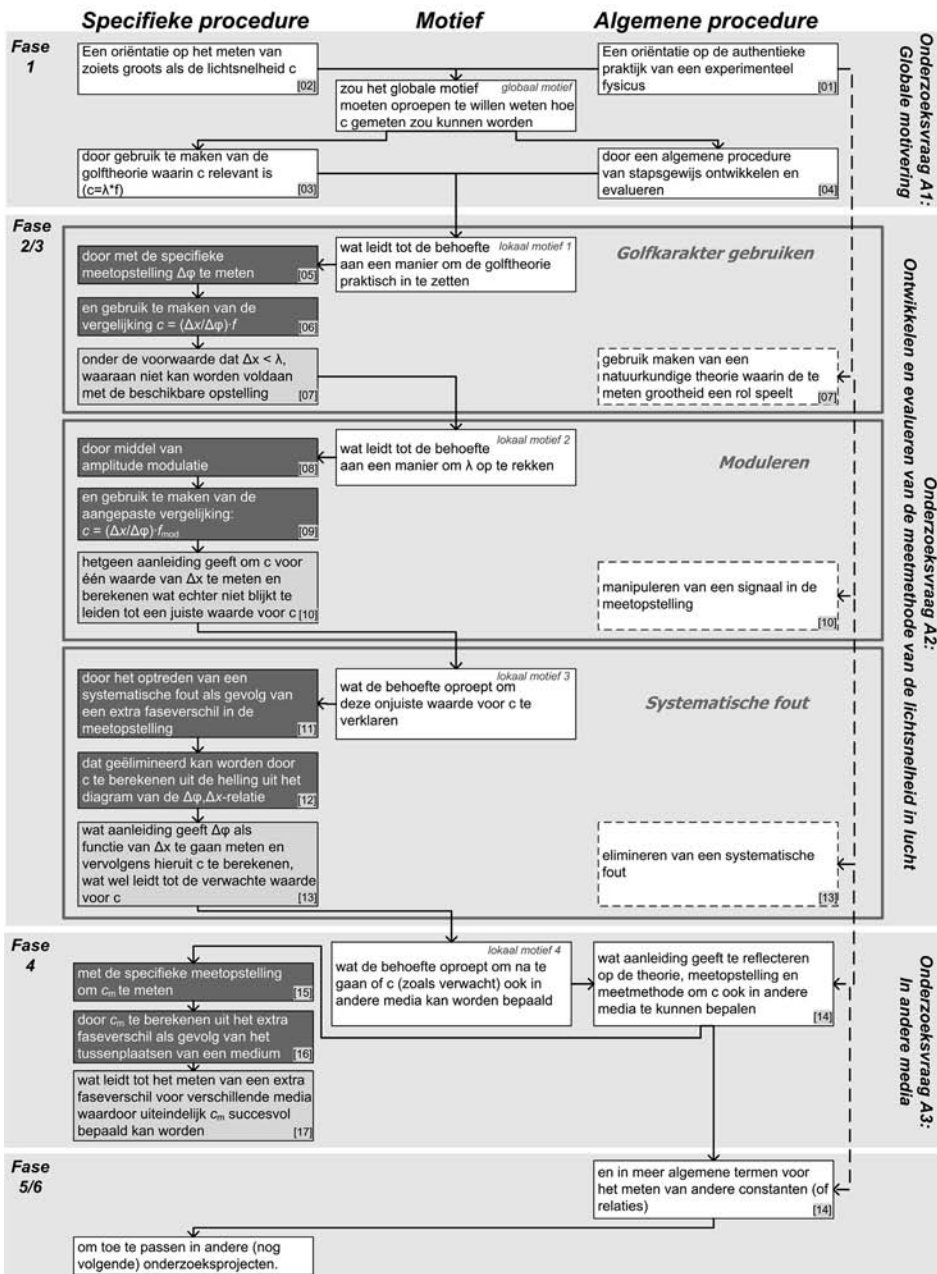
Onderzoeksvraag A3 is van toepassing op het derde cluster (blokjes 14 t/m 17). Hierin werd van de leerlingen verwacht dat zij – met minder gedetailleerde sturing dan in het tweede cluster – de meetmethode konden aanpassen voor gebruik in een meer complexe situatie:

*A3. Zien de leerlingen in hoe de ontwikkelde meetmethode moet worden aangepast voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht en kunnen ze deze toepassen?*

Onderzoeksvraag A4 gaat na of de leerlingen inzicht hebben verkregen in de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus:

*A4. Zien de leerlingen de parallel tussen hun experiment en de praktijk van de experimenteel fysicus?*

Het doel: een didactisch verantwoord experiment op afstand



Figuur 3-10 - Clustering binnen de didactische structuur.

Onderzoeks vraag A1 is gericht op de globale motivering (blokjes 02 t/m 04). Onderzoeks vraag A2 is gericht op de meetmethode in lucht met de drie subclusters: golfkarakter gebruiken (blokjes 05 t/m 07), lichtsignaal moduleren (blokjes 8 t/m 10) en systematische fout elimineren (blokjes 11 t/m 13). Onderzoeks vraag A3 is gericht op de meetmethode in andere media (blokjes 14-17) en onderzoeks vraag A4 op de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus (rechterkolom).



### 3.6.3 Het functioneren van de vormelementen

De inhoudelijke uitlijning werd ondersteund door vormelementen aan het materiaal toe te voegen. De eis dat het experiment op afstand zelfstandig door de leerlingen moest worden uitgevoerd maakte dat ook aan de praktische invulling van het materiaal bijzondere aandacht besteed moest worden. De uitwerking van de inhoudelijke uitlijning moest vormgegeven worden met ruime aandacht voor interactie tussen leerling en lesmateriaal – lees: de computer. Met de tweede hoofdvraag van het onderzoek werd nagegaan of het materiaal, een website met daarin opgenomen een aantal vormelementen, deze functie naar behoren vervuld heeft.

B. Functioneert de website met de opgenomen vormelementen in het faciliteren van het zelfstandig en op afstand uitvoeren van het experiment?

Deze hoofdvraag wordt beantwoord aan de hand van twee onderzoeksvragen B1 en B2. De eerste onderzoeksvraag B1 gaat per vormelement het functioneren na:

*B1. Functioneren de vormelementen naar verwachting?*

De tweede onderzoeksvraag B2 was ten slotte gericht op het functioneren van de site als geheel<sup>3</sup>. Het onderzoek moest duidelijk maken of de leerlingen het gevoel hadden met een echt experiment bezig te zijn en of ze dit leuk vonden. Daarom werd nagegaan of de leerlingen konden verwoorden wat ze leuk vonden en of het op afstand kunnen besturen van een werkende opstelling als positief werd ervaren:

*B2. Hoe beleven de leerlingen het afstandskarakter?*

In het volgende hoofdstuk wordt beschreven hoe het ontwerp is uitgewerkt in concreet lesmateriaal. Daar worden ook de onderzoeksvragen verder uitgewerkt in subvragen en worden de ingezette onderzoeksinstrumenten beschreven en verantwoord.

---

3 Aangezien het hier gaat om een terugblik op het geheel werden hier inhoud en vorm niet meer strikt gescheiden beschouwd.

# De uitwerking:

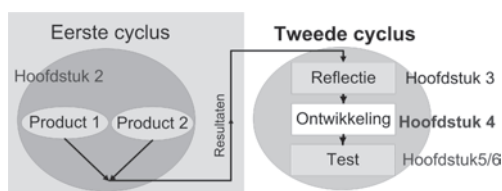
## het scenario, het lesmateriaal en de onderzoeksmethode



<b>4.1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>90</b>
<b>4.2</b>	<b>Lesmateriaal en scenario</b>	<b>90</b>
4.2.1	Inleiding	90
4.2.2	Fase 1: Oproepen van een globaal motief	92
4.2.3	Fase 2/3: Procedureontwikkeling en evaluatie	95
4.2.4	Fase 4: Proceduretoepassing	100
4.2.5	Sturing van leerlingen	102
4.2.6	Handelingspraktijk van de experimenteel fysicus	103
<b>4.3</b>	<b>Vormelementen</b>	<b>104</b>
4.3.1	Inleiding	104
4.3.2	Vragensysteem	104
4.3.3	Waar ben ik –window	109
4.3.4	Opbouw van de schermen	111
4.3.5	Animaties	113
4.3.6	Webcams	115
<b>4.4</b>	<b>Onderzoeksmethode</b>	<b>115</b>
4.4.1	Inleiding	115
4.4.2	Het functioneren van de didactische structuur	116
4.4.3	Het functioneren van de vormelementen	118
4.4.4	Experimentele setting	119
4.4.5	Onderzoeksinstrumenten	121

## 4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat in op de tweede fase van de tweede cyclus van het onderzoek (zie figuur 4-1). In deze fase werden het globale ontwerp, gevisualiseerd door figuur 3-8 van hoofdstuk 3, en de vormelementen uitgewerkt tot concreet lesmateriaal.



**Figuur 4-1** – Hoofdstuk 4 beschrijft de ontwikkelingsfase van de tweede cyclus.

Eerst wordt het scenario in de vorm van een verantwoording van het lesmateriaal en een beschrijving van het gewenste en verwachte verloop van het onderwijsleerproces gegeven (4.2). Dit wordt gedaan aan de hand van de fasering die binnen de didactische structuur is aangebracht. Daarna worden de vormelementen uitgewerkt (4.3).

Het hoofdstuk wordt afgesloten met een toelichting en verantwoording van de opzet van het onderzoek (4.4). In deze afsluiting worden de, aan het einde van hoofdstuk 3 geformuleerde, onderzoeksvragen verder gespecificeerd en wordt toegelicht welke onderzoeksinstrumenten werden ingezet om deze vragen te kunnen beantwoorden.

## 4.2 Lesmateriaal en scenario

### 4.2.1 Inleiding

Doel van het scenario is te beschrijven en te verantwoorden hoe het materiaal inhoudelijk concreet is vormgegeven op basis van het globale ontwerp zoals dat in hoofdstuk 3 (3.4.5) geschetst is.

In het scenario wordt verantwoord hoe de centrale thema's uit de probleemstellende didactiek (het globale motief, de lokale motieven, de specifieke procedure<sup>1</sup> en de algemene procedure<sup>2</sup>) uitgewerkt zijn en wat hierbij de verwachtingen waren.

Per fase van de didactische uitlijning (zie 'Fasering' in 3.3.2) wordt eerst de functie van het specifieke stuk lesmateriaal gegeven (paragraaf *Functie*). Daarna volgt een globale schets van het specifieke stukje lesmateriaal (paragraaf *Overzicht*). En ten

1 De specifieke procedure wordt weergegeven in de linkerkolom van de didactische uitlijning, hier: het ontwikkelen van een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid

2 De algemene procedure wordt weergegeven in de rechterkolom van de didactische uitlijning, hier: de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus

slotte worden per scherm de specifieke activiteiten die de leerlingen in de betreffende uitgewerkte fase moeten uitvoeren uitgewerkt (met de daaraan gekoppelde doelen en verwachtingen) (paragraaf *Activiteiten*).

Bij ander probleemstellend ontwikkelingsonderzoek, bijvoorbeeld dat van Kortland (2001), werd in het scenario ook de rol van de docent besproken. Bij Kortland speelde de docent een belangrijke rol bij het ondersteunen van het oproepen van het globale motief en de lokale motieven en het voor de leerlingen verbinden van de activiteiten. Omdat het experiment op afstand ontworpen is om zelfstandig en zonder aanwezigheid van de docent uitgevoerd te kunnen worden is bespreking van de rol van de docent hier niet relevant. Het oproepen van de globale en lokale motieven en het verbinden van de activiteiten moeten bij het experiment op afstand door het materiaal zelf gebeuren. Hoe dit is vormgegeven krijgt in onderstaande beschrijving wel ruim aandacht.

De koppeling tussen het ontwerp en het uiteindelijke lesmateriaal is transparant: alle blokjes in de didactische uitlijning (met uitzondering van de motiefblokjes in de middelste kolom) (Figuur 3-8, Hoofdstuk 3) corresponderen met een scherm in het lesmateriaal. De in hoofdstuk 3 al gehanteerde nummering van de blokjes verwijst daarom ook naar de schermnummers van het lesmateriaal.

In bijlage I zijn screenshots van de schermen opgenomen om inzicht in de precieze inhoud van de website te geven. In deze bijlage wordt steeds voorafgaand aan een scherm een beschrijving van de inhoud van het corresponderende blokje in de didactische uitlijning gegeven. Het materiaal is ook beschikbaar via <http://www.phys.uu.nl/~moa/lichtsnelheid/>.

Het lesmateriaal is opgedeeld in drie delen die corresponderen met de clusters in de didactische structuur (zie 3.6). Dit wordt weergegeven door figuur 4-2.

<i>Lesmateriaal</i>	<i>Didactische structuur</i>
Deel 1: Inleiding	cluster 1
Deel 2: Lichtsnelheid in lucht - deelvraag 1: inzet van golftheorie - deelvraag 2: oprekken van golflengte: moduleren - deelvraag 3: elimineren van de systematische fout	cluster 2
Deel 3: Lichtsnelheid in andere media	cluster 3

**Figuur 4-2** Opbouw van het lesmateriaal in drie delen.

Deel 1 van het lesmateriaal correspondeert met fase 1 in de didactische uitlijning. Het is een inleiding op het gehele experiment. In dit deel wordt het globale motief om de meetmethode te willen uitzoeken bij de leerlingen opgeroepen. Ook wordt zicht gegeven op de manier waarop ze te werk zullen gaan.

In deel 2, dat correspondeert met fase 2/3 van de didactische uitlijning, ontwikkelen

de leerlingen aan de hand van drie deelvragen de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht. De drie deelvragen worden steeds in drie stappen beantwoord door voor iedere deelvraag te kijken naar de meetopstelling, vervolgens de meetmethode te ontwikkelen en ten slotte deze te evalueren. (Aan elk van deze onderdelen wordt een apart scherm in de website gewijd).

In deel 3, corresponderend met fase 4 van de didactische uitlijning, passen ze de opgedane kennis toe door de ontwikkelde meetmethode via dezelfde drie stappen uit te breiden zodat ook de lichtsnelheid in andere media bepaald kan worden.

In de afsluiting van deel 2 was al vooruitgeblekt op hoe de opgedane kennis toe te passen zou zijn in verder onderzoek en werd dus al een (weliswaar minimale) invulling van fase 5 en 6 gegeven.

### 4.2.2 Fase 1: Oproepen van een globaal motief

#### Functie

De functie van de eerste fase is het oproepen van het globale motief. Dit motief wordt gekenmerkt door twee aspecten: ten eerste de leerlingen nieuwsgierig maken en hun interesse opwekken om zich in het lesmateriaal te verdiepen; ten tweede moet het doorlopen van de eerste fase een globaal beeld geven van hoe ze te werk zullen gaan. Het globale motief moet opgeroepen worden in deel 1 van het lesmateriaal corresponderend met de schermen 01 t/m 04 van de website.

#### Overzicht

De verwachting is dat wanneer leerlingen beseffen dat de lichtsnelheid niet simpelweg kan worden bepaald door de tijd te meten die het licht nodig heeft een bepaalde afstand te overbruggen, ze nieuwsgierig raken naar hoe de lichtsnelheid dan wel bepaald kan worden. Dit is uitgewerkt in de schermen 01 en 02. Deze twee schermen corresponderen in de didactische structuur met de eerste drie<sup>3</sup> blokken: vanuit een oriëntatie op een 'algemene procedure' uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysisch [blok 01] en een oriëntatie op het lastig zijn van het relatief rechtstreeks bepalen van deze lichtsnelheid [blok 02] moet bij de leerlingen een globale interesse voor het onderwerp zijn gewekt. Dit moet bij de leerlingen een motief oproepen om de vraag te willen beantwoorden: hoe meet je nu eigenlijk zoiets groots als de lichtsnelheid [blok: globaal motief]?

De oriëntatie op het werk van een experimenteel fysisch is vormgegeven door op scherm 01 kort zijn of haar werk te beschrijven als het zoeken naar fundamentele natuurconstanten of relaties tussen grootheden. Vervolgens wordt de parallel gelegd

---

3 Er is hier sprake van twee schermen die gekoppeld zijn aan drie blokken omdat het globale motief (en later ook de lokale motieven) in een apart blok is weergegeven, maar niet in een apart scherm uitgewerkt.

met het eigen werk door aan te geven dat de leerlingen nu zelf ook een deel van het werk van een experimenteel fysicus gaan uitvoeren en dat dit ook het geval is wanneer ze bijvoorbeeld aan hun profielwerkstuk werken.

Na de leerlingen op scherm 02 nieuwsgierig te hebben gemaakt naar de manier waarop de lichtsnelheid bepaald zou kunnen worden, wordt in het volgende scherm 03 een globaal idee van de oplossingsrichting gegeven, namelijk door gebruik te maken van de golftheorie. De eerste fase wordt afgesloten met scherm 04 waarop vooruitgeblikt wordt op de werkwijze door de deelvragen te geven en de algemene procedure van stapsgewijs ontwikkelen en evalueren te beschrijven. Hierdoor krijgen de leerlingen een globaal idee van het proces dat ze zullen doorlopen bij het ontwikkelen van een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid en daarmee is ook het tweede aspect van het globale motief vervuld.

## **Activiteiten Deel 1**

### **Scherf 01**

---

#### *Opdracht 1 – Meettijd reserveren*

De leerlingen worden in de eerste opdracht aangespoord om met de docent te overleggen over welke delen van het experiment uitgevoerd moeten gaan worden en vervolgens meettijd te reserveren zodat de meetopstelling op de gewenste tijd toegankelijk is. Doel van deze opdracht is de logistiek te regelen.

### **Scherf 02**

---

#### *Opdracht 2 – Eerste ideeën*

In de tweede opdracht wordt aan de leerlingen gevraagd hun eerste ideeën te geven over een manier waarop je de lichtsnelheid zou kunnen meten. Doel hiervan is hen actief te betrekken bij het onderwerp en hen te laten realiseren dat het wel eens niet zo eenvoudig zou kunnen zijn om de lichtsnelheid te meten. Het antwoord op deze open vraag moeten ze vervolgens zelf controleren door hun eigen antwoord te vergelijken met het antwoord dat in de feedback gegeven wordt.

#### *Opdracht 3 – Verschil met Rømer en Michaelson*

Vervolgens wordt beschreven hoe eerst Galileo (met behulp van assistenten, die licht naar elkaar seinen) en later Rømer (waarnemingen van beweging van de maan Io rond Jupiter) en Michaelson (roterende spiegels) probeerden de lichtsnelheid te meten en moeten de leerlingen aangeven waarom het Rømer en Michaelson wel lukte en Galileo niet. Het doel van deze opdracht is dat de leerlingen zich de orde van grootte van de te meten afstand en tijd realiseren als je de lichtsnelheid met behulp van deze twee grootheden zou willen meten.

### *Opdracht 4 – Benodigde afstand*

Dat de lichtsnelheid op deze manier alleen bij hele grote afstand te meten is wordt nog eens benadrukt door opdracht 4 waarin de leerlingen moeten uitrekenen dat de assistenten van Galileo minstens 300 km uit elkaar zouden moeten staan om de lichtsnelheid met enige nauwkeurigheid te kunnen meten.

De pagina wordt afgesloten door te herhalen dat het meten van de lichtsnelheid door middel van het bepalen van de afgelegde afstand en de benodigde tijd alleen mogelijk is bij zeer grote afstanden of met zeer geavanceerde apparatuur waarmee extreem korte tijdmeting mogelijk is, maar die voor het leerling-experiment niet beschikbaar is. Om de leerlingen nieuwsgierig te maken naar een andere oplossing wordt het scherm afgerond met de opmerking: ‘We moeten dus iets anders bedenken...’

De verwachting is dat bij leerlingen nu het globale motief is opgeroepen te willen weten hoe de lichtsnelheid dan wel gemeten zou kunnen worden.

### Scherf 03

---

Nu de leerlingen beseffen dat de lichtsnelheid niet eenvoudigweg door het meten van afstand en tijd kan worden bepaald, wordt, voorafgaand aan opdracht 5, een idee van de oplossingsrichting gegeven. De leerlingen krijgen het idee aangereikt een andere theorie waarin de lichtsnelheid relevant is te gebruiken: de golftheorie.

### *Opdracht 5 – Relatie tussen $c$ , $\lambda$ en $f$*

Doel van opdracht 5 is de voorkennis ten aanzien van de golftheorie op te roepen door de leerlingen te vragen de relatie tussen golflengte, frequentie en lichtsnelheid te geven. De verwachting is dat de leerlingen hier kunnen aangeven dat  $c = \lambda \cdot f$ .

### *Opdracht 6 – Orde van grootte van $\lambda$ en $f$*

Vervolgens krijgen ze de opdracht de frequentie en golflengte van het in de opstelling gebruikte rode licht in BINAS op te zoeken. Het doel van deze opdracht is hen bewust te maken van de grootte-orde van de golflengte en de frequentie. De verwachting is dat leerlingen nu inzien dat de inzet van de golftheorie wel eens tot een geschikte meetmethode zou kunnen gaan leiden, maar dat ook bij de inzet van deze theorie nog niet alle problemen opgelost zullen zijn. Want ook nu is er sprake van een extreem grote en een extreem kleine grootte: respectievelijk de frequentie en de golflengte van het licht. De verwachting is dat de leerlingen nu willen weten hoe de golftheorie dan wel kan worden ingezet in de meetmethode (*lokaal motief 1*).

### Scherf 04

---

Het eerste deel wordt afgesloten met scherm 04. Hierop staan geen opdrachten, maar wordt vooruit geblikt naar hoe de leerlingen in deel 2 te werk zullen gaan.

### 4.2.3 Fase 2/3: Procedureontwikkeling en evaluatie

#### Functie

In algemene termen is de functie van fase 2/3 het globale motief in te perken tot een inhoudspecifieke behoefte om de procedure voor de meting van de lichtsnelheid uit te werken. Vervolgens wordt de toepasbaarheid van de ontwikkelde inhoudspecifieke procedure geëvalueerd. Meer concreet betekent dit dat de leerlingen in fase 2/3, stapsgewijs en gestuurd door lokale motieven, drie maal een cyclus doorlopen waarin ze de procedure om met de beschikbare meetopstelling de lichtsnelheid in lucht te meten verder ontwikkelen en evalueren. Na de derde ronde leidt dit tot een procedure waarmee succesvol de lichtsnelheid in lucht bepaald kan worden.

#### Overzicht

Fase 2/3 is uitgewerkt in deel 2 van het lesmateriaal: Lichtsnelheid in lucht (schermen 05-14). In de afsluiting van deel 1 was al aangekondigd dat de vraag wat een geschikte methode is voor het bepalen van de lichtsnelheid aan de hand van drie deelvragen beantwoord moet worden. Bij elke deelvraag wordt steeds in drie stappen (Meetopstelling, Meetmethode ontwikkelen, Meetmethode evalueren) naar een antwoord gezocht.

*Deelvraag 1 – Hoe gebruiken we de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven?*

De verwachting is dat na afronding van deel 1 bij de leerlingen het eerste lokale motief, gekoppeld aan de eerste deelvraag, is opgeroepen: de behoefte aan een manier om de golftheorie praktisch in te zetten (*lokaal motief 1*).

De eerste stap in de zoektocht naar een manier om de golftheorie praktisch in te zetten start met een beschrijving van de meetopstelling.

In de tweede stap, wordt de voorkennis over het faseverschil tussen twee punten in een lopende golf geactiveerd en zoeken de leerlingen uit hoe je, gebruik makend van  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f$ , uit een meting van de afstand en het daarbij gemeten faseverschil de lichtsnelheid  $c$  kunt bepalen.

In de derde stap wordt echter duidelijk dat de meetopstelling niet het faseverschil maar het gereduceerde faseverschil meet. Hierdoor kan de afgeleide relatie alleen worden toegepast onder de voorwaarde dat bron en de detector binnen één golflengte van elkaar liggen. De leerlingen hebben al eerder geconstateerd dat de golflengte van het gebruikte licht echter veel kleiner is dan die afstand, waardoor ze zich zullen realiseren dat er een probleem is en de meetmethode nog niet ingezet kan worden.

*Deelvraag 2 – Hoe manipuleren we het lichtsignaal om die theorie te kunnen gebruiken?*

De verwachting is dat het evalueren van de meetmethode bij deelvraag 1 het tweede lokale motief, gekoppeld aan tweede deelvraag, zal oproepen: de behoefte aan een



manier om de golflengte op te rekken (*lokaal motief 2*).

In de eerste stap voor het beantwoorden van de tweede deelvraag wordt de leerlingen aangereikt dat de golflengte door middel van modulatie opgerekt kan worden en verdiepen de leerlingen zich in wat moduleren inhoudt.

Vervolgens gaan ze hiermee in de tweede stap aan de slag. Ze passen de eerder ontwikkelde meetmethode aan en komen tot een verbeterde relatie:  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ . In de derde stap wordt dan weer de tot dan toe ontwikkelde meetmethode geëvalueerd, ditmaal door een meting uit te voeren en te constateren dat dit nog niet tot de verwachte waarde voor de lichtsnelheid leidt.

*Deelvraag 3 – Hoe elimineren we de optredende systematische fout in de metingen?*

Wederom is de verwachting dat het evalueren van de meetmethode leidt tot de behoefte de volgende deelvraag, gekoppeld aan het derde lokale motief, te willen beantwoorden: de behoefte om deze onjuiste waarde voor  $c$  te verklaren (*lokaal motief 3*).

Het beantwoorden van de derde deelvraag start weer met een eerste stap. Hierin wordt eerst de voorkennis ten aanzien van systematische fouten opgeroepen om vervolgens in te kunnen zien dat een extra faseverschil in de meetopstelling de onjuiste meetwaarden kan verklaren.

Daarna verdiepen de leerlingen zich verder in de meetopstelling om de oorsprong van deze systematische fout te kunnen begrijpen. Het was een bewuste keuze deze systematische fout in de opstelling te handhaven om zo een aanleiding te creëren om duidelijk te maken dat een experimenteel fysicus altijd alert op systematische fouten moet zijn en dat gezocht kan worden naar manieren om deze bij het verwerken van de data te elimineren.

Naar de leerlingen toe wordt uitgelegd dat, omdat de opstelling niet binnen handbereik is, de systematische fout uit de meetgegevens geëlimineerd zal moeten worden terwijl het eigenlijk eenvoudiger zou zijn om simpelweg kabels van gelijke lengte te gebruiken. Hiermee wordt de situatie wat eenvoudiger voorgesteld dan de werkelijkheid, maar de verwachting is dat wel bij de leerlingen zal overkomen dat het belangrijk is alert te zijn op systematische fouten en dat grafieken een belangrijke rol kunnen spelen bij het elimineren van de fouten.

Bij de tweede stap zoeken de leerlingen uit hoe de systematische fout te omzeilen is door de helling van het  $\Delta\varphi, \Delta x$ -diagram te gebruiken. De ontwikkelde meetmethode wordt in de derde stap wederom geëvalueerd door de benodigde metingen uit te voeren en te verwerken wat nu wel tot de juiste waarde voor de lichtsnelheid blijkt te leiden.

## Activiteiten Deel 2

### Scherf 05

---

Scherf 05 bevat een beschrijving van de meetopstelling waar geen opdrachten aan gekoppeld zijn.

### Scherf 06

---

#### *Opdracht 7 – Faseverschil (Deelvraag 1, Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Bij opdracht 7 moeten de leerlingen aangeven hoe groot het faseverschil tussen twee punten van een lopende golf in een animatie is en vervolgens de relatie tussen afstand, golflengte en faseverschil geven. Doel van deze opgave is de relevante voorkennis ten aanzien van het faseverschil op te roepen.

#### *Opdracht 8 – Relatie tussen $c, f, \Delta\phi$ en $\Delta x$ (Deelvraag 1, Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Vervolgens worden de leerlingen in de volgende opdracht gevraagd de eerder gegeven relaties te combineren tot een formule voor de lichtsnelheid waarin de golflengte niet meer voor komt. Doel van deze opgave is de relatie af te leiden die als basis voor de meetmethode zal fungeren:  $c = (\Delta\phi/\Delta x) \cdot f$ . Het scherm wordt afgesloten door op te merken dat nu de eerste stap in de richting van de meetmethode gezet is omdat, wanneer  $\Delta x$  in deze formule gezien wordt als de afstand tussen bron en detector, met deze formule de lichtsnelheid bepaald kan worden. Wel is er nog een probleem met het meten van de frequentie en er is nog iets over het meten van het faseverschil niet verteld.

### Scherf 07

---

#### *Opdracht 9 – Gereduceerd Faseverschil (Deelvraag 1, Stap 3: Meetmethode evalueren)*

De afsluiting van scherm 06 is een aanloop naar opdracht 9 waar de leerlingen eerst de gereduceerde fase tussen twee punten van een lopende golf in een animatie moeten bepalen. Vervolgens moeten ze aangeven wat dit betekent voor de afstand tussen bron en detector en voor welk praktisch probleem dit zorgt. Doel van deze opgave is de relevante voorkennis ten aanzien van het gereduceerde faseverschil op te roepen. De verwachting is dat de leerlingen zich realiseren dat de afstand tussen bron en detector kleiner moet zijn dan de golflengte van het gebruikte licht omdat de computer alleen het gereduceerde faseverschil kan meten.

De verwachting is dat bij de leerlingen nu de behoefte is opgeroepen een manier te vinden om de golflengte op te rekken (lokaal motief 2).

### Scherf 08

---

#### *Opdracht 10 – Snelheid van de modulatiegolf (Deelvraag 2, Stap 1: Meetopstelling)*

Op scherm 08 starten de leerlingen de beantwoording van de tweede deelvraag

## Hoofdstuk 4

in de ontwikkeling van de meetmethode. De leerlingen krijgen aangereikt dat de golflengte met behulp van modulatie kan worden opgerekt.

Doel van de opdracht is om de leerlingen aan de hand van een animatie vertrouwd te maken met het moduleren en de verwachting is dat de leerlingen ontdekken dat de golfsnelheid door het moduleren niet verandert.

### *Opdracht 11 – Golflengte van de modulatiegolf (Deelvraag 2, Stap 1: Meetopstelling)*

Vervolgens moeten ze bij opdracht 11 uitrekenen wat de golflengte van de modulatiegolf is. Doel hiervan is de leerlingen te dwingen om na te denken over de vraag of moduleren het probleem oplost. De verwachting is dat de leerlingen inzien dat, omdat de golflengte van het gemoduleerde licht 6 meter is, het probleem nu inderdaad opgelost is.

## Scherf 09

---

### *Opdracht 12 – Aanpassen van de relatie (Deelvraag 2, Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Bij opdracht 12 moeten leerlingen, aan de hand van een animatie waarin het moduleren wordt gevisualiseerd, aangeven welke frequentie bij gebruik van de modulatiegolf ingevuld moet worden in de afgeleide relatie om de lichtsnelheid te bepalen. Doel van deze opdracht is om de leerlingen te laten beseffen dat in de formule met de modulatiefrequentie gewerkt moet worden:  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$

## Scherf 10

---

### *Opdracht 13 – Eerste meting (Deelvraag 2, Stap 3: Meetmethode evalueren)*

Nu de meetmethode ontwikkeld lijkt, worden de leerlingen bij opdracht 13 gevraagd de eerste metingen te doen zodat de meetmethode geëvalueerd kan worden. Voordat ze hier de metingen starten wordt alvast een hint gegeven dat ze waarschijnlijk nog wel tegen een probleem aan zullen lopen. De leerlingen krijgen de opdracht om driemaal bij dezelfde afstand het gereduceerde faseverschil te meten en hieruit de lichtsnelheid te bepalen.

Doel van deze opdracht is de leerlingen de tot dan toe ontwikkelde meetmethode te laten evalueren. De verwachting is dat ze dan ontdekken dat ze uitkomen op een snelheid van ongeveer  $2 \cdot 10^8$  in plaats van  $3 \cdot 10^8$  m/s.

Nu de leerlingen een waarde voor de lichtsnelheid hebben gevonden die qua ordegröte in de buurt komt maar toch nog niet juist kan zijn, is de verwachting dat dit bij hen de behoefte oproept deze afwijkende waarde te verklaren (lokaal motief 3).

## Scherf 11

---

### *Opdracht 14 – Systematische fout (Deelvraag 3, Stap 1: Meetopstelling)*

Bij opdracht 14 wordt aangereikt dat er een systematische fout in de opstelling zit. De leerlingen moeten nu in een open vraag aangeven in welk van de grootheden  $\Delta x$ ,  $\Delta \varphi$  of  $f_{\text{mod}}$  deze fout waarschijnlijk zit en waarom.

Doel hiervan is de leerlingen na te laten denken over de oorsprong van de systematische fout. De verwachting is dat leerlingen vermoeden dat de systematische fout in de meting van het faseverschil zit.

Voorafgaand aan opdracht 15 krijgen de leerlingen aangereikt dat een verschil in lengte van de coaxkabels tussen detector en computer en bron en computer de systematische fout veroorzaakt.

### *Opdracht 15 – Oorzaak systematische fout (Deelvraag 3, Stap 1: Meetopstelling)*

Doel van opdracht 15 is leerlingen zicht te geven op de oorzaak van de systematische fout. De verwachting is dat de leerlingen aan de hand van een animatie zelf ontdekken welke gevolgen het verschil in kabellengte heeft voor het gemeten faseverschil en de gemeten lichtsnelheid.

## Scherf 12

---

### *Opdracht 16 – Systematische fout elimineren (Deelvraag 3, Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Bij opdracht 16 ontdekken de leerlingen hoe uit de meetgegevens de systematische fout geëlimineerd en de lichtsnelheid bepaald kan worden. Doel hiervan is dat de leerlingen zich bewust worden hoe de data verwerkt moeten worden.

Eerst moeten de leerlingen uit drie grafieken (lineair, met asafsnede door 0,  $<0$  en  $>0$ ) de grafiek kiezen die de data zou kunnen representeren wanneer de kabels tussen bron en computer en tussen detector en computer even lang zouden zijn. Vervolgens moeten ze dezelfde vraag beantwoorden, maar nu in het geval van ongelijke kabellengte. De verwachting is dat de leerlingen na afronding van opdracht 16 in staat zijn te beschrijven hoe uit de grafieken de systematische fout en de waarde voor de lichtsnelheid te bepalen zijn.

## Scherf 13

---

### *Opdracht 17 – Metingen (Deelvraag 3, Stap 3: Meetmethode evalueren)*

In de laatste opdracht van deel 2 worden de leerlingen gevraagd de metingen uit te voeren en de resultaten te verwerken tot de gemeten waarde voor de lichtsnelheid. Doel van deze opdracht is opnieuw te evalueren of de tot dan toe ontwikkelde meetmethode tot de verwachte waarde voor de lichtsnelheid leidt. De verwachting is dat de leerlingen in staat zullen zijn hier inderdaad de juiste waarde te berekenen op grond van hun meetdata.

De constatering dat de ontwikkelde meetmethode inderdaad tot een succesvolle bepaling van de lichtsnelheid in lucht leidt, zal de leerlingen naar verwachting nieuwsgierig maken naar de vraag of ze nu ook de lichtsnelheid in de andere media, die ze al in de opstelling hebben zien staan, kunnen bepalen. Dit levert het motief om aan deel 3 van de site te beginnen (lokaal motief 4).

### Scherf 14

---

Op scherm 14 wordt eerst teruggeblift naar de ontwikkelde meetmethode door de gezette stappen kort samen te vatten. Ook worden enkele stappen toegelicht aan de hand van voorbeelden van ander vergelijkbaar experimenteel onderzoek.

#### *Opdracht 18 – Vergeljkbare stappen (Afsluiting)*

Bij opdracht 18 moeten de leerlingen beschrijven of ze bij andere experimenten vergelijkbare stappen gezet hebben. Doel hiervan is deel 2 af te sluiten, de koppeling aan de handelingspraktijk van een experimenteel fysisus (waarin ook vergelijkbare stappen gezet worden) zo functioneel mogelijk te maken en een vooruitblik te geven op de stappen die in deel 3 (opnieuw) gezet moeten worden.

## 4.2.4 Fase 4: Proceduretoepassing

### Functie

De functie van deel 3 is het ‘toepassen van de ontwikkelde en geëvalueerde inhoudsspecifieke procedure in andere (vergeljkbare) situaties’. Of, meer specifiek, het toepassen van de ontwikkelde en geëvalueerde procedure voor het meten van de lichtsnelheid in lucht op het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht.

### Overzicht

Nu de leerlingen de meetmethode voor de bepaling van de lichtsnelheid in lucht succesvol hebben ontwikkeld en toegepast, wordt in deel 3 ‘Lichtsnelheid in andere media’ het laatste lokale motief uitgewerkt: De behoefte om na te gaan of  $c$  (zoals verwacht) ook in andere media kan worden bepaald (*lokaal motief 4*)

De verwachting is dat op zijn minst een deel van de leerlingen nu geheel zonder of in ieder geval met beperkte sturing de meetmethode in lucht kan aanpassen voor andere media. De verwachting is dat leerlingen kunnen bedenken dat het plaatsen van een ander medium tussen bron en detector over een deel van hun onderlinge afstand zal leiden tot een verticale verschuiving van de gemeten relatie in het  $\Delta\varphi, \Delta x$ -diagram ten opzichte van de eerder gemeten relatie bij het medium lucht. De opdrachten zijn erop gericht de leerlingen ervan bewust te maken dat uit deze verticale verschuiving de lichtsnelheid in het tussengeplaatste medium berekend kan worden.

### Activiteiten deel 3

#### Scherf 15

---

##### *Opdracht 19 – Tussenplaatsen van medium (Stap 1: Meetopstelling)*

Na een beschrijving van de aangepaste meetopstelling voor deel 3 worden de leerlingen gevraagd aan te geven wat er met de lichtsnelheid gebeurt bij een overgang van lucht naar een ander medium. Vervolgens volgt een vergelijkbare vraag wat dit voor de golflengte en ten slotte voor het faseverschil betekent.

Doel hiervan is de leerlingen op weg te helpen bij het aanpassen van de meetmethode door hen bewust te maken van de gevolgen voor het gemeten faseverschil bij tussenplaatsen van een medium.

De verwachting is dat de leerlingen zich door deze inleidende vragen realiseren dat als gevolg van het plaatsen van een medium het faseverschil groter zal zijn.

##### *Opdracht 20 – Met of zonder sturing (Stap 1: Meetopstelling)*

In de daaropvolgende opdracht 20 moeten ze in een open antwoord verwoorden hoe, naar hun idee, de meetmethode aangepast zou moeten worden. Op deze open vraag volgt geen feedback maar de keuze direct te starten met de metingen of toch eerst nog enige sturing te ontvangen.

De verwachting is dat slechts een deel van de leerlingen hier direct en zonder extra sturing met de metingen zal starten.

#### Scherf 16

---

##### *Opdracht 21 – Gevolg van tussenplaatsen medium voor grafiek (Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Bij opdracht 21 moeten de leerlingen voorspellen welke  $\Delta\phi, \Delta x$ -relatie het resultaat van de metingen met en zonder medium het best visualiseert.

Doel hiervan is de leerlingen bewust te maken van de manier waarop de gemeten relatie zal wijzigen als gevolg van het tussenplaatsen van het medium.

De verwachting is dat de leerlingen hier in staat zijn de relatie te kiezen waarbij het faseverschil dat gemeten is na tussenplaatsen van een medium constant verschoven is ten opzichte van de metingen zonder medium.

##### *Opdracht 22 – Afleiden relatie (scherf 16, Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Bij opdracht 22 moeten de leerlingen een bruikbare relatie afleiden waarmee de lichtsnelheid in een ander medium kan worden bepaald. Hiervoor krijgen ze eerst de opdracht de formule voor het faseverschil  $\Delta\phi$ , uitgedrukt in  $\Delta x$ ,  $c$  en  $f_{\text{mod}}$ , te herhalen. Vervolgens moeten ze het faseverschil uitdrukken in  $L$ ,  $\Delta x$ ,  $c$ ,  $c_m$  en  $f_{\text{mod}}$  voor de situatie dat er een medium met lengte  $L$  tussen bron en detector wordt geplaatst. En

ten slotte worden ze gevraagd de formule voor het extra faseverschil te geven. De leerlingen zouden moeten inzien dat deze laatste relatie bepaald kan worden door de eerdere twee relaties van elkaar af te trekken. Dat leidt tot de relatie

$$\Delta\varphi_{\text{extra}} = (L/c_m - L/c) \cdot f_{\text{mod}}.$$

### *Opgdracht 23 – Meetmethode (scherm 16, Stap 2: Meetmethode ontwikkelen)*

Nu de juiste relatie is afgeleid worden de leerlingen gevraagd de meetmethode te beschrijven. Ze ontvangen geen feedback meer op hun antwoord.

De verwachting is dat in ieder geval een deel van de leerlingen in staat is om te beschrijven hoe de bij opdracht 22 afgeleide relatie gebruikt kan worden, welke data verzameld moeten worden en hoe deze ten slotte verwerkt moeten worden.

### Scherms 17

---

### *Opgdracht 24 – Metingen (Stap 3: Meetmethode evalueren)*

Nu de meetmethode is aangepast kunnen bij opdracht 24 de meetgegevens verzameld en verwerkt worden. De verwachting is dat in ieder geval een deel van de leerlingen in staat is hier tot een juiste waarde voor de lichtsnelheid in de andere media (perspex en water) te komen.

### *Opgdracht 25 – Correcties voor glasplaatjes (Stap 3: Meetmethode evalueren)*

Als een soort bonusvraag moeten de leerlingen ten slotte bij de laatste opdracht, gebruik makend van de lege cuvet, de meetmethode aanpassen om te corrigeren voor de glasplaatjes die de cuvet met water aan de kopse kanten afsluiten.

## 4.2.5 Sturing van leerlingen

Om de leerlingen tijdens het doorlopen van het vragensysteem zicht te geven op (de voortgang van) hun leerproces en zo de inhoudelijke uitlijning te ondersteunen, worden de dragende en sturende elementen van de didactische structuur in een vroeg stadium geëxpliciteerd. Ze moeten gedurende de voorbereiding op en de uitvoering van het experiment voortdurend voor de leerlingen herkenbaar blijven, zodat zij op ieder moment weten waar ze mee bezig zijn en waarom. Dit is in het lesmateriaal op verschillende manieren vormgegeven. Ten eerste zijn op verschillende plekken in het materiaal *voortuitblikken* opgenomen waarin de dragende en sturende elementen expliciet worden gemaakt:

- Voordat de leerlingen inloggen op het vragensysteem wordt op scherm 00 kort beschreven hoe ze te werk zullen gaan bij het ontwikkelen van de meetmethode.
- Omdat de leerlingen scherm 00 waarschijnlijk vluchtig lezen en snel op de

‘Inloggen/aanmelden’-link zullen klikken, wordt deze tekst op scherm 01 grotendeels herhaald.

- In de afsluiting van deel 1 (op scherm 04) wordt de vooruitblik verder uitgewerkt door de hoofdvraag, de deelvragen en de werkwijze expliciet te maken.
- Ten slotte wordt in de afsluiting van deel 2 (scherm 14) de opdeling in hoofdvraag en deelvragen herhaald en worden de gezette stappen nog nader toegelicht.

Ten tweede is aan de website het zogenaamde ‘*Waar ben ik*’-window toegevoegd. Deze visualiseert de sturende en dragende elementen (in termen van de deelvragen en de terugkomende drie stappen) en laat zien waar de leerling zich in deze structuur bevindt. In de volgende sectie (4.3) wordt het ‘Waar ben ik’-window beschreven.

#### **4.2.6 Handelingspraktijk van de experimenteel fysisus**

De beschrijving van het lesmateriaal hierboven concentreerde zich op de uitwerking van de *linkerkolom* van de didactische structuur waarin de specifieke procedure ontwikkeld wordt. Hieronder zal nu worden ingegaan op de *rechterkolom* van de didactische structuur (Figuur 3-8 in hoofdstuk 3): de handelingspraktijk van een experimenteel fysisus. In het lesmateriaal is de handelingspraktijk uitgewerkt door regelmatig de handelingen van de leerlingen bij het ontwikkelen van de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht te relateren aan handelingen van een experimenteel fysisus. Deze koppelmomenten zijn in het materiaal herkenbaar omdat ze steeds in een blauw kader geplaatst zijn.

De eerste verbinding naar de handelingspraktijk van de experimenteel fysisus wordt gelegd op scherm 01 met een korte oriëntatie op het werk van een experimenteel fysisus. Zonder nogmaals te verwijzen naar de handelingspraktijk van de experimenteel fysisus wordt daarna in de afsluiting van deel 1 (scherm 04) de algemene procedure geëxpliciteerd door zowel de hoofdvraag en de deelvragen als de drietraps werkwijze te beschrijven. Na afronding van de eerste deelvraag (scherm 07), waarbij gezocht werd naar een manier om het golfkarakter in te zetten, wordt de eerste concrete parallel gelegd met het werk van een experimenteel fysisus die ook gebruik maakt van natuurkundige theorieën waarin de te meten grootte een rol speelt.

Vervolgens wordt, na afronding van de tweede deelvraag (scherm 10), waarbij het moduleren uitgewerkt wordt als methode om de golflengte op te rekken, de tweede concrete parallel gelegd met het werk van een experimenteel fysisus die ook vaak signalen manipuleert in de meetopstelling om de meetmethode werkbaar te maken. De derde concrete verbinding wordt gelegd, analoog aan de andere deelvragen, na afronding van de derde deelvraag (scherm 13). De leerlingen worden erop gewezen dat zij nu, net als een experimenteel fysisus, bezig zijn geweest met het elimineren



van een systematische fout. In de daaropvolgende afsluiting van deel 2 (scherm 14) worden via een ‘meer informatie’-link nog andere voorbeelden van het manipuleren van data en andere voorbeelden van systematische fouten gegeven.

Deel 2 wordt afgesloten met een blauw kader waarin in algemene termen kort de kern van het werk van een experimenteel fysicus wordt herhaald.

### 4.3 Vormelementen

#### 4.3.1 Inleiding

De vormelementen zijn een belangrijk onderdeel van de website. Ze moeten de inhoudelijke uitlijning zodanig ondersteunen dat de leerlingen zelfstandig voldoende zicht op hun eigen onderwijsleerproces ontwikkelen en houden.

#### 4.3.2 Vragensysteem

##### Functie

Het vragensysteem vormt de motor van de site door op ieder moment de juiste vragen, feedback of achtergrondinformatie te genereren en moet de leerlingen begeleiden door hen te activeren en controleren. Door de leerlingen een stelsel van functionele opdrachten te laten beantwoorden worden zij gestuurd in het oproepen van inhoudelijke motieven en werken ze actief aan het ontwikkelen van de meetmethode. De eerste opdrachten zijn niet te moeilijk en geven de leerlingen de gelegenheid aan het systeem en de inhoud te wennen. Gaandeweg lopen de leerlingen tegen allerlei problemen met de meetopstelling en meetmethode aan, die ze vervolgens zelf, gestuurd door het systeem, oplossen om zo de meetmethode steeds verder te ontwikkelen. De vragen zijn zodanig opgesteld dat problemen niet omzeild of voorgekauwd worden, maar dat de leerlingen een actieve rol spelen bij het oplossen ervan. Het vragensysteem geeft gerichte hulp, zodat het tegen problemen aanlopen geen vastlopen wordt. Het vragensysteem helpt bij het doseren van de theorie en problemen. Het maakt het mogelijk om in te spelen op de al bestaande kennis en te bevorderen dat deze wordt uitgebreid op momenten dat leerlingen hier behoefte aan hebben.

##### Architectuur

Het vragensysteem is binnen dit onderzoek door Verwer (2005) ontwikkeld in het kader van een afstudeeronderzoek. De achterliggende architectuur is opgezet als combinatie van server-side Php-scripts (versie 4.3.9) met een MySQL-database (4.1.22) en draait op een Apache webserver 2.0.52.

De scripts structureren en verzorgen de verschijning van de vragen, controleren de antwoorden en geven feedback. De inhoud van de vragen, de juiste antwoorden en de feedback zijn opgeslagen in de database. Door deze opzet wordt de inhoud volledig automatisch maar op flexibele wijze gegenereerd. Het wijzigen van de inhoud betekent slechts het wijzigen van het betreffende record in de database. Dit biedt ook mogelijkheden om bijvoorbeeld met betrekkelijk weinig moeite een engelstalig versie van de site te genereren. Ook maakt deze architectuur het mogelijk om een overzicht te genereren van de door de leerlingen gegeven antwoorden. Bovendien kunnen de leerlingen eventueel tussentijds stoppen om op een later moment weer in te loggen en, met behoud van alle eerder gegeven antwoorden, doorverwezen te worden naar de pagina waar ze gebleven waren.

De scripts kijken de antwoorden na, voorkomen herhaaldelijk beantwoorden van dezelfde vraag en controleren of de leerlingen alle vragen beantwoorden en maken hen er zonnodig op attent dat ze iets vergeten zijn.

Verder is het vragensysteem platformafhankelijk. Er hoeft dus geen additionele software geïnstalleerd te worden en de leerlingen hebben alleen een webbrowser nodig om het experiment te kunnen uitvoeren.

### **Werkwijze**

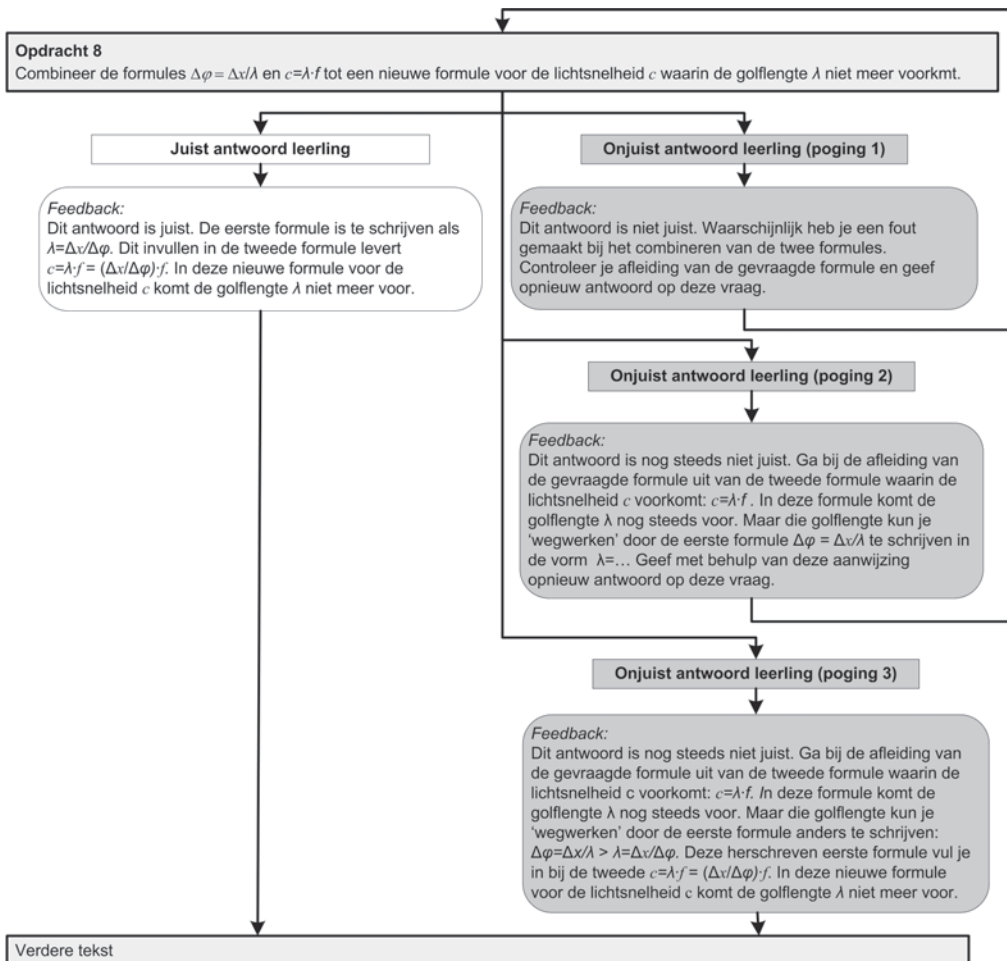
Om de leerlingen te dwingen alle vragen met zorg te beantwoorden is in het systeem ingebouwd dat er, tenzij ze op de vraag herhaaldelijk niet het juiste antwoord geven, geen volgende vraag volgt wanneer een onjuist antwoord gegeven is. De feedback die de leerlingen ontvangen op een onjuist antwoord moet hen helpen de vraag wel juist te beantwoorden.

De feedback speelt zoveel mogelijk in op de te verwachten denkfouten van de leerlingen. Wanneer de leerlingen het juiste antwoord geven, wordt in de feedback de redenering achter het juiste antwoord toch nog gegeven. Hierdoor wordt gewaarborgd dat (per ongeluk) juiste antwoorden met verkeerde motiveringen toch nog gecorrigeerd worden en de leerlingen niet met onjuiste denkbeelden blijven zitten.

Bij sommige vragen is de feedback voor alle onjuiste antwoorden dezelfde, maar bij andere opdrachten wordt de hulp die de leerlingen ontvangen in de feedback steeds verder uitgebouwd, zoals bijvoorbeeld bij opdracht 8 (scherm 06).

In figuur 4-3 is ter illustratie de opbouw van de feedback op opdracht 8 weergegeven. De kaders aan de rechterzijde geven van boven naar beneden respectievelijk de feedback op het eerste, tweede en derde onjuiste antwoord.

## Hoofdstuk 4



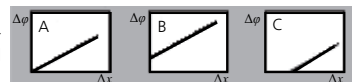
**Figuur 4-3** - Voorbeeld van feedback die afhankelijk is van de antwoordpoging.

De tekst in het linkerblok is de feedback die de leerlingen ontvangen op een juist antwoord. De teksten in de rechterkolom geven respectievelijk de feedback op een eerste, tweede en derde onjuiste poging.

Bij andere vragen wordt, anticiperend op mogelijke problemen van leerlingen, bij een onjuist antwoord eerst een tussenvraag gesteld. Het antwoord dat de leerlingen geven is dan bepalend voor de volgende vraag die gesteld wordt. Dit is bijvoorbeeld het geval bij opdracht 16b (scherm 12). Deze vraag luidde:

Opdracht 16, onderdeel b

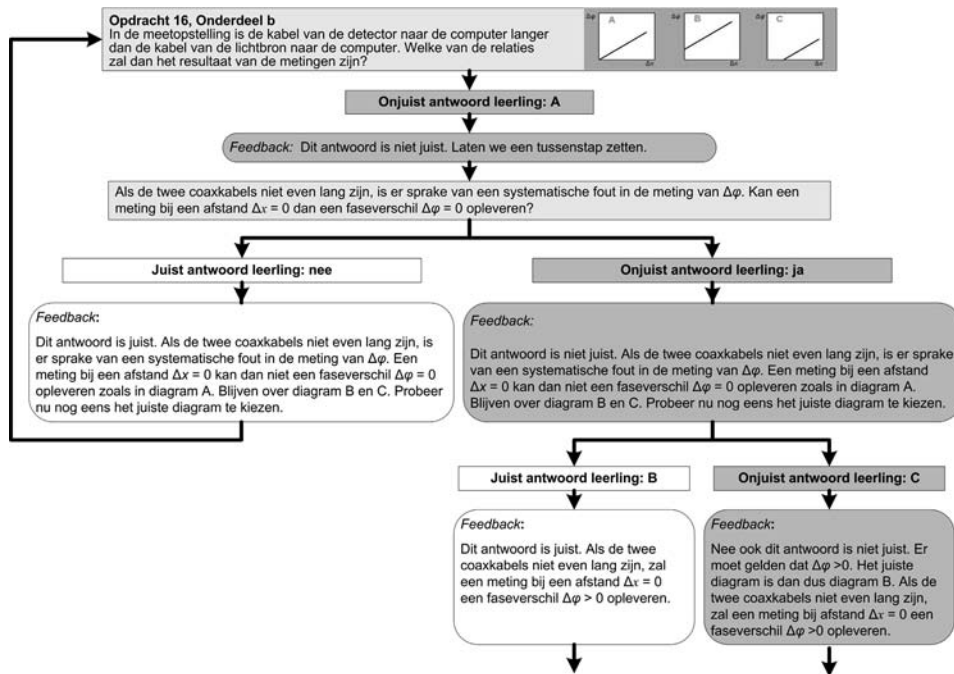
In de meetopstelling is de kabel van de detector naar de computer langer dan de kabel van de lichtbron naar de computer. Welke van de relaties zal dan het resultaat van de metingen zijn?



Als de leerlingen het juiste antwoord 'B' geven dan verschijnt de feedback:

"Juist. Als de twee coaxkabels niet even lang zijn, zal een meting bij afstand  $\Delta x = 0$  een faseverschil  $\Delta\varphi > 0$  opleveren."

Hiermee is voor deze leerlingen onderdeel b afgerond en verschijnt onderdeel c. Als zij echter een onjuist antwoord geven wordt met tussenvragen geprobeerd de leerlingen alsnog het juiste antwoord te laten inzien. Figuur 4-4 laat een voorbeeld zien. Om het overzicht leesbaar te houden is hierin slechts één onjuist antwoord ('A') uitgewerkt.



**Figuur 4-4** Feedbackstructuur wanneer een leerling bij opdracht 16b antwoord A geeft.

Het gegeven antwoord (A in dit geval) bij opdracht 16b bepaalt welke volgende vraag gesteld wordt. Het antwoord in het witte blok is het juiste antwoord, de donkergrijze blokken geven de feedback die achtereenvolgens op drie onjuiste antwoorden ('A', 'ja' en 'C') gegeven wordt. De tekst in de vierkante lichtgrijze kaders geeft de vraagtekst weer.

Deze flexibiliteit van het vragensysteem biedt mogelijkheden om de begeleiding af te stemmen op de individuele leerling.

## Vraagtypen

Het vragensysteem is opgebouwd uit vragen van verschillende typen.

Er worden regelmatig *open vragen* ingezet. De feedback op de open vragen geeft steeds het juiste antwoord<sup>4</sup> en daarbij de opdracht om het eigen antwoord te vergelijken met dit voorbeeldantwoord. Er is gekozen voor deze vorm omdat dit eigen input van leerlingen toelaat en daardoor de openheid vergroot en mogelijk bijdraagt aan

4 Behalve in deel 3 waar leerlingen hun ideeën over de meetmethode in andere media moeten geven. Op deze vraag (opdracht 20, scherm 15) ontvangen de leerlingen geen inhoudelijke feedback.

## Hoofdstuk 4

het gevoel zelf de meetmethode mee te ontwikkelen. De open vragen hebben ook een reflectieve en vooruitkijkende functie omdat ze de leerlingen dwingen tot het zelf formuleren van wat ze tot dan toe gedaan hebben of verwachten te gaan doen. Voorbeelden van zulke open vragen zijn:

- Het laatste onderdeel van opdracht 13 (scherm 10) wanneer de leerlingen voor de eerste maal metingen hebben gedaan en moeten aangeven of dit het resultaat oplevert dat ze verwacht hadden.
- Opdracht 14 (scherm 11) waar de leerlingen gevraagd worden vooruit te kijken naar het eerstvolgende probleem dat opgelost moet gaan worden.
- Opdracht 16 (scherm 12) waar de leerlingen bestudeerd hebben hoe de gemeten relatie eruit zal zien en zij zelf moeten formuleren hoe ze hieruit de systematische fout en de waarde voor de lichtsnelheid kunnen bepalen.

Ook worden er vragen gesteld waarop een numeriek antwoord gegeven moet worden: *numerieke vragen*. Deze zijn te herkennen aan een kleiner invoerveld. Om fouten met de dimensie te voorkomen en de gokkansen te verkleinen moet in sommige gevallen niet alleen het numerieke antwoord worden ingevoerd maar ook de daarbij behorende eenheid, zoals bijvoorbeeld bij opdracht 6 (scherm 03):

**Opdracht 6**  
In de meetopstelling van dit experiment gebruiken we rood licht.  
Hoe groot is (ongeveer) de golflengte van rood licht

kies een eenheid ▼  
verstuur antwoord -> kies een eenheid  
meter  
centimeter  
nanometer

**Figuur 4-5** Voorbeeld van een opdracht waarop een numeriek antwoord met eenheid moet worden gegeven.

Van het gegeven antwoord wordt gecontroleerd of het binnen bepaalde marges valt om te voorkomen dat slechts één antwoord goed kan zijn of dat een antwoord door een afrondingsverschil onterecht fout wordt gerekend.

Een semi-gesloten vraagtype dat bijvoorbeeld bij opdracht 08 (scherm 06) en 22 (scherm 16) wordt ingezet zijn de *formule-vragen* (figuur 4-6).

**Opdracht 8**  
Combineer de formules  $\Delta\phi = \Delta x/\lambda$  en  $c = \lambda \cdot f$  tot een nieuwe formule voor de lichtsnelheid  $c$  waarin de golflengte  $\lambda$  niet meer voorkomt.  
Vul hieronder de juiste formule in door op de beschikbare symbolen te **klikken**.  
(Vergeet niet het vermenigvuldigingsteken  $\times$  te gebruiken bij een vermenigvuldiging)

( ) + -  $\times$  /  $\Delta x$   $\Delta\phi$   $\lambda$   $f$

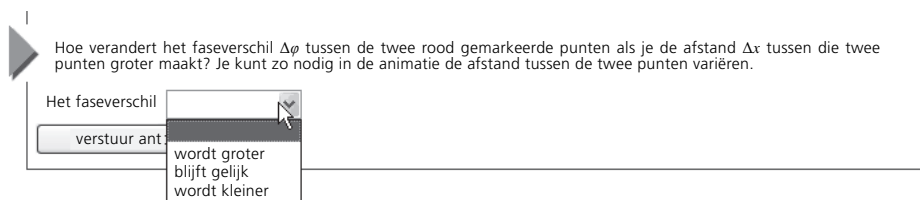
Gegeven formule tot nu toe:  $c =$  opnieuw

verstuur antwoord->

**Figuur 4-6** Voorbeeld van een formule vraag

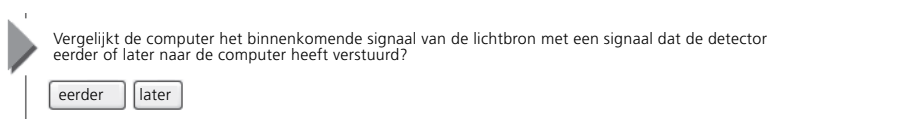
Dit zijn vragen waarbij het antwoord een formule is die ingevoerd moet worden door de gewenste symbolen en operator achtereenvolgens aan te klikken. Er is voor deze werkwijze gekozen om automatisch nakijken makkelijk te maken.

Ten slotte zijn er ook *meerkeuzevragen* ingezet. Deze moeten via een dropdown-menu of met knoppen beantwoord worden. Opdracht 7 (scherm 06) geeft een voorbeeld zo'n dropdown-antwoord:



**Figuur 4-7** Voorbeeld van een vraag waarop een dropdown-antwoord moet worden gegeven

Opdracht 15 (scherm 11) geeft een voorbeeld van een knoppen-antwoord:



**Figuur 4-8** Voorbeeld van een opdracht waarbij het antwoord gegeven wordt door op een knopje te klikken

### 4.3.3 Waar ben ik –window

Een belangrijk ondersteunend element om te waarborgen dat de leerlingen op ieder moment weten waar ze mee bezig zijn, is het 'Waar ben ik'-window (figuur 4-9). Het 'Waar ben ik'-window blijft steeds zichtbaar aan de rechterzijde van het scherm terwijl de leerlingen het materiaal doorlopen en draagt op verschillende manieren bij aan het vasthouden van de rode draad.

Eenzijds visualiseert het de structuur die op scherm 04 beschreven wordt als inhoudelijke vooruitblik op de werkwijze. Doordat het 'Waar ben ik'-window op ieder scherm weer verschijnt houden de leerlingen dus continu zicht op deze structuur. Bovendien fungeert het als een status-window dat op ieder moment voor de leerlingen zichtbaar maakt welke onderdelen ze reeds afgerond hebben (met zwarte letters), welke onderdelen nog zullen volgen (met grijze letters) en waar zij zich op het betreffende moment bevinden (met blauwe letters en rood pijltje). De leerlingen hebben zo niet alleen steeds zicht op de rode draad van het materiaal, maar weten ook nog eens waar zij zich op die rode draad bevinden.

Experimenteren op afstand

## De lichtsnelheid

welkom algemene info docenten experiment data verwerken/download

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 2. Golfkarakter gebruiken | Meetmethode ontwikkelen

Hoe is met deze meetopstelling nu de lichtsnelheid te bepalen? In de meetopstelling is de afstand  $\Delta x$  tussen zender en detector in te stellen. Het idee achter de meetmethode is dat de lichtbron een lopende lichtgolf naar de detector stuurt, en dat de fasen van de lichttrilling bij de lichtbron en bij de detector van elkaar verschillen. Het verwerkingsprogramma in de computer kan dit faseverschil  $\Delta\phi$  tussen het uitgezonden en ontvangen lichtsignaal meten. De vraag is nu hoe je uit een meting van de afstand  $\Delta x$  en het daarbij gemeten faseverschil  $\Delta\phi$  de lichtsnelheid  $c$  kunt bepalen. Dat zoek je uit in de volgende twee opdrachten.

**Opdracht 7**

Bekijk de volgende animatie van een lopende golf, en geef antwoord op de vragen die eronder staan.

start stop reset      verander  $\Delta x$  tussen de ●-en      groter kleiner

Hoe groot is het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee rood gemarkeerde punten van de lopende golf?

Jouw antwoord: 1.5

Dit antwoord is juist. De afstand  $\Delta x$  tussen de twee rood gemarkeerde punten is gelijk aan anderhalve golflengte van de lopende golf. Voor het faseverschil tussen de twee punten geldt dan:  $\Delta\phi = 1,5$

1. Lichtsnelheid
  1. Experimenteren op afstand
  2. Lichtsnelheid meten
  3. Licht als golfverschijnsel
2. Lichtsnelheid in lucht
  1. Inleiding
  2. Golfkarakter gebruiken
    - Meetopstelling
    - Meetmethode ontwikkelen
    - Meetmethode evalueren
  3. Lichtsignaal moduleren
    - Meetopstelling
    - Meetmethode ontwikkelen
    - Meetmethode evalueren
  4. Systematische fout elimineren
    - Meetopstelling
    - Meetmethode ontwikkelen
    - Meetmethode evalueren
5. Afsluiting
3. Lichtsnelheid in andere media
  - Meetopstelling
  - Meetmethode ontwikkelen
  - Meetmethode evalueren

**Figuur 4-9** Het 'Waar ben ik'-window.

Het 'Waar ben ik'-window bevindt zich steeds aan de rechterzijde van het scherm en visualiseert waar de leerling zich in het materiaal bevindt.

Ten slotte kan het window ook gebruikt worden om zowel voor- als achteruit in het materiaal te bladeren. Door te klikken op een regel boven het rode pijltje verschijnt het desbetreffende scherm in een apart scherm (zie figuur 4-10).

**1. Lichtsnelheid | 3. Licht als golfverschijnsel**

Christiaan Huygens  
(1629-1695)

Het bepalen van de lichtsnelheid uit een meting van afstand en tijd is praktisch niet uitvoerbaar – tenminste: niet op laboratoriumschaal zonder zeer geavanceerde meetapparatuur. Is die lichtsnelheid dan op een andere manier te bepalen? Is er een theorie over het karakter van licht die we daarvoor kunnen gebruiken? Het antwoord op die vraag is: ja, zo'n theorie is er – de theorie over het golfkarakter van licht. In de zeventiende eeuw is Christiaan Huygens (1629-1695) op zoek naar een verklaring voor de breking van licht aan het grensvlak van twee doorzichtige stoffen. Hij kan dit verschijnsel uiteindelijk verklaren door aan te nemen dat licht een golfkarakter heeft. Zoals je weet is er dan volgens de theorie van trillingen en golven 'iets' dat trilt met een frequentie  $f$ . Die trilling veroorzaakt een lopende golf met een golflengte  $\lambda$  die zich met de golfsnelheid  $v$  voortplant door een medium – lucht, glas, water of nog iets anders. Bij licht zou die golfsnelheid dan de lichtsnelheid  $c$  zijn.

Volgens de theorie van trillingen en golven is er tussen die drie grootheden – frequentie, golflengte en lichtsnelheid – een bepaalde relatie. Een relatie die mogelijk bruikbaar is bij het ontwikkelen van een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid.

**Opdracht 5**

Wat is volgens de theorie van trillingen en golven de relatie tussen de frequentie  $f$ , de golflengte  $\lambda$  en de lichtsnelheid  $c$ ? Vul hieronder de juiste formule in door op de beschikbare symbolen te klikken.  
(Vergeet niet het vermenigvuldigingsteken X te gebruiken bij een vermenigvuldiging.)

Jouw antwoord:  $c = \lambda \times f$

De juiste relatie is inderdaad  $c = \lambda \times f$

Met gebruik van de theorie over het golfkarakter van licht en de theorie over trillingen en golven is dus de lichtsnelheid te bepalen door het meten van de golflengte en de frequentie. Misschien heb je in de natuurkundelessen al eens eerder net zoiets gedaan: het meten van de golfsnelheid in een snaar (> meer informatie). Het bepalen van de lichtsnelheid uit een meting van golflengte en frequentie levert echter meer problemen dan het bepalen van de golfsnelheid in een snaar. De trilling van een snaar is zichtbaar te maken, zodat je de golflengte kunt meten. En de frequentie is te bepalen uit een weergave van het geluid van de trillende snaar op het scherm van een oscilloscoop. Maar hoe doe je dat dan bij licht? Een eerste probleem is: hoe meet je de golflengte en de frequentie van een lichtgolf? En daarbij komt nog een tweede probleem: de grootte-orde van de golflengte en de frequentie van licht.

**Figuur 4-10** Voorbeeld van een terugbladerscherm.

Dit scherm wordt geopend bij klikken op de link naar een afgerond onderdeel in het 'Waar ben ik'-window (zwarte letters)

De eerder door de leerling gegeven antwoorden en daarop ontvangen feedback is hierbij ook zichtbaar. Klikken op een regel van het materiaal dat nog bestudeerd moet worden opent ook het scherm in een nieuw window, maar dan uiteraard zonder antwoorden en feedback.

#### 4.3.4 Opbouw van de schermen

De opbouw van de pagina's ondersteunt zowel qua opzet als qua vormgeving de inhoudelijke uitlijning.

##### Opzet

Bij het uitwerken van het materiaal is geprobeerd de hoeveelheid tekst per pagina beperkt te houden. Een middel dat is ingezet om dit te verwezenlijken zijn de 'Verder'-knoppen. Pas wanneer er op deze 'Verder'-knop wordt geklikt, wordt er tekst aan het scherm toegevoegd en het scherm dus verder opgebouwd. Hierdoor wordt dus niet alle tekst tegelijk gepresenteerd. Bij het opbouwen van het scherm verspringt een rood pijltje (met zelfde opmaak als het rode pijltje dat in het 'Waar ben ik'-window laat zien waar de leerling zich bevindt) mee op het scherm om aan te geven waar precies de leerling op het scherm verder moet gaan met lezen. Om te voorkomen dat het beperken van de hoeveelheid informatie per scherm ook tot inhoudelijke versnippering zou leiden, is de opbouw van de pagina's zodanig gekozen dat deze de inhoud ondersteunt. De inhoudelijke ondersteuning is uitgewerkt door op ieder scherm eerst terug te koppelen naar waar de leerlingen tot dan toe mee bezig waren, vervolgens de meetmethode verder uit te bouwen en ten slotte de pagina af te sluiten met alvast een vooruitwijzing naar de volgende pagina. Wanneer bijvoorbeeld gekeken wordt naar scherm 06 (Golfkarakter gebruiken | Meetmethode ontwikkelen) dan zijn de inleiding, het nieuwe deel en de afsluiting duidelijk herkenbaar. Eerst kadert de inleiding het probleem in en koppelt scherm 06 aan de meetopstelling die in het vorige scherm behandeld is:

Hoe is met deze meetopstelling nu de lichtsnelheid te bepalen? In de meetopstelling is de afstand  $\Delta x$  tussen zender en detector in te stellen. Het idee achter de meetmethode is dat de lichtbron een lopende lichtgolf naar de detector stuurt, en dat de fasen van de lichttrilling bij de lichtbron en bij de detector van elkaar verschillen. Het verwerkingsprogramma in de computer kan dit faseverschil  $\Delta\varphi$  tussen het uitgezonden en ontvangen lichtsignaal meten. De vraag is nu hoe je uit een meting van de afstand  $\Delta x$  en het daarbij gemeten faseverschil  $\Delta\varphi$  de lichtsnelheid  $c$  kunt bepalen. Dat zoek je uit in de volgende twee opdrachten.

**Figuur 4-11** Inleiding van scherm 06

Vervolgens gaat het materiaal door met het ontwikkelen van de meetmethode door eerst de voorkennis over faseverschil op te roepen en vervolgens de leerlingen de



relatie tussen faseverschil, de golflengte en de afstand tussen de twee punten te laten geven en hen een formule voor  $c$  te laten afleiden waarin de golflengte niet meer voorkomt. Tenslotte wordt het scherm afgesloten met een samenvatting en een vooruitwijzing naar het volgende probleem dat opgelost moet worden:

Met de formule uit opdracht 8 heb je een eerste stap gezet in de richting van een meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Want: als je de lichtbron en de detector in de meetopstelling opvat als twee punten van een lopende lichtgolf, dan is de afstand  $\Delta x$  tussen die twee punten te meten. Verder kan het verwerkingsprogramma in de computer het faseverschil  $\Delta\varphi$  tussen die twee punten in de lichtgolf meten. Blijft over de vraag hoe je de frequentie  $f$  kunt meten. Dat probleem los je op in de tweede stap. Maar eerst zit je nog met een ander probleem: wat er tot nu toe is gezegd over het meten van dat faseverschil klopt niet helemaal...

**Figuur 4-11** Inleiding van scherm 06

Deze opbouw herhaalt zich dan weer bij het volgende scherm 07 waar in de inleiding eerst de afgeleide formule uit scherm 06 wordt herhaald waarna wordt ingehaakt op het in scherm 06 al aangekondigde probleem, etc.

De tot nu toe ontwikkelde meetmethode lijkt vrij eenvoudig: meet de afstand  $\Delta x$  en het faseverschil  $\Delta\varphi$  tussen twee punten (de lichtbron en de detector) in de lopende lichtgolf, en bepaal de lichtsnelheid  $c$  met de formule  $c = (\Delta x / \Delta\varphi) \cdot f$  uit opdracht 8. Er is echter wel een probleem. Tot nu toe is gezegd dat het verwerkingsprogramma in de computer het faseverschil  $\Delta\varphi$  tussen twee punten (de lichtbron en de detector) in de lopende lichtgolf kan meten. Dat is niet helemaal juist. Het verwerkingsprogramma in de computer kan namelijk van de twee binnenkomende signalen (van de lichtbron en de detector) alleen de gereduceerde fase meten en daaruit het gereduceerd faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{red}}$  tussen die twee punten berekenen. Of, met andere woorden: het verwerkingsprogramma in de computer kan niet 'zien' hoeveel volledige golven er tussen de lichtbron en de detector zitten. Het verwerkingsprogramma in de computer meet dus het gereduceerd faseverschil. De vraag is nu wanneer dat gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{red}}$  gelijk is aan het faseverschil  $\Delta\varphi$  uit de bij opdracht 8 gevonden formule. In de volgende opdracht ga je na wanneer het gereduceerd faseverschil en het faseverschil tussen twee punten op een lopende golf aan elkaar gelijk zijn, en tegen welk praktisch probleem je dan aanloopt.

**Figuur 4-13** Inleiding van scherm 07

Door zo steeds per pagina een vooruit- en terugblik te bieden blijven de leerlingen de rode draad zien en wordt ervoor gezorgd dat de separate schermen niet te veel op zichzelf komen te staan.

Naast deze gestructureerde opbouw van de afzonderlijke schermen zijn er op sleutelmomenten overzichtspagina's ingevoegd (scherm 00, 04 en 14) waar het tot dan toe behandelde op een rij wordt gezet. Deze sleutelpagina's geven de leerling, voor ze verder gaan met volgende deel, de kans de kernpunten tot zich door te laten dringen.

### Vormgeving

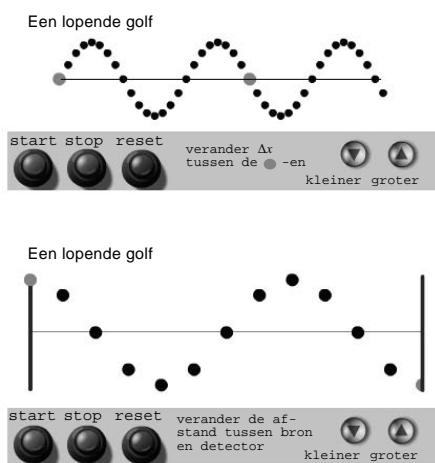
De ondersteuning door middel van de vorm wordt gegeven door een consequente een consistente layout en opmaak aan te houden.

De lay-out van de pagina's is zakelijk gehouden om niet te veel af te leiden van de vragen. Het consistent kleur- en fontgebruik visualiseert om welk type informatie

het gaat. Zo is de vraagtekst altijd in blauw, inleidende tekst in zwart, wordt het antwoord van de leerling altijd vetgedrukt in blauw herhaald, verschijnt feedback op een juist antwoord in groen en feedback op een onjuist antwoord in rood en geeft een vinkje voor het antwoord aan of het gegeven antwoord juist was.

### 4.3.5 Animaties

Bij vijf opdrachten zijn animaties ingezet. De animaties zijn gemaakt met behulp van Flash 8. De eerste twee opdrachten (07 (scherm 06) en 09 (scherm 07)) moeten bijdragen aan het oproepen van de voorkennis ten aanzien van het faseverschil en het gereduceerde faseverschil. De animaties tonen een lopende golf en de leerling kan de afstand tussen twee gemarkeerde punten in de lopende golf groter of kleiner maken. Door de lopende golf even stil te zetten kan de leerling de afstand tussen de twee punten makkelijker bepalen. De eerste animatie moest de leerlingen helpen bij het herinneren wat de definitie van faseverschil tussen twee punten in een lopende golf is. De tweede animatie hielp bij het vertalen van deze voorkennis naar de situatie van het lichtsnelheidsexperiment.



**Figuur 4-14** Animaties van opdracht 7 (boven) en opdracht 9 (onder).

*Doel van deze animaties was bij te dragen aan het oproepen en relevant maken van de voorkennis over faseverschil.*

Doel van de daaropvolgende twee animaties (opdracht 10 op scherm 08, opdracht 12 op scherm 09) was de leerlingen te laten inzien wat moduleren is. Dit is voor leerlingen een nieuw en in eerste instantie lastig te begrijpen fenomeen. De animaties zijn erop gericht om de effecten van het moduleren te leren kennen en zo in te zien dat deze het geconstateerde probleem van de te korte golflengte oplossen.

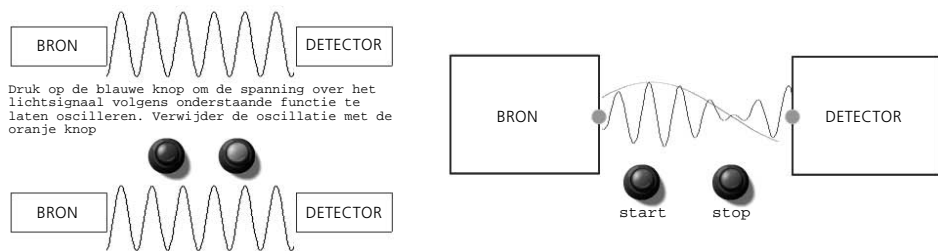
De animatie in opdracht 10 visualiseert het moduleren. De animatie toont twee lopende golven tussen de bron en de detector met een golflengte die kleiner is dan de afstand tussen de bron en detector. Vervolgens kan de leerling in de animatie één

van de signalen moduleren en constateren wat er dan met het signaal gebeurt:

- de golflengte van de omhullende golf is groter dan die van de lichtgolf,
- de golfsnelheid verandert niet.

De animatie visualiseert zo dus hoe het moduleren een oplossing voor het eerder geconstateerde probleem van de te kleine golflengte zou kunnen zijn.

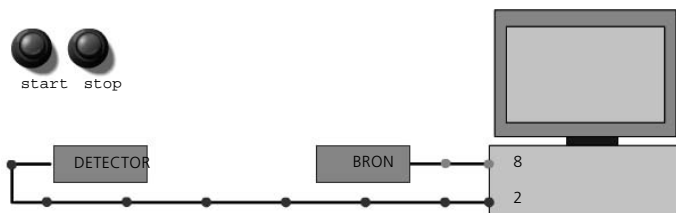
Opdracht 12 toont dezelfde animatie nogmaals, maar nu met een stopknop waarmee de lopende golf stil kan worden gezet. Doel van deze animatie is te visualiseren dat het moduleren inderdaad een oplossing biedt. Door deze stopknop te gebruiken kan geconstateerd worden dat de golflengte van de gemoduleerde golf nu, zoals gewenst, groter is dan de afstand tussen bron en detector.



**Figuur 4-15** Animaties van opdracht 10 (links) en opdracht 12 (rechts)

*Deze animaties hadden tot doel te visualiseren dat het moduleren een oplossing biedt voor het probleem van de te kleine golflengte tussen bron en detector.*

De vijfde animatie is ingezet bij opdracht 15 (scherm 11) om de leerlingen te helpen bij het begrijpen van de oorsprong van de systematische fout. De animatie visualiseert hoe de signalen van de detector (groen) vertraagd aankomen ten opzichte van die van de bron (rood) als gevolg van het verschil in lengte van de coaxkabels tussen respectievelijk de detector en de computer en de bron en de computer.



**Figuur 4-16** Animatie bij opdracht 15 die de oorsprong van de systematische fout visualiseert.

### Facultatieve pagina's

Er zijn acht facultatieve pagina's in het materiaal opgenomen. Het ging om verdiepend achtergrondmateriaal dat interessant zou kunnen zijn voor de geïnteresseerde leerling. De informatie op de pagina's is niet essentieel voor de ontwikkeling van de meetmethode en is als zodanig niet functioneel binnen de didactische structuur. De pagina's waren te bereiken door te klikken op een 'meer informatie' link.

De facultatieve pagina verscheen dan in een apart window waarvan de opmaak duidelijk afweek van het hoofdmateriaal. Dit moest duidelijk maken dat het om achtergrondinformatie ging en voorkomen dat de leerlingen de rode draad van het materiaal uit het oog zouden verliezen. De onderstaande tabel geeft een overzicht van de onderwerpen van de facultatieve pagina's. De pagina's zijn opgenomen in bijlage II.

**Tabel 4.1** Onderwerpen van de facultatieve pagina's

Bereikbaar vanaf scherm:	Onderwerp:
	01 Een fundamentele natuurconstante: de lichtsnelheid
	02 Lichtsnelheid meten
	03 Golfsnelheid in een snaar
	08 Moduleren van golven
	08 Faseverschil meten
	12 Elimineren van systematische fout
	14 Signalen manipuleren
	14 Systematische fouten

### 4.3.6 Webcams

De leerlingen konden de opstelling bekijken via twee webcams, die vanuit verschillende hoeken een duidelijk beeld van de opstelling gaven. Eén webcam was op de bron gemonteerd, zodat hiermee kon worden waargenomen of, en zo ja welk medium zich tussen bron en detector bevond. Daarnaast was naast de opstelling een bestuurbare camera opgesteld waarmee van de zijkant ingezoomd kon worden op specifieke delen van de opstelling, zoals de detector, de bron, de media en de schaalverdeling. Daarmee konden de leerlingen controleren of de bron zich op de gewenste positie bevond. Naast dit directe, praktische nut, moesten de webcams ook bijdragen aan het gevoel van de leerlingen werkelijk een experiment uit te voeren.

## 4.4 Onderzoeksmethode

### 4.4.1 Inleiding

Nadat het ontwerp was uitgewerkt in concreet lesmateriaal kon de laatste fase van de tweede cyclus, de testfase, voorbereid worden. Deze fase moest duidelijk maken of het materiaal functioneerde zoals verwacht en beschreven in het scenario. Om dit helder te krijgen werd onderzocht of enerzijds de inhoudelijke uitlijning er, zoals vooraf verondersteld, voor zorgde dat de leerlingen op ieder moment wisten waar

ze mee bezig waren en waarom, en anderzijds of de vormelementen functioneerden in het ondersteunen van de inhoudelijke uitlijning.

In hoofdstuk 3 werden al twee globale onderzoeksvragen, respectievelijk de A-vraag en de B-vraag, opgesteld die hieronder nu verder uitgewerkt worden, aangevuld met een beschrijving van onderzoeksinstrumenten die ingezet werden om deze vragen te beantwoorden.

### 4.4.2 Het functioneren van de didactische structuur

De eerste hoofdvraag luidde:

A. Voldoet de didactische structuur zodanig dat de leerlingen in staat zijn het experiment zelfstandig, inhoudelijk gemotiveerd en met voldoende zicht op waar ze mee bezig zijn uit te voeren?

Het antwoord op deze hoofdvraag zou gezocht worden aan de hand van vier onderzoeksvragen aansluitend bij de verschillende delen van de didactische structuur. Deze vier vragen dekten de gehele didactische structuur af. De eerste drie waren gericht op de ontwikkeling van de specifieke procedure en kwamen overeen met de drie delen zoals ze in de website geformuleerd zijn: Globale motivering, Lichtsnelheid in lucht, Lichtsnelheid in andere media. Hiermee is de linker kolom van de didactische structuur afgedekt. De vierde onderzoeksvraag was gericht op het resterende deel van de didactische structuur en moest het functioneren van de rechterkolom nagaan.

Per onderzoeksvraag is een opsplitsing gemaakt in concrete subvragen die betrekking hebben op één of meerdere blokjes uit de didactische structuur (en dus schermen in het lesmateriaal).

#### **Globale motivering**

Aan de hand van de eerste onderzoeksvraag A1 zou geprobeerd worden zicht te krijgen op het functioneren van de globale motivering. Hiervoor moest nagegaan worden of fase 1 van de didactische structuur (bovenste cluster in Figuur 3-10 uit hoofdstuk 3), corresponderend met Deel 1 van het lesmateriaal, gefunctioneerd had. Doel van fase 1 was bij de leerlingen een globaal motief op te roepen om zich te willen verdiepen in het ontwikkelen van een meetmethode voor de bepaling van de lichtsnelheid en daarnaast ook zicht te geven op hoe ze te werk zouden gaan.

De eerste onderzoeksvraag luidde daarom:

*A1. Worden de leerlingen globaal gemotiveerd om de lichtsnelheid te bepalen en krijgen ze zicht op hoe ze dat zullen gaan doen?*

Aan de hand van vier subvragen zou gezocht gaan worden naar een concreet antwoord op deze onderzoeksvraag. De subvragen belichten de verschillende aspecten van de globale motivering (corresponderend met één of meerdere blokjes uit de didactische structuur en daaraan gekoppelde schermen van deel 1 van het lesmateriaal):

Subvraag	Blokje	Site
A1.1 Zien de leerlingen in waarom het meten van de lichtsnelheid niet eenvoudig zal zijn?	02	Deel 1
A1.2 Zien de leerlingen mogelijkheden in het gebruik van het golfkarakter van licht?	03, Lokaal motief 1	Deel 1
A1.3 Wordt de belangstelling van de leerlingen gewekt om de meetmethode te gaan ontwikkelen?	Globaal motief	Deel 1
A1.4 Hebben de leerlingen een globaal inzicht in de manier waarop ze de meetmethode gaan ontwikkelen?	04	Deel 1

### Ontwikkeling van de meetmethode in lucht

De tweede onderzoeksvraag moest nagaan in hoeverre fase 2/3, uitgewerkt in deel 2 van het lesmateriaal (Meetmethode in lucht), heeft gefunctioneerd. In deel 2 werkten de leerlingen aan het ontwikkelen en evalueren van de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht. Hiermee werd de tweede onderzoeksvraag:

*A2. Zien de leerlingen in hoe de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht er met de beschikbare meetopstelling uit moet zien en kunnen ze deze toepassen?*

Ook de subvragen voor beantwoording van de tweede onderzoeksvraag zijn gerelateerd zijn aan concrete delen van de didactische structuur:

Subvraag	Blokje	Site
A.2.1 Zien de leerlingen in hoe, met de beschikbare meetopstelling, de theorie van het golfkarakter van licht ingezet kan worden om tot een meetmethode te komen?	05-06	Deel 2 deelvraag 1
A.2.2 Zien de leerlingen in dat de meetmethode moet worden aangepast omdat de opstelling de gereduceerde fase meet?	07, lokaal motief 2	Deel 2 deelvraag 1
A.2.3 Zien de leerlingen in dat het moduleren van het signaal dit probleem oplost door de golflengte van het signaal op te rekken en zien ze hoe de meetmethode daarbij moet worden aangepast?	08-09	Deel 2 deelvraag 2
A.2.4 Zien de leerlingen in dat de ontwikkelde meetmethode verder moet worden aangepast omdat de opstelling niet de juiste waarde van de lichtsnelheid levert?	10, lokaal motief 3	Deel 2 deelvraag 2
A.2.5 Zien de leerlingen in hoe de opstelling een systematische fout in de metingen veroorzaakt en hoe de ontwikkelde meetmethode verder moet worden aangepast om die systematische fout te elimineren?	11-12	Deel 2 deelvraag 3
A.2.6 Zijn de leerlingen in staat uiteindelijk uit de metingen de lichtsnelheid in lucht te bepalen?	13	Deel 2 deelvraag 3

### Ontwikkeling van de meetmethode in andere media

De derde onderzoeksvraag gaat na in hoeverre fase 4 uit de didactische structuur functioneert en naar behoren is uitgewerkt in deel 3 van de site (Lichtsnelheid in andere media). De functie van fase 4 is geformuleerd als het toepassen van de ontwikkelde en geëvalueerde inhoudsspecifieke procedure in andere (vergelijkbare) situaties. De andere vergelijkbare situatie is in dit geval een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media. De derde onderzoeksvraag luidde daarom:

*A3. Zien de leerlingen in hoe de ontwikkelde meetmethode moet worden aangepast voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht en kunnen ze deze toepassen?*

Aansluitend bij de opbouw in de didactische structuur zijn voor de beantwoording van deze onderzoeksvraag de volgende subvragen geformuleerd:

Subvraag	Site
A.3.1 Zien de leerlingen in dat het plaatsen van een cuvet met een ander medium dan lucht tussen bron en detector leidt tot een extra faseverschil en hoe daaruit de lichtsnelheid in het betreffende medium te bepalen is?	15-16 Deel 3
A.3.2 Zijn de leerlingen in staat de lichtsnelheid in een aantal media te bepalen?	17 Deel 3
A.3.3 Hoe ervaren de leerlingen hierbij de functionaliteit van een reflectie op de eerder ontwikkelde meetmethode?	14 Afsluiting deel 2
A.3.4 Hoe ervaren de leerlingen de beperkte begeleiding: positief of negatief?	14-17 Deel 3

### Handelingspraktijk van een experimenteel fysicus

De vierde onderzoeksvraag is gericht op de rechterkolom van de didactische structuur: de ontwikkeling van de algemene procedure. Gedurende het ontwikkelen van een procedure voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht en andere media wordt deze gekoppeld aan een meer algemene procedure uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. Onderzoeksvraag A4 richt zich op het functioneren van deze rechterkolom:

*A4. Zien de leerlingen de parallel tussen hun experiment en de praktijk van de experimenteel fysicus?*

#### 4.4.3 Het functioneren van de vormelementen

De tweede hoofdvraag is gericht op de technische invulling en vormgeving van de site en het functioneren van de vormelementen:

*B. Functioneert de website met de opgenomen vormelementen in het faciliteren van het zelfstandig en op afstand uitvoeren van het experiment?*

Ook voor de beantwoording van deze hoofdvraag werd een opsplitsing gemaakt in onderzoeksvragen die beantwoord moesten worden aan de hand van enkele concrete subvragen. De eerste onderzoeksvraag is gericht op het functioneren van de specifieke vormelementen en de tweede onderzoeksvraag op het afstandskarakter van het experiment:

*B1. Functioneren de vormelementen naar verwachting?*

Door naar het functioneren van de afzonderlijke vormelementen te kijken moest duidelijk worden of de site als geheel gefunctioneerd had en de inhoudelijke uitlijning voldoende ondersteunde. De indeling in subvragen voor onderzoeksvraag B1 bestaat dan ook uit de beantwoording van B1 voor de verschillende vormelementen:

Vormelementen			
B1.1	Vragensysteem	B1.4	Animaties
B1.2	Waar ben ik'-window	B1.5	Facultatieve pagina's
B1.3	Opbouw van de schermen	B1.6	Webcam

Met de tweede onderzoeksvraag B2 werd geprobeerd zicht te krijgen op de meningen van de leerlingen over het uitvoeren van een experiment op afstand. De tweede onderzoeksvraag luidt:

*B2. Hoe beleven de leerlingen het afstandskarakter?*

Met twee subvragen werd geprobeerd zicht te krijgen op hoe de leerlingen het uitvoeren van het afstandsexperiment ervaren hadden.

Subvraag	
B2.1	Hebben leerlingen het gevoel echt met een opstelling bezig te zijn?
B2.2	Zouden leerlingen, terugkijkend, het experiment liever op afstand of aan de tafel uit willen voeren?

#### 4.4.4 Experimentele setting

De leerlingen werden geworven door docenten van scholen in de regio te vragen een brief onder de leerlingen te verspreiden. In deze brief werd kort het doel en het belang van het onderzoek toegelicht en werd de leerlingen gevraagd zich aan te melden om in de vakantie, tegen een kleine vergoeding, het experiment uit te voeren. In de brief stond ook dat van de leerlingen verwacht werd het experiment



## Hoofdstuk 4

op de universiteit in zelfgekozen koppels uit te voeren en dat het geheel zo'n zestien uur in beslag zou nemen waarvan één dag op de universiteit voor de uitvoering van het experiment en nog één dag thuis om een practicumverslag te schrijven. Deze zestien uur zijn bewust wat ruim bemeten om zo impliciet duidelijk te maken dat ook het maken van het verslag serieus moest worden genomen door er voldoende tijd aan te besteden.

Het totale sample bestond uit 10 meisjes (5 meisjeskoppels) en 10 jongens (5 jongenskoppels), die allen het natuur- en techniek profiel volgden. De meisjes waren 17 (2 leerlingen), 16 (7 leerlingen) en 15 jaar (1 leerling) oud. De helft van de jongens was 16 en de andere helft 17 jaar oud. Ze hadden allemaal net 5VWO afgerond en hadden gevarieerde cijfers voor natuurkunde (1 leerling een 6, 8 leerlingen een 7, 8 leerlingen een 8 en 3 leerlingen een 9).

De koppels waren afkomstig van 6 scholen (2 scholen met 3 koppels (beide gymnasia), 1 school met 2 koppels en 2 scholen met 1 koppel). De leerlingen van dezelfde school werden vooraf geïnstrueerd geen contact te hebben met de andere leerlingen voordat ze het verslag ingeleverd hadden.

De leerlingen werden gevraagd het experiment uit te voeren met een medeleerling zodat ze zich vrij zouden voelen om tijdens de uitvoering onderling te communiceren, waardoor mogelijk zicht op de denkprocessen en redeneringen voorafgaand aan het geven van een antwoord op de site verkregen kon worden.

De verzameling van de onderzoeksgegevens was gepland over 10 opeenvolgende werkdagen (1 werkdag per koppel). De leerlingen kregen na uitvoering van het experiment nog een week de tijd het verslag in te leveren.

Bij ontvangst van de leerlingen op de universiteit werd eerst kort toegelicht dat het onderzoek gericht was op de vraag hoe een experiment op afstand opgezet zou moeten worden. Vervolgens kregen de leerlingen de instructie om het experiment zo zorgvuldig mogelijk en met onderling overleg uit te voeren.

Vooraf werd aangekondigd dat geluid, beelden en schermhandelingen zouden worden vastgelegd en dat ze enkele malen onderbroken zouden worden voor de beantwoording van een aantal vragen.

Na afronding van het experiment kregen de leerlingen instructies voor het schrijven van een verslag waarin kort werd toegelicht hoeveel pagina's aan welke onderwerpen besteed moesten worden (zie bijlage VI). De leerlingen konden voor het schrijven van het verslag desgewenst weer inloggen op de site om de antwoorden die ze gegeven hadden en de feedback die ze daarop kregen nogmaals in te zien.

Doordat ervoor gekozen is de leerlingen zich vrijwillig te laten aanmelden voor het

experiment en het buiten de reguliere context te plaatsen, vormt het onderzoekssample geen doorsnede van de gemiddelde natuurkundeklas. Voor dit sample is gekozen omdat het experiment bedoeld is voor geïnteresseerde leerlingen, die zo de mogelijkheid krijgen om eens te werken met een meer geavanceerde meetopstelling en meetmethode dan ze vanuit school gewend zijn. Het onderzoekssample sluit aan bij de uiteindelijke doelgroep van het experiment die ook zal bestaan uit de leerlingen die bovengemiddeld in natuurkunde geïnteresseerd zijn.

Het op de universiteit uitvoeren zou de onderzoeksresultaten kunnen beïnvloeden, omdat het door de leerlingen als extra spannend zou kunnen worden ervaren. Hier is echter toch toe besloten, omdat op deze manier gewaarborgd kon worden dat alle leerlingen het experiment onder dezelfde (technische) omstandigheden uitvoerden. Hierdoor werden vergelijkingen tussen de ervaringen van de leerlingen niet verstoord door afwijkende, maar in het geval van een experiment dat volledig op de computer moest worden uitgevoerd zeer bepalende, praktische omstandigheden. Daarnaast bood het laten uitvoeren van het experiment op de universiteit mogelijkheden om de leerlingen te observeren en hun activiteiten vast te leggen.

#### 4.4.5 Onderzoeksinstrumenten

Er zijn diverse instrumenten ingezet voor de verzameling van de onderzoeksdata. Door verschillende onderzoeksinstrumenten te kiezen die elkaar deels overlappen is geprobeerd de kwaliteit en objectiviteit van de onderzoeksdata te waarborgen. Er werd geprobeerd een zo compleet mogelijk beeld van de activiteiten van de leerlingen te krijgen door niet alleen de door de onderzoeker vastgelegde onderzoeksdata (observaties en antwoorden van de leerlingen op de interviews) mee te nemen maar ook de directe interactie tussen de leerlingen en het lesmateriaal (antwoorden op de vragen op de site en leerlingverslagen van de leerlingen).

**Onderbrekingen** - De leerlingen werden gedurende de uitvoering van het experiment op vooraf vastgestelde momenten onderbroken om een aantal standaard vragen te beantwoorden. De antwoorden op deze vragen moesten duidelijk maken of de leerlingen begrepen *en* onder woorden konden brengen wat ze tot dan toe gedaan hadden en of ze zicht hadden op wat komen ging. Deze informatie moest zicht geven op de kwaliteit van de inhoudelijke uitlijning.

In bijlage III zijn de vragen die tijdens de onderbrekingen werden gesteld opgenomen.

**Inhoudelijke vragen** - De antwoorden die de leerlingen geven op de vragen op de site leveren informatie over de inhoudelijke details van het leerproces en

vormen een belangrijk onderzoeksinstrument. Alle antwoorden die de leerlingen invoeren kunnen worden nagezocht in een database waarin ze automatisch worden opgeslagen.

**Belevingsenquête** - Om een idee te krijgen hoe de leerlingen het uitvoeren van het experiment op afstand ervaren hadden, vulden ze direct na afloop een belevingsenquête in. Om de kans op sociaal wenselijk antwoorden te verkleinen en ervoor te zorgen dat de meningen van beide leerlingen duidelijk naar voren kwamen vulden de leerlingen de belevingsvragen schriftelijk en individueel in.

De belevingsenquête is te vinden in Bijlage IV.

**Interview na afloop** - Na afronding van het experiment en na het invullen van de belevingsenquête werden de leerlingen geïnterviewd aan de hand van een vooraf opgesteld interviewschema. Geïnterviewd werd of de leerlingen na afloop ook nog konden verwoorden waar ze mee bezig waren geweest en waarom. Daarnaast bood het interview de mogelijkheid om terug te kijken op het gehele experiment. De vragen van het interview zijn te vinden in Bijlage V.

**Leerlingverslagen** - De leerlingen kregen de opdracht om, per koppel, na afronding van het experiment binnen een week een practicumverslag in te leveren. De instructies over de eisen aan dit verslag worden gegeven op het laatste scherm (zie bijlage VI). De leerlingverslagen bieden de mogelijkheid om details over mogelijke inhoudelijke problemen van de leerlingen na te gaan. Daarnaast geven de verslagen een indruk hoe de leerlingen naar het experiment als geheel kijken en of ze ook enige tijd na uitvoering van het experiment nog konden verwoorden waar ze mee bezig waren geweest.

**Observaties** - De onderzoeker was aanwezig in de ruimte waar de leerlingen het experiment uitvoerden en observeerde hen gedurende de uitvoering. Om ook op een later tijdstip nog terug te kunnen kijken naar de handelingen van de leerlingen werd daarnaast het computerprogramma Camtasia ingezet (Cox, 2007). Met Camtasia kon worden opgenomen wat er op het scherm gebeurt. Daarnaast legde het programma tegelijkertijd het geluid en beeld dat via een microfoon en webcam werd geregistreerd vast. Deze schermvideo's laten dus nauwkeurig zien en horen wat de leerlingen op de site deden, wat ze invulden, hoe lang ze deden over het beantwoorden van een vraag en waarover ze onderling overlegden.

Tabel 4-2 geeft een overzicht van welke van deze instrumenten ingezet zijn voor de beantwoording van de onderzoeksvragen.

**Tabel 4-2** - Overzicht van ingezette onderzoeksinstrumenten. De bronnen aangemerkt met 'X' worden ingezet als voornaamste onderzoeksbron.

Onderzoeksinstrumenten/onderzoeksvragen	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Onderbrekingen	X	X		X		
Inhoudelijke vragen	X	X	X			
Interview			X	X	X	X
Belevingsenquête			X		X	X
Leerlingverslagen	X	X	X			
Observaties	X	X	X	X	X	X

### Analyse van de onderzoeksresultaten

De instrumenten zijn zo gekozen dat zij het onderwijsleerproces vanuit verschillende invalshoeken in kaart brengen.

De antwoorden op de vragen op de site testten de concrete inhoudelijke kennis van de leerlingen en gaven zo direct zicht op het kennisniveau van de leerlingen en de ontwikkeling daarin gedurende het leerproces.

Het kennisniveau en de ontwikkeling daarin werd op een meer globaal niveau ook nagegaan aan de hand van de antwoorden tijdens de onderbrekingen, waarmee werd geïnventariseerd of de leerlingen konden verwoorden wat ze tot dan toe gedaan hadden en of ze zicht hadden op wat komen ging. Door hier ook in het interview na afloop op terug te komen konden incidenteel afwijkende antwoorden worden gedetecteerd en kon worden nagegaan of de leerlingen ook na enige tijd nog steeds in staat waren dit onder woorden te brengen. Bovendien kon met behulp van de leerlingverslagen worden nagegaan hoe de leerlingen korte tijd na afloop van het experiment verwoordden wat ze gedaan hadden.

De affectieve componenten werden in kaart gebracht via de belevingsenquête en ook deels via het interview.

De opnames van de leerlingen gedurende de uitvoering (de observaties) konden ten slotte te allen tijde gebruikt worden om vermoedens die op grond van de andere onderzoeksinstrumenten naar boven kwamen te controleren.

Het analyseproces is gestart met het uitschrijven van de opgenomen interviews en onderbrekingen. De observaties zijn fragmentarisch, alleen bij behoefte aan meer data, uitgeschreven. De antwoorden op de inhoudelijke vragen werden gedurende de uitvoering van het experiment automatisch geregistreerd in de database en konden daar na afloop ook weer gestructureerd uit gegenereerd worden.

Vervolgens werden deze antwoorden en die van de onderbrekingen en de interviews ingedeeld in vooraf gedefinieerde categorieën. Wanneer nodig werd de indeling in categorieën bijgesteld. Om bij deze indeling in categorieën mogelijke interpretatiefouten door de onderzoeker te voorkomen werd de gemaakte indeling

## Hoofdstuk 4

aan een tweede onderzoeker voorgelegd en in onderling overleg zonodig aangepast. Vervolgens werd een rapportage, waarin geprobeerd werd de onderzoeksvragen te beantwoorden geïllustreerd aan de hand van letterlijk uitgewerkte fragmenten, voorgelegd aan een derde onderzoeker en vond waar nodig nogmaals bijstelling van de indeling in categorieën plaats.

# De A-vraag:

## het functioneren van de didactische structuur

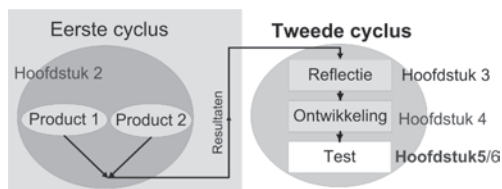
# 5

5.1	Inleiding	126
5.2	Resultaten A1: Globale motivering	126
5.2.1	Inleiding	126
5.2.2	Subvraag A1.1	128
5.2.3	Subvraag A1.2	129
5.2.4	Subvraag A1.3	131
5.2.5	Subvraag A1.4	132
5.2.6	Conclusie	133
5.3	Resultaten A2: Lichtsnelheid in lucht	134
5.3.1	Inleiding	134
5.3.2	Subcluster 1: Inzet golfkarakter	136
5.3.3	Subcluster 2: Lichtsignaal moduleren	140
5.3.4	Subcluster 3: Systematische fout elimineren	144
5.3.5	Conclusie	147
5.4	Resultaten A3: Lichtsnelheid in andere media	149
5.4.1	Inleiding	149
5.4.2	Subvraag A3.1	151
5.4.3	Subvraag A3.2	156
5.4.4	Subvraag A3.3	159
5.4.5	Subvraag A3.4	161
5.4.6	Conclusie	163
5.5	Resultaten A4: Experimenteel fysicus	165
5.5.1	Inleiding	165
5.5.2	Resultaten	166
5.5.3	Conclusie	167
5.6	Conclusies A-vraag	168

## 5.1 Inleiding

Uit de eerste cyclus van het ontwikkelingsonderzoek kwam, onder andere, een aantal inhoudelijke knelpunten die de zelfstandige voortgang van de leerlingen door het materiaal belemmerde naar voren. Meer algemeen werd duidelijk dat de leerlingen te beperkt zicht hadden op hun eigen leerproces: ze wisten niet goed waar ze mee bezig waren en waarom. Deze resultaten werden gebruikt als input voor de tweede cyclus waarin geprobeerd werd deze problemen op te lossen bij het ontwerpen van een nieuw product, zoals beschreven in hoofdstuk 3.

In hoofdstuk 4 werd beschreven hoe het ontwerp in concreet lesmateriaal is uitgewerkt. Ook werden de twee hoofdvragen (A en B) in het onderzoek geformuleerd die de basis voor de testfase van het ontwikkelingsonderzoek (zie figuur 5.1) vormden. De resultaten uit deze testfase worden besproken in de hoofdstukken 5 en 6.



**Figuur 5-1** Hoofdstuk 5 beschrijft het onderzoek aan de inhoudelijke uitlijning in de testfase van de tweede cyclus

Dit hoofdstuk zal ingaan op het onderzoek naar hoofdvraag A:

**Hoofdvraag A:** Voldoet de didactische structuur zodanig dat de leerlingen in staat zijn het experiment zelfstandig, inhoudelijk gemotiveerd en met voldoende zicht op waar ze mee bezig zijn uit te voeren?

Het functioneren van de didactische structuur werd onderzocht aan de hand van vier onderzoeksvragen A1, A2, A3 en A4 die elk een aantal subvragen omvatten.

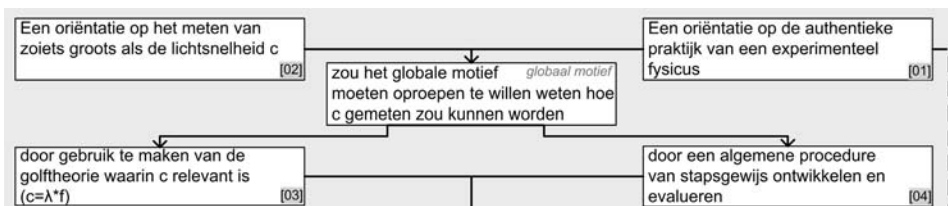
De onderzoeksvragen waren gekoppeld aan de in hoofdstuk 3 gedefinieerde clusters van de didactische structuur (zie figuur 3-10 in hoofdstuk 3) en gingen na of de leerlingen het leerproces doorliepen zoals verwacht en beschreven in de didactische structuur en het scenario.

## 5.2 Resultaten A1: Globale motivering

### 5.2.1 Inleiding

Onderzoeksvraag A1 gaat na of het eerste cluster in de didactische structuur (zie figuur 5.2) aan zijn functie voldeed. Deze functie is tweeledig. Enerzijds zou het materiaal

van cluster 1 bij de leerlingen moeten bewerkstelligen dat ze benieuwd zijn naar de meetmethode en dat ze willen beginnen met de bestudering en uitvoering van het experiment (globaal motief). Daarnaast zouden de leerlingen een globaal idee moeten hebben gekregen van de manier waarop ze hierbij te werk zullen gaan.



**Figuur 5-2** - Eerste cluster (uit figuur 10 in hoofdstuk 3) van de didactische structuur (fase 1) waar onderzoeksvraag A1 zich op richt.

De eerste onderzoeksvraag luidt:

*Onderzoeksvraag A1: Worden de leerlingen globaal gemotiveerd om de lichtsnelheid te bepalen en krijgen ze zicht op hoe ze dat zullen gaan doen?*

Deze onderzoeksvraag werd beantwoord aan de hand van vier subvragen. Met de subvragen werd allereerst onderzocht of de leerlingen de gewenste inhoudelijke uitgangspositie hadden. Dit betekent dat ze inzien waarom het meten van de lichtsnelheid niet eenvoudig zal zijn (subvraag A1.1) en dat ze mogelijkheden zien in het gebruik van het golfkarakter van licht (subvraag A1.2). Bovendien werd nagegaan of het eerste deel van het lesmateriaal de leerlingen nieuwsgierig heeft gemaakt naar een meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid in lucht (subvraag A1.3) en of ze ook globaal konden verwoorden hoe ze te werk zullen gaan (subvraag A1.4).

De belangrijkste onderzoeksbronnen voor het beantwoorden van de vier subvragen waren de antwoorden op de inhoudelijke vragen op de site en tijdens de onderbrekingen. Met de antwoorden op de inhoudelijke vragen kon het kennisniveau van de leerlingen en de ontwikkeling van de kennis in kaart worden gebracht. Dit onderzoeksinstrument werd dan ook ingezet bij de eerste twee subvragen (A1.1 en A1.2) die gericht waren op het nagaan van specifieke kennis. Hiermee werd zicht verkregen op het lokale leerproces van de leerlingen. Omdat de leerlingen in de onderbrekingen steeds moesten verwoorden waar ze mee bezig waren geweest en wat verder nog volgt, gaven hun antwoorden zicht op het globale leerproces dat in de subvragen A1.3 en A1.4 en deels ook in A1.2 aan de orde is. De leerlingverslagen werden zondig geraadpleegd wanneer een duidelijker zicht op het kennisniveau nodig was. Tabel 5-1 geeft een overzicht van de onderzoeksinstrumenten die voor de beantwoording van de verschillende subvragen zijn ingezet.



**Tabel 5-1** Onderzoeksinstrumenten bij onderzoeksvraag A1

	Inhoudelijke vragen	Onderbrekingen	Interview na afloop	Belevings-enquête	Leerling-verslagen
Subvraag A1.1	X				
Subvraag A1.2	X	X			X
Subvraag A1.3		X			
Subvraag A1.4		X			

### 5.2.2 Subvraag A1.1

**Subvraag A1.1** *Zien de leerlingen in waarom het meten van de lichtsnelheid niet eenvoudig zal zijn?*

De verwachting was dat de leerlingen bij het maken van de opdrachten 2 en 3<sup>1</sup> zouden inzien dat het lastig is om zoiets groots als  $c$  te meten. De aanname was dat de leerlingen in eerste instantie zouden voorstellen de snelheid te bepalen door de afgelegde afstand en bijbehorende tijd te meten. Vervolgens zouden ze moeten gaan inzien dat voor de laboratoriumsituatie deze grootheden veel te groot respectievelijk veel te klein zijn om rechtstreeks te kunnen meten.

#### Inhoudelijke vragen op de site

Bij opdracht 2 werden de leerlingen gevraagd hoe volgens hen de lichtsnelheid zou kunnen worden gemeten. Met de antwoorden op deze opdracht werd de verwachting getoetst dat de leerlingen in eerste instantie geneigd zouden zijn de afstand en tijd te willen meten. Negen van de tien koppels voldeden aan deze verwachting en stelden voor om over een bekende afstand de tijd te meten. Vijf van deze acht zijn wat preciezer en vermelden ook dat dit een *grote* afstand zou moeten zijn. Drie van de acht koppels stellen voor om spiegels in te zetten om de afstand extra lang te maken. Het tiende koppel geeft een antwoord dat neigt naar inzet van de golftheorie (ze noemen: ‘in een donkere ruimte de trillingen van een enkele lichtbundel meten’) maar is zo vaag geformuleerd dat hieruit lastig is af te leiden wat de leerlingen er mee bedoelen.

Vervolgens werd bij opdracht 3 gevraagd waarom Rømer en Michelson wel in staat waren om de lichtsnelheid te bepalen en Galileo niet. Deze opdracht zou er voor moeten zorgen dat de leerlingen zich bewust werden dat het rechtstreeks meten van de afstand en de tijd lastig zou zijn.

De meeste leerlingen leken in te zien dat het rechtstreeks meten van de lichtsnelheid over korte afstand zoals in het lab, voor problemen zou zorgen. Negen koppels noemen ‘grotere afstand’ in hun antwoord, acht het ‘menselijk reactievermogen’.

<sup>1</sup> De leerlingen konden opdracht 1, waar ze de instructie krijgen om alvast meettijd te reserveren, overslaan omdat dit in de onderzoekssituatie al voor hen gedaan was.

Zes koppels betrokken de meettijd in hun antwoord. Bijvoorbeeld:

- Michelson lukte het, omdat bij zijn methode tijd geen rol meer speelt.
- De te meten tijd was te klein voor de zandloper van Galileo en Michelson ging niet meer direct op de tijd af.

### 5.2.3 Subvraag A1.2

---

*Subvraag A1.2 Zien de leerlingen mogelijkheden in het gebruik van het golfkarakter van licht?*

---

Vervolgens moesten de leerlingen aan de hand van de opdrachten 4, 5 en 6 inzien dat het gebruik van het golfkarakter mogelijkheden bood om de lichtsnelheid toch te meten.

#### **Inhoudelijke vragen op de site**

Bij opdracht 4 moesten de leerlingen berekenen hoe ver de assistenten van Galileo uit elkaar zouden moeten staan om een enigszins nauwkeurige meting te kunnen doen. Deze opdracht moest hen bewust maken van de grootte van de afstand waarover gemeten moet worden. Alle koppels beantwoordden deze vraag juist.

In de tekst voorafgaand aan opdracht 5 werd gesteld dat, nu het rechtstreeks meten niet mogelijk is, gezocht moest worden naar een andere theorie waarin de lichtsnelheid ook relevant is. Vervolgens werd de golftheorie geïntroduceerd als mogelijke oplossingsrichting om de lichtsnelheid op een andere manier dan door het bepalen van afstand en tijd te meten. De leerlingen hoefden niet zelf op het idee te komen dat de golftheorie een oplossing zou kunnen bieden. Maar er werd wel van hen verwacht dat zij, nadat de oplossingrichting was aangereikt, in staat zouden zijn de implicaties van het inzetten van het golfkarakter te doorgronden.

Bij opdracht 5 werd eerst de relevante voorkennis ten aanzien van de golftheorie opgeroepen door naar de relatie tussen de relevante grootheden (frequentie  $f$ , de golflengte  $\lambda$  en de lichtsnelheid  $c$ ) te vragen ( $c = \lambda \cdot f$ ).

Ook deze vraag beantwoordden bijna alle koppels (negen) meteen juist.

Daarna moesten de leerlingen bij opdracht 6 eerst de waarden voor de frequentie en golflengte van het gebruikte rode licht in BINAS opzoeken. Alle koppels bleken hiertoe in staat. De verwachting was dat, door deze waarden zelf op te zoeken, de leerlingen zich bewust zouden worden van de zeer grote waarde van de frequentie en de zeer kleine waarde van de golflengte. Toen de leerlingen vervolgens gevraagd werden welke problemen ze voorzagen bij het meten van de golflengte en frequentie, noemden vijf koppels inderdaad dat de golflengte heel klein en de frequentie heel groot is. De andere vijf noemden alleen dat de golflengte heel erg klein is. Drie van

hen gaven daarbij nog wel aan dat er zeer nauwkeurige apparatuur vereist is:

- Een nauwkeurig meetinstrument en uitzendbron is vereist.
- Meetapparatuur is niet geschikt/nauwkeurig: een oscilloscoop kan waarschijnlijk niet zo'n hoge frequentie meten.
- Apparatuur moet heel geavanceerd zijn.

De antwoorden op de inhoudelijke vragen bevestigden de verwachting dat de leerlingen redelijk in staat lijken te verwoorden wat het betekent om het golfkarakter in te zetten. De meeste leerlingen leken in ieder geval enig idee van de te verwachten problemen te hebben. Op grond van de inhoudelijke vragen kon wel worden geconcludeerd dat ze niet allemaal in staat waren dit volledig onder woorden te brengen. Om deze constatering bevestigd te krijgen werden ook de antwoorden tijdens de eerste onderbreking geanalyseerd.

### Onderbrekingen

Tijdens de eerste onderbreking (na scherm 04, opdrachten 01-06) werd aan de leerlingen gevraagd van welke theorie ze gebruik gaan maken bij het ontwikkelen van de meetmethode in het experiment en waarom juist die theorie. In de antwoorden van alle koppels komen de termen "golven" of "golftheorie" voor. Ze voldeden hiermee aan de verwachting. Uit hun motiveringen voor het antwoord werd nogmaals duidelijk dat ze inzien dat naar een andere manier moet worden gezocht omdat rechtstreeks meten (met afstand en tijd) voor problemen zal zorgen. Ze noemen namelijk allemaal dat dan over zeer grote afstand gemeten zou moeten worden, hetgeen niet mogelijk is in een laboratoriumsituatie. Bijvoorbeeld:

- Je moet gaan meten over hele grote afstanden. Dat wordt erg lastig.
- Heel moeilijk om te meten als je  $\Delta x$  en  $\Delta t$  hebt, omdat de snelheid heel groot is.

De leerlingen hebben blijkbaar zicht op de voorgestelde oplossingsrichting (inzet van golftheorie), maar deze antwoorden maken nog niet duidelijk of ze hier zelf ook mogelijkheden in zien. Daarom werd tijdens de onderbreking aan de leerlingen gevraagd waarom nou juist de golftheorie werd ingezet. Vooraf was de verwachting dat de leerlingen als belangrijkste argument hiervoor zouden noemen dat de lichtsnelheid daar immers een belangrijke rol speelt, maar dit argument werd niet door de leerlingen gegeven. De leerlingen leken niet goed te snappen wat er valt uit te leggen aan waarom ze de golftheorie gebruiken. Vijf van de tien koppels antwoordden wel dat het golfkarakter gebruikt wordt omdat licht een golfverschijnsel is. Eén koppel antwoordt alleen '*stond aangegeven*'.

Het leek erop dat de leerlingen de inzet van de golftheorie, die hen werd aangereikt, voor kennisgeving aannamen. Op grond van de antwoorden in de onderbrekingen kon niet aangetoond worden dat de leerlingen inzien waarom de inzet van de golftheorie een logische keuze is, maar wel werd duidelijk dat ze geen redenen leken

te hebben om de theorie af te wijzen. In een laatste poging om wellicht toch een verdergaand inzicht aan te tonen werden ook de leerlingverslagen geanalyseerd.

### Overig

In de leerlingverslagen werd nagegaan wat de leerlingen over het waarom van de golftheorie in de verslagen noemen. Deze analyse bleek echter niet veel toe te voegen aan eerdere constatering. Slechts één koppel maakte er in hun inleiding een opmerking over:

- Je moet dus op zoek naar een andere manier om de lichtsnelheid te bepalen. In dit verslag maken we gebruik van de theorie over het karakter van licht, licht heeft namelijk een golfkarakter. Volgens de theorie van golven is er een relatie tussen de golflengte, de frequentie, en de lichtsnelheid. Die kennis gaan we gebruiken bij ons experiment om de lichtsnelheid te bepalen.

De andere koppels brachten in hun verslag niet expliciet naar voren waarom nou juist de golftheorie een voor de hand liggende keuze is.

### 5.2.4 Subvraag A1.3

---

*Subvraag A1.3* Wordt de belangstelling van de leerlingen gewekt om de meetmethode te gaan ontwikkelen?

---

De verwachting was dat deel 1 van het materiaal bij de leerlingen een globale interesse voor het onderwerp en een motief zou oproepen om het experiment te willen uitvoeren: hoe meet je nu eigenlijk zoiets groots als de lichtsnelheid?

#### Onderbrekingen

Tijdens de eerste onderbreking (na scherm 04, opdrachten 01-06) werd gevraagd of de leerlingen het leuk of interessant vonden om met het experiment door te gaan. Alle koppels antwoordden bevestigend op deze vraag. In de motivering van het antwoord gaven zeven koppels expliciet blijk van nieuwsgierigheid naar de methode waarmee de lichtsnelheid bepaald kan worden. Enkele voorbeelden:

- Ik zou willen weten hoe ze het gaan doen met het golfkarakter.
- Ik ben nu wel benieuwd hoe je de golf en vooral de frequentie kunt meten.
- Ik ben wel benieuwd wat dat manipuleren eigenlijk is.

Eén van deze koppels benadrukte het onderwerp zelf niet eens bijzonder interessant te vinden, maar vooral geïnteresseerd te zijn in de manier waarop:

- Waarom zou ik de lichtsnelheid willen weten? Ik denk dat ik niet specifiek de lichtsnelheid wil weten, want als ik de lichtsnelheid wil weten dan kijk ik wel in BINAS. Ik vind de manier waarop interessanter dan het antwoord.

In andere antwoorden kwam juist wel de lichtsnelheid zelf naar voren als bron voor de nieuwsgierigheid. Ook gaf één koppel aan het prettig te vinden dat het

onderwerp buiten de lesstof valt. De interesse van de meeste koppels leek dus vooral gewekt te zijn door nieuwsgierigheid naar de manier waarop ze de lichtsnelheid gaan bepalen. Een kleinere groep vond het onderwerp lichtsnelheid op zichzelf al interessant genoeg om er meer van te willen weten.

### 5.2.5 Subvraag A1.4

---

**Subvraag A1.4** *Hebben de leerlingen een globaal inzicht in de manier waarop ze de meetmethode gaan ontwikkelen?*

---

Voor een volledig antwoord op onderzoeksvraag A1 moest ook onderzocht worden of de leerlingen globaal inzien hoe ze te werk zullen gaan. Op de site werd hier expliciet aandacht aan besteed. In 4.2.5 is uitgewerkt hoe er, voordat de leerlingen voor de eerste maal werden onderbroken, op drie momenten expliciete verwijzingen zijn gemaakt:

1. op de eerste pagina werd de werkwijze ingeleid (scherm 00)
2. op scherm 01 werd nogmaals vooruitgeblikt
3. op de laatste pagina die de leerlingen bestuderen voordat ze onderbroken werden (scherm 04), werden de hoofdvraag, de deelvragen en de werkwijze nog eens op een rijtje gezet.

Daarnaast hadden de leerlingen tijdens bestudering van het materiaal continu het 'Waar ben ik'-window (beschreven in 4.3.3) in beeld. Dit gaf de globale opbouw van het materiaal met daarin expliciet de deelvragen met de drie stappen van meetopstelling, meetmethode ontwikkelen en meetmethode evalueren.

#### Onderbrekingen

Door tijdens de onderbreking aan de leerlingen te vragen of ze een globaal idee hadden van wat er komen ging moest duidelijk worden in hoeverre de leerlingen, na afronding van deel 1, de te volgen werkwijze konden verwoorden. De verwachting was dat ze zouden noemen dat de meetmethode aan de hand van drie deelvragen uitgewerkt zou worden. Daarnaast werd verwacht dat ze zouden noemen dat ze hierbij steeds de meetmethode zouden ontwikkelen en evalueren aan de hand van de bekende literatuurwaarde voor c. Twee koppels konden de vraag niet echt beantwoorden.

Drie koppels beschrijven de deelvragen in algemene termen. Bijvoorbeeld:

- Eigenlijk perfectioneer je steeds je methode.
- Allemaal fouten eruit halen.

De overige vijf koppels geven één of meer concrete deelvragen weer.

Allen noemen de eerste deelvraag (gebruik van het golfkarakter). Bijvoorbeeld:

- Hoe je het golfkarakter gebruikt.

Eén van hen noemt daarnaast ook de andere deelvragen (manipuleren van de golflengte en elimineren van de systematische fout), twee noemen alleen het elimineren van de systematische fout en twee refereren ook aan het manipuleren. Bijvoorbeeld:

- iets gaan doen met die lichtstraal zodat ie makkelijker te meten is.

Eén koppel noemt ook nog dat er in andere media gemeten gaat worden.

Overigens (ver)wijzen vier van de tien koppels bij het antwoorden naar het scherm en geven expliciet aan dat het antwoord op de vraag wat er verder gaat komen wat vreemd te vinden omdat het antwoord direct daar te vinden is.

### **5.2.6 Conclusie**

Doel van onderzoeksvraag A1 was na te gaan of het eerste deel van het lesmateriaal voldoet aan de didactische functie zoals die geformuleerd is in het eerste cluster van de didactische structuur. Aan de hand van vier subvragen werd geprobeerd de eerste onderzoeksvraag te beantwoorden.

#### **Subvraag A1.1**

Met de eerste subvraag werd nagegaan of de leerlingen inzagen waarom het meten van de lichtsnelheid niet eenvoudig zou zijn. De leerlingen zagen dit in en konden ook onder woorden brengen dat het rechtstreeks meten voor problemen zorgt.

#### **Subvraag A1.2**

De tweede subvraag ging na of de leerlingen mogelijkheden zagen in de inzet van het golfkarakter als oplossingsrichting voor het niet rechtstreeks kunnen meten van de lichtsnelheid. Het onderzoek liet zien dat de leerlingen onder woorden konden brengen waarom de lichtsnelheid niet rechtstreeks te meten was, in de golftheorie de juiste relatie tussen de aangereikte relevante grootheden konden geven en redelijk in staat waren de beperkingen van de golftheorie te benoemen.

Uit de onderzoeksdata kon niet worden opgemaakt of de leerlingen de inzet van de golftheorie ofwel vanzelfsprekend vonden (omdat de te meten grootheid hier immers deel van uitmaakt), ofwel voor kennisgeving aannamen. In ieder geval konden ze verwoorden dat de golftheorie ingezet werd, zagen ze geen reden de inzet te verwerpen en konden ze verwoorden wat de gevolgen hiervan waren. De inzet van golftheorie vormde voor de leerlingen dus geen struikelblok en de brug naar deel 2 van het lesmateriaal, waarin als eerste stap een oplossing voor de beperkingen van de golftheorie gezocht moest worden, leek succesvol gemaakt.

### **Subvraag A1.3**

De derde subvraag ging na of de belangstelling bij de leerlingen gewekt was om de meetmethode te gaan ontwikkelen. De meerderheid van de leerlingen gaf aan nieuwsgierig te zijn naar hoe de lichtsnelheid bepaald kon worden. Daarnaast was er een kleinere groep leerlingen die het onderwerp lichtsnelheid op zichzelf al interessant genoeg vond om zich daar verder in te verdiepen. Het was dus gelukt om het globale motief bij de leerlingen op te roepen en hun belangstelling voor het onderwerp te wekken. Uit de nieuwsgierigheid van de leerlingen naar de methode mag daarnaast ook geconcludeerd worden dat, nadat de golftheorie werd geïntroduceerd als mogelijke oplossingsrichting, ook het eerste lokale motief om te willen weten hoe de lichtsnelheid met inzet van die golftheorie bepaald kan worden, is opgeroepen.

### **Subvraag A1.4**

De vierde subvraag moest ten slotte duidelijk maken of de leerlingen een globaal inzicht hadden in de manier waarop ze de meetmethode zouden gaan ontwikkelen. De onderzoeksresultaten lieten zien dat de leerlingen in staat bleken tot het formuleren van de volgende inhoudelijke stap(pen). Aangezien de inhoudelijke stappen concretisering zijn van de deelvragen waaraan de procedure is opgehangen hadden de leerlingen dus een globaal beeld van wat komen ging.

De verwachting vooraf was dat de leerlingen ook zouden kunnen benoemen hoe ze bij het oplossen van de deelvragen te werk zouden gaan en dat ze naast de deelvragen ook de drie procedurele stappen (meetopstelling, meetmethode ontwikkelen en meetmethode evalueren) zouden noemen. Dit bleek echter niet het geval. Blijkbaar was de vooraf gestelde verwachting te hoog gegrepen en was het niet reëel om in dat stadium van het leerproces van leerlingen te verwachten ook op een metaniveau te kunnen beschrijven wat verder komen gaat. Bij nader inzien is het tot op dat niveau kunnen beschrijven van de te volgen werkwijze niet alleen te hoog gegrepen, maar ook niet nodig omdat het aanwezige globale beeld waarschijnlijk wel voldoende is om zinvol verder te kunnen.

## **5.3 Resultaten A2: Lichtsnelheid in lucht**

### **5.3.1 Inleiding**

In deel 2 van het materiaal is het tweede cluster in de didactische structuur uitgewerkt. Dit tweede cluster is opgedeeld in drie subclusters (zie figuur 10, hoofdstuk 3) omdat de leerlingen, gestuurd door de lokale motieven, drie maal werken aan het achtereenvolgens ontwikkelen en evalueren van de meetmethode (golfkarakter

gebruiken: eerste subcluster, lichtsignaal moduleren: tweede subcluster, systematische fout elimineren: derde subcluster).

Onderzoeksvraag A2 gaat na of de leerlingen in staat waren de meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid in lucht te ontwikkelen:

**Onderzoeksvraag A2.** *Zien de leerlingen in hoe de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht er met de beschikbare meetopstelling uit moet zien en kunnen ze deze toepassen?*

Om een antwoord te vinden op onderzoeksvraag A2 werd aan de hand van enkele subvragen onderzocht of de stappen, die de leerlingen in de drie subclusters van de didactische structuur doorliepen bij het ontwikkelen van de meetmethode, verliepen zoals verwacht en gepland.

### **Subcluster 1**

- *Meetmethode ontwikkelen:* In het vorige deel is bij de leerlingen al het eerste lokale motief opgeroepen om te willen weten hoe de lichtsnelheid met inzet van de golftheorie bepaald kon worden. Vervolgens wordt de oplossing aangeboden: de lichtsnelheid is te bepalen uit een meting van het faseverschil tussen twee punten in een lopende golf (subvraag A2.1).
- *Meetmethode evalueren:* Nadat ze dit uitgezocht hebben lopen ze tegen het probleem op dat de beschikbare meetopstelling alleen de gereduceerde fase meet. Confrontatie met dit probleem moet bij de leerlingen het tweede lokale motief oproepen uit te willen zoeken hoe de meetmethode aangepast moet worden zodat de golflengte opgerekt wordt (subvraag A2.2).

### **Subcluster 2**

- *Meetmethode ontwikkelen:* Vervolgens wordt de oplossing aangeboden: de golflengte wordt opgerekt door het signaal te moduleren (subvraag A2.3).
- *Meetmethode evalueren:* Na aanpassing van de meetmethode laat de evaluatie zien dat de meetopstelling nog niet de juiste data oplevert. Constatering hiervan moet het derde motief oproepen dit te willen verklaren (subvraag A2.4).

### **Subcluster 3**

- *Meetmethode ontwikkelen:* De verklaring voor de onjuiste waarde wordt aangereikt en blijkt het gevolg van een systematische fout. De leerlingen gaan nu aan de slag om de meetmethode zo aan te passen dat ze deze systematische fout kunnen elimineren (subvraag A2.5).
- *Meetmethode evalueren:* Na aanpassing van de meetmethode kan geëvalueerd worden of deze nu in orde is (subvraag A2.6). Dit roept de behoefte op om de methode ook toe te passen op andere media, en geeft zo de aanloop naar deel 3 van het materiaal (derde cluster van de didactische structuur).



Aangezien bij alle subvragen van onderzoeksvraag A2 zowel het kennisniveau en de ontwikkeling daarvan als ook het zicht op de rode draad in het materiaal nagegaan werd, werden de antwoorden op de inhoudelijke vragen op de site en de onderbrekingen weer ingezet als de voornaamste onderzoeksbronnen. De leerlingverslagen werden waar nodig gebruikt om aanvullende informatie te verzamelen (Tabel 5-2).

**Tabel 5-2** Onderzoeksinstrumenten bij onderzoeksvraag A2

	Inhoudelijke vragen	Onderbrekingen	Interview na afloop	Belevings-enquête	Leerlingverslagen
Subvraag A2.1	X	X			
Subvraag A2.2	X	X			
Subvraag A2.3	X	X			X
Subvraag A2.4	X	X			
Subvraag A2.5	X	X			
Subvraag A2.6	X	X			

### 5.3.2 Subcluster 1: Inzet golfkarakter

#### Inleiding

Nadat het eerste deel de leerlingen globaal had geïnteresseerd voor het onderwerp en hen nieuwsgierig had gemaakt naar hoe de meetmethode eruit zou zien (globaal motief) en hoe het golfkarakter hierbij ingezet kon worden (lokaal motief 1) waren de leerlingen in het tweede cluster beland. In het eerste subcluster van het tweede cluster (Figuur 5-3) werkten de leerlingen aan het beantwoorden van de vraag: hoe kan met de beschikbare meetopstelling de theorie van het golfkarakter van licht worden ingezet om tot een meetmethode te komen (subvraag A2.1).



**Figuur 5-3** Subcluster 1 (in cluster 2) van de didactische structuur waarop de subvragen A2.1 en A2.2 betrekking hebben.

Gegeven het feit dat de meetopstelling een faseverschil meet, was de verwachting dat leerlingen – met sturing vanuit vragen/opdrachten en feedback op hun antwoorden – vanuit hun bestaande voorkennis uit het domein ‘trillingen en golven’ in staat zouden zijn om in te zien dat meting van het faseverschil tussen twee punten in een lopende golf de gevraagde lichtsnelheid oplevert.

Vervolgens moesten de leerlingen inzien dat er een aanpassing van de meetmethode nodig was omdat de opstelling de *gereduceerde* fase meet (subvraag A2.2). De verwachting was dat de leerlingen zouden inzien dat de punten op de lopende golf waar het faseverschil wordt gemeten binnen een golflengte van elkaar moeten liggen omdat de opstelling alleen de gereduceerde fase kan meten. Op grond hiervan moesten de leerlingen inzien dat de meetmethode aangepast moest worden omdat de afstand tussen de bron en detector veel groter is dan de golflengte van het gebruikte licht.

### Subvraag A.2.1

---

**Subvraag A2.1** *Zien de leerlingen in hoe, met de beschikbare meetopstelling, de theorie van het golfkarakter van licht ingezet kan worden om tot een meetmethode te komen?*

---

#### *Inhoudelijke vragen op de site*

Nadat de leerlingen eerst een beschrijving van de meetopstelling hadden gekregen werd bij opdracht 7 de relevante voorkennis ten aanzien van het begrip faseverschil opgeroepen. Eerst moesten de leerlingen aangeven hoe groot het faseverschil in een animatie was. De meeste leerlingen (acht koppels) gaven hier het juiste antwoord (1,5). De twee overige koppels antwoordden 0,5. Beide koppels zagen in, na onderling overleg als reactie op de feedback, dat dit niet juist was omdat ze faseverschil verwarde met gereduceerd faseverschil.

Alle koppels zagen vervolgens in dat het faseverschil groter wordt bij grotere afstand tussen bron en detector. Toen daarna gevraagd werd naar de formule voor het faseverschil gaven acht koppels het juiste antwoord ( $\Delta\varphi = \Delta x / \lambda$ ). Twee koppels (anderen dan degenen die bij het eerste onderdeel van opdracht 7 een onjuist antwoord gaven) antwoordden in eerste instantie dat het faseverschil gelijk is aan  $\Delta x \cdot \lambda$ . Deze leerlingen zagen, direct na lezen van de feedback, hun fout in.

Alle koppels konden ten slotte bij opdracht 8 de juiste relatie tussen  $c$  en  $\Delta\varphi$ ,  $f$  en  $\Delta x$  afleiden ( $c = f \cdot \Delta x / \Delta\varphi$ ). Hiermee hadden de leerlingen de juiste variabelen en de onderliggende relatie geïdentificeerd, hetgeen nodig was om de golftheorie in te kunnen zetten voor het bepalen van  $c$ .

#### *Onderbrekingen*

Tijdens de tweede onderbreking, direct na het eerste subcluster (inzet golfkarakter, opdrachten 07-09, na scherm 07) werd aan de leerlingen gevraagd in eigen woorden samen te vatten wat ze zojuist gedaan hadden. Bijna alle koppels (acht) noemden het inzetten van de golftheorie en het identificeren van de grootheden en onderlinge relaties. Bijvoorbeeld:

- We hebben een formule opgesteld en daarna hebben we de grootheden bepaald die we moeten gaan meten.

## Hoofdstuk 5

ME<sup>2</sup>: En welke grootheden zijn dat?

Frequentie, fase en de afstand tussen de lichtbron en de detector.

- We hebben de juiste formule bepaald. De verbanden tussen de  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta x$  en  $\lambda$  en  $f$ .

Het negende koppel noemt alleen dat ze het gereduceerde faseverschil hebben bestudeerd om na te gaan hoe dit ingezet kan worden. Het tiende koppel geeft in een wat onduidelijk antwoord aan dat ze de mogelijkheden van de opstelling hebben verkend:

- We hebben gekeken wat mogelijk was om te meten.

### Subvraag A.2.2

---

*Subvraag A2.2 Zien de leerlingen in dat de meetmethode moet worden aangepast omdat de opstelling de gereduceerde fase meet?*

---

#### *Inhoudelijke vragen op de site*

Voorafgaand aan opdracht 9 werden de leerlingen ervan bewust gemaakt dat de meetmethode nog moest worden aangepast omdat de detector niet het faseverschil, maar het gereduceerde faseverschil meet en dus niet kan zien hoeveel 'hele golflengten' het licht mogelijk al heeft afgelegd tussen bron en detector.

Opdracht 9 startte met het oproepen van de voorkennis ten aanzien van het gereduceerde faseverschil. De leerlingen moesten eerst aangeven hoeveel het faseverschil tussen twee punten in een animatie van een lopende golf is. Negen koppels beantwoordden deze opdracht goed (1,5). Het tiende koppel las de vraag verkeerd en gaf het antwoord voor het gereduceerde faseverschil. Zij zagen direct hun fout in. Daarna werd gevraagd hoeveel in dat geval het gereduceerde faseverschil was. Alle koppels gaven direct het juiste antwoord (0,5).

Vervolgens moesten de leerlingen aangeven in welke situatie het faseverschil gelijk is aan het gereduceerde faseverschil. Acht koppels zien in dat de afstand tussen bron en detector dan kleiner moet zijn dan de golflengte. De twee overige koppels antwoordden 'groter'.

Opdracht 9 werd afgesloten met een open vraag waarbij leerlingen moesten uitleggen welk praktisch probleem het meten van de gereduceerde fase in deze opstelling oplevert. Acht koppels gaven aan dat de golflengte heel erg klein is. Zes van deze koppels voegden hier aan toe dat de opstelling wel heel erg klein zou moeten zijn om zinvolle metingen te kunnen doen. Bijvoorbeeld:

- Volgens het antwoord moeten we de afstand tussen de bron en detector kleiner maken dan de golflengte. Aangezien de golflengte bijzonder klein is, zal de afstand tussen bron en detector zo klein zijn, dat het niet nauwkeurig meer te meten is.
- De golflengte is heel klein, je zou de twee apparaten praktisch tegen elkaar aan moeten zetten. Zelfs dan zou je het niet redden, bv. vanwege de dikte van de lens.

De twee overige koppels (koppels 6 en 8) gaven afwijkende antwoorden waarin ze

---

2 Met 'ME' wordt de interviewer aangeduid

niet de kern van het probleem raakten:

- We kunnen alleen het gereduceerde faseverschil meten, maar in de formule hebben we gewoon het faseverschil nodig.
- Je kan de golflengte niet meten, dus weet je ook niet wanneer de afstand kleiner is dan de golflengte.

### *Onderbrekingen*

De antwoorden van de leerlingen tijdens de tweede onderbreking (inzet golfkarakter, opdrachten 07-09, na scherm 07) op de vraag wat ze gedaan hadden, leverde aanvullende informatie ten aanzien van de tweede subvraag A2.2. Acht koppels brachten namelijk ter sprake dat er nog wel een probleem met de opstelling was omdat deze alleen de gereduceerde fase meet. Bijvoorbeeld:

- De apparatuur kan alleen maar de gereduceerde fase meten en niet hoeveel trillingen er tussen zitten.

Toen vervolgens werd gevraagd wat nu de volgende stap zou zijn konden wel alle koppels dit verwoorden. De leerlingen lijken in meer of mindere mate te herkennen dat er een probleem met de meting van het faseverschil is dat eerst opgelost moet worden (lokaal motief 2). Vijf koppels noemden het moduleren. Ze hadden ten tijde van de onderbreking hierover nog geen uitleg gehad, maar wisten wel de term te noemen als oplossing voor het geconstateerde probleem. Bijvoorbeeld:

- iets met modulatie. Ik bedoel, ik denk aan een modem.
- Je moet het lichtsignaal moduleren.

Drie koppels gingen directer in op het probleem dat opgelost moest worden. Bijvoorbeeld:

- De golflengte moet op een of andere manier groter worden gemaakt zodat je maar één...
- Het uittrekken van de golflengte.

De twee overige koppels gaven aan dat ze op zoek waren naar een manier om het faseverschil gelijk te maken aan het gereduceerde faseverschil. Bijvoorbeeld:

- Kijken hoe je het probleem op kunt lossen dat de bron en detector eigenlijk te ver uit elkaar staan, want ze staan zo ver uit elkaar dat er altijd een verschil is tussen de gereduceerde fase en de fase is.

## **5.3.3 Subcluster 2: Lichtsignaal moduleren**

### **Inleiding**

Nadat in het eerste subcluster aannemelijk is gemaakt dat de golflengte opgerekt moet worden (lokaal motief 2), krijgen de leerlingen bij de start van het tweede subcluster (figuur 5-4) het moduleerprincipe hiervoor als oplossing aangereikt.

Subvraag A2.3 gaat na of de leerlingen inzien dat het moduleren van het signaal het probleem van de te kleine golflengte oplost en of ze inzien welke aanpassing aan de meetmethode dit vereist.



**Figuur 5-4** Subcluster 2 (in cluster 2) van de didactische structuur waarop de subvragen A2.3 en A2.4 betrekking hebben.

Nadat de leerlingen het moduleren in de meetmethode verwerkt hadden, deden ze een meting om te evalueren of de meetmethode het gewenste resultaat opleverde. De verwachting was dat de constatering dat dit niet het geval is de leerlingen laat inzien dat de meetmethode nog verder moet worden aangepast en zo het derde lokale motief, dat de brug legt naar subcluster 3, oproept. Subvraag A2.4 gaat na of dit het geval was.

### Subvraag A2.3

**Subvraag A2.3** *Zien de leerlingen in dat het moduleren van het signaal dit probleem oplost door de golflengte van het signaal op te rekken en zien ze hoe de meetmethode daarbij moet worden aangepast?*

#### *Inhoudelijke vragen op de site*

De inhoudelijke vragen 10, 11 waren erop gericht de leerlingen te laten inzien hoe het moduleren het probleem van de te korte golflengte zou kunnen oplossen (eerste deel van A2.3).

Bij opdracht 10 moesten de leerlingen, aan de hand van een animatie, aangeven of de golfsnelheid van de gemoduleerde golf hetzelfde blijft als de golfsnelheid van de signaal golf. Op één koppel na geven alle koppels het juiste antwoord (snelheid verandert niet). Daarna moesten ze bij opdracht 11 uitrekenen wat de golflengte van de gemoduleerde golf is. Negen koppels komen op het juiste antwoord van 6 meter uit, het tiende koppel komt een factor 1000 te hoog uit. Acht koppels konden vervolgens op juiste wijze beargumenteren waarom dit lang genoeg is en zagen in dat het moduleren inderdaad voor het gewenste effect zorgt. De overige twee koppels geven argumenten die niet kloppen (eerste citaat) of onduidelijk geformuleerd zijn (tweede citaat):

- Nee, deze afstand is te groot.
- Ja, want de afstand is zo gereduceerd dat je er makkelijk aan kan meten.

Het doel van de daaropvolgende opdracht 12 was de leerlingen te laten inzien hoe de meetmethode aan het moduleren moest worden aangepast (tweede deel van A2.4) door hen erop te wijzen dat in de eerder afgeleide relatie nu de gemoduleerde frequentie  $f_{\text{mod}}$  moest worden ingevuld. Negen koppels geven inderdaad het juiste

antwoord  $f_{\text{mod}}$  op de vraag welke frequentie in de formule moet worden gebruikt. De leerlingen kunnen dus de inhoudelijke vragen op de site goed beantwoorden en voldoen daarmee aan de verwachtingen ten aanzien van dit subcluster.

Op grond van de vragen wordt echter nog niet duidelijk of ze het principe achter het moduleren ook werkelijk doorgrondten. Om hier wat beter zicht op te krijgen worden ook antwoorden van de derde onderbreking geanalyseerd.

### *Onderbrekingen*

De derde onderbreking vond plaats direct na het tweede subcluster (moduleren, opdrachten 10-13, na scherm 10). Tijdens deze derde onderbreking werd de leerlingen gevraagd wat ze bij de laatste stap gedaan hadden. De verwachting was dat ze hier zouden antwoorden dat ze gewerkt hadden aan het oplossen van het probleem dat de golflengte opgerekt moest worden en dat ze dat gedaan hadden door het lichtsignaal te moduleren; op die manier zou de afstand tussen bron en detector groter dan één golflengte worden. Zeven koppels noemen inderdaad in hun antwoord deze aspecten. Bijvoorbeeld:

- Het lichtsignaal gemoduleerd. Als ik het voorlees van het scherm.  
ME<sup>3</sup>: En wat is moduleren?  
Dan ga je de golflengte van het licht, die normaal heel klein is, oprekken tot 6 meter.
- Het lichtsignaal gemoduleerd. Zodat je het gereduceerde faseverschil meet en dat dat dan gelijk is aan het echte faseverschil als omweggetje omdat de golflengte te klein is.

Dit bevestigt dat de leerlingen, zoals beoogd, inderdaad lijken in te zien welk probleem het moduleren oplost. Uit de antwoorden volgt echter niet dat de leerlingen het principe achter het moduleren ook werkelijk doorgrondten. Vijf van de zeven koppels voegen een korte uitleg toe van wat moduleren is. Hieruit blijkt dat ze wel een idee hebben van wat het is, maar moeite hebben om dit onder woorden te brengen. Ze verwarren begrippen zoals lichtsnelheid (in het eerste citaat) en lichtfrequentie (in het derde citaat) met lichtsignaal; amplitude (in het vierde citaat) met intensiteit en amplitude (in het vijfde citaat) met intensiteit of golflengte en komen niet tot heldere beschrijvingen:

- Ja wij hebben het signaal gemoduleerd door een spanning van de lichtsnelheid te veranderen. Daardoor verandert de amplitude en dan krijg je dus de gemoduleerde golflengte die veel groter is.
- Je verandert de stroom in de diode en daardoor komt er een golf die de amplitude van je lichtgolf verandert en dan kun je van die modulatiegolf de frequentie en het faseverschil gebruiken. Want er verandert eigenlijk niets aan de lichtsnelheid want de golflengte wordt groter maar de frequentie wordt kleiner en de golflengte wordt zo groter dan  $\Delta x$
- Een elektrische spanning over de diode gezet waardoor er een soort tweede sinusgrafiek in die van het lichtfrequentie komt zodat je het gereduceerde faseverschil meet dat dan gelijk is aan het echte faseverschil.
- Gekeken wat eigenlijk moduleren van de lichtsnelheid is en daardoor hebben we ervoor gezorgd dat de amplitude groter wordt zodat de golflengte groter werd ofzo.

## Hoofdstuk 5

- We hebben eigenlijk de amplitude van het signaal vergroot en daardoor zijn de pieken en dalen van het signaal verder uit elkaar komen te liggen.

### *Overig: verslagen*

De leerlingen leken in te zien dat moduleren inderdaad ervoor zorgt dat de golflengte opgerekt wordt, maar hadden moeite het principe achter het moduleren te doorgronden. In ieder geval hadden ze moeite dat principe tijdens de onderbreking te formuleren. Dit is niet zo verrassend, aangezien moduleren volledig nieuw voor de leerlingen was. Het was waarschijnlijk moeilijk voor hen om, terwijl ze in de onderbrekingen werden overvallen door de vraag het principe uit te leggen, al improviserend tot een antwoord te komen.

Om dit vermoeden verder te onderzoeken werd daarom ook nagegaan wat de leerlingen hierover, nadat ze in alle rust het principe hadden kunnen overdenken, in de verslagen vermeldden. Dit moest duidelijker maken of de leerlingen het principe van het moduleren niet doorgronden of dat ze vooral moeite hadden om het tijdens het experiment te verwoorden.

In de verslagen beschrijven zeven van de tien koppels kort wat moduleren is. Ze noemen allemaal dat de intensiteit of amplitude van het lichtsignaal wordt gevarieerd waardoor er een nieuwe golf met een langere golflengte ontstaat. Bijvoorbeeld:

- In dit geval moduleren we de lichtbron, de amplitude wordt steeds groter en vervolgens weer kleiner, er ontstaat dus een grote golf.
- Het licht moet dus eerst gemoduleerd worden. Dit gebeurt door de spanning over de diode in de lichtbron te variëren, waardoor de amplitude varieert en de golflengte groter dan een meter wordt.
- Dat is een truc waarbij er een zogenaamde modulatiefrequentie over de lichtgolf wordt gebracht, waardoor de golflengte van het licht wordt uitgerekt. De amplitude van deze twee golven bij elkaar opgeteld is variabel, het is dus geen regelmatige sinusoïde meer maar een 'grillige functie'.

De formuleringen zijn minder rommelig dan tijdens de onderbrekingen maar nog steeds niet erg precies. Zo spreekt het eerste koppel over een 'grote golf' waar ze waarschijnlijk 'langere golflengte' bedoelen. Het tweede koppel noemt wel dat de golflengte groter wordt maar laten wat in het midden welke golflengte nu precies groter wordt. En ook op citaat van de derde koppel is het één en ander aan te merken. Zo spreken zij ook over de 'de golflengte van het licht' die groter wordt en maken niet expliciet dat het om de golflengte van het gemoduleerde licht gaat. Ook de woordkeuze "grillige functie" is wat vreemd voor de functie die er inderdaad niet meer als een sinusoïde uitziet maar toch zeer regelmatig is.

### **Subvraag A2.4**

---

**Subvraag A2.4** *Zien de leerlingen in dat de ontwikkelde meetmethode verder moet worden aangepast omdat de opstelling niet de juiste waarde van de lichtsnelheid levert?*

---

### *Inhoudelijke vragen op de site*

Bij het eerste onderdeel van opdracht 13 deden de leerlingen drie metingen. Hieruit bepaalden ze vervolgens de lichtsnelheid. Alle leerlingen kwamen op grond van hun metingen uit op een snelheid van rond de  $2 \cdot 10^8$  m/s. In het tweede onderdeel van de opdracht moesten de leerlingen aangeven of ze dit resultaat verwacht hadden. Alle koppels antwoordden dat ze dit niet verwacht hadden. Bijvoorbeeld:

- We hadden het niet verwacht, omdat het antwoord wat wij hebben met  $1.0 \cdot 10^8$  verschilt van de lichtsnelheid zoals die bekend staat.
- We hadden wel verwacht dat er niet precies de lichtsnelheid uit zou komen, maar het verschilt wel veel op zich.

Het probleem is blijkbaar door alle leerlingen gesignaleerd. De antwoorden op de onderbrekingen moeten duidelijk maken of het signaleren van het probleem bij de leerlingen ook de behoefte oproept uit te zoeken hoe de meetmethode verder aangepast moet worden.

### *Onderbrekingen*

De derde onderbreking (na opdrachten 10-13, na scherm 10) werd afgesloten met de vraag wat de volgende stap zou zijn. Acht koppels zien blijkbaar in dat de meetmethode verder aangepast moet worden want zij noemen in hun antwoord het elimineren van de fout. Bijvoorbeeld:

- De fouten eruit zien te vissen.
- Kijken waar de fout zit. Kijken waarom onze snelheid niet klopt met de lichtsnelheid.

Zeven koppels brachten ook al ter sprake dat de fout waarschijnlijk iets te maken had met de coaxkabels:

- In het begin werd al iets gezegd over die kabels.  
Coax ja, wat dat ook moge zijn.
- De coaxkabels, daar stond aan het begin iets over.

## **5.3.4 Subcluster 3: Systematische fout elimineren**

### **Inleiding**

In het derde subcluster zouden de leerlingen moeten inzien dat het verschil in lengte van de coaxkabels deze fout veroorzaakt en dat dit opgelost kan worden door het faseverschil te meten als functie van de afstand tussen bron en detector (subvraag A2.5). Nadat de meetmethode was aangepast ten einde de systematische fout te elimineren, moesten de leerlingen de metingen uitvoeren. Met deze meetgegevens konden ze ten slotte de waarde voor de lichtsnelheid in lucht bepalen (subvraag A2.6). Figuur 5-5 geeft het corresponderende fragment uit de didactische structuur.





**Figuur 5-5** Subcluster 3 (in cluster 2) waarop de subvragen A2.5 en A2.6 betrekking hebben.

### Subvraag A2.5

**Subvraag A2.5** *Zien de leerlingen in hoe de opstelling een systematische fout in de metingen veroorzaakt en hoe de ontwikkelde meetmethode verder moet worden aangepast om die systematische fout te elimineren?*

#### *Inhoudelijke vragen op de site*

Bij opdracht 14 werd aan de leerlingen gevraagd in welke variabele  $\Delta x$ ,  $\Delta\varphi$  en/of  $f_{\text{mod}}$  zij vermoedden dat de systematische fout zat. De verwachting was dat ze in staat zouden zijn te antwoorden dat deze waarschijnlijk in de meting van het faseverschil  $\Delta\varphi$  zit. Bijna alle koppels vermoedden dat de systematische fout in het faseverschil zat. Slechts één koppel kiest voor de modulatiefrequentie:

- De waarde van de modulatiefrequentie kan nogal afwijken van de gegeven waarde. Als deze niet klopt, wijkt ook meteen de golflengte van de "nieuwe" golf af. Daardoor is de meting van het faseverschil ook beïnvloed.

Acht koppels motiveerden de keuze voor het faseverschil door uit te sluiten dat de fout in  $\Delta x$  of  $f_{\text{mod}}$  zou kunnen zitten, waardoor  $\Delta\varphi$  overbleef. Vier van deze acht voegen hier als extra argument aan toe dat deze wordt gemeten door de computer terwijl de andere twee variabelen constant, zelf in te stellen of goed te controleren zijn. Twee van deze vier koppels betrokken in hun argumentatie de mogelijke oorzaak van de fout:

- Er kan geen fout zitten in  $\Delta x$  (want die kun je gewoon van de liniaal aflezen, daar kan niet zo veel misgaan) of in  $f_{\text{mod}}$  (want die stel je in aan het begin) maar wel in  $\Delta\varphi$ , omdat dat gemeten wordt door apparaten die weerstand kunnen hebben of de metingen kunnen beïnvloeden door opwarmen e.d.
- In de bovenstaande tekst wordt aangegeven dat het mogelijk kan liggen aan de weerstand in de kabels. Deze kabels bevinden zich tussen de detector, die het faseverschil meet, en de computer. Als zich daar een fout heeft voortgedaan, zal het faseverschil niet goed gemeten zijn in het experiment.

Aan de hand van de animatie in opdracht 15 verdiepten de leerlingen zich in de oorsprong van de systematische fout en moesten ze gaan inzien hoe deze veroorzaakt werd door het verschil in lengte van de coaxkabels. Eerst moesten ze, aan de hand van

de animatie, aangeven of de signalen die gelijktijdig bij de computer binnenkwamen ook gelijktijdig verstuurd waren. Alle koppels zagen in dat dit niet het geval is.

Drie koppels zagen niet direct welk signaal eerder vertrokken was. De overige zeven antwoordden wel dat de signalen die in de computer vergeleken werden vanaf de detector al eerder naar de computer verstuurd waren dan vanaf de bron.

Op de vraag of het door de computer gemeten faseverschil dan te groot of te klein was gaven vervolgens twee andere koppels een onjuist antwoord. De acht overige koppels beseften dat het gemeten faseverschil dan te groot was. Alle koppels hadden ten slotte door dat dit een te kleine waarde van de lichtsnelheid tot gevolg had en dat dit overeenkwam met wat ze zelf gemeten hadden.

De meeste leerlingen zagen dus in waar de systematische fout in zit, wat zijn oorsprong was en wat de gevolgen voor de gemeten waarden waren.

Doel van opdracht 16 was de leerlingen te sturen in het vinden van een manier om de systematische fout te elimineren. Eerst werd aan de leerlingen gevraagd hoe de  $\Delta\phi, \Delta x$ -relatie eruit zou zien bij gebruik van even lange kabels (lineair verband door de oorsprong). Ze konden kiezen uit drie diagrammen van een lineaire relatie met de asafsnede respectievelijk kleiner dan nul, gelijk aan nul en groter dan nul.

Slechts één koppel beantwoordde deze vraag in eerste instantie niet juist. Vervolgens moesten de leerlingen het diagram bij kabels van ongelijke lengte aanwijzen (lineair verband met asafsnede groter dan nul). Alle leerlingen gaven hier aan dat dan de asafsnede niet meer nul was, maar slechts de helft van de leerlingen koos het juiste diagram met een afsnede groter dan nul.

Na enkele tussenvragen (waarvoor meer aandacht bij de bespreking van het feedbacksysteem in hoofdstuk 6) zagen vier van deze vijf koppels dit alsnog in.

Opdracht 16 werd afgesloten met twee open vragen waarin de leerlingen moeten beschrijven hoe ze uit het diagram de systematische fout en de lichtsnelheid konden berekenen. Twee koppels gaven een vaag of onjuist antwoord op de vraag over de systematische fout. De overige acht zagen in dat de systematische fout volgt uit de waarde bij  $\Delta x=0$ . Bijvoorbeeld:

- We verschuiven de grafiek verticaal tot het faseverschil bij  $\Delta x = 0$  ook 0 is.
- Als je uitgaat van de standaardformule  $y=ax+b$ , dan zie je in het diagram een punt waarop de grafiek de y-as snijdt, dit is de waarde b. Dit is in de metingen de systematische fout. Als je dus de waarde van b weet te bepalen, kun je daarmee rekening houden in je berekening.
- Neem fase bij  $\Delta x=0$  en tel dat overal bij op.

Voor het bepalen van de lichtsnelheid kwamen alle koppels tot een redelijk antwoord.

Vier koppels noemden hier het gebruik van de richtingscoëfficiënt. Bijvoorbeeld:

- De helling van de lijn, deze is gelijk aan  $f_{\text{mod}}/c$ .

De overige zes koppels stelden voor de grafiek te gebruiken voor de bepaling van de systematische fout om vervolgens bij één bepaalde afstand  $\Delta x$  met het daar gemeten faseverschil  $\Delta\phi$  de lichtsnelheid te berekenen. Bijvoorbeeld:

- Het gemeten faseverschil, min de systematische fout, namelijk het faseverschil bij  $\Delta x=0$  en dat dan maal de frequentie  $f$ .

### *Onderbrekingen*

Toen de leerlingen voor de vierde keer werden onderbroken hadden ze juist de laatste stap in het ontwikkelen van de meetmethode gezet (na scherm 14, opdrachten 14-18). Ze hadden gewerkt aan het vinden van een methode om de systematische fout te elimineren, hadden metingen gedaan en deze verwerkt en gecontroleerd of ze nu wel op de juiste waarde uitkwamen. Ook hadden ze scherm 14 gelezen waarin de meetmethode samengevat werd. Bij de onderbreking werd hen gevraagd wat ze gedaan hadden. De verwachting was dat ze zouden aangeven dat ze gezocht hadden naar de systematische fout die veroorzaakt werd door een verschil in lengte van de coaxkabels en naar een manier deze systematische fout te elimineren. Alle negen koppels (aan het tiende koppel werd de vraag bij vergissing niet gesteld) noemden inderdaad dat ze bezig waren geweest met het vinden en verwerken van de systematische fout. Bijvoorbeeld:

- We hebben gekeken wat systematische fouten inhielden. Bij welke grootte hij ligt. Waardoor hij veroorzaakt wordt. Toen hebben we bedacht hoe je dat in de formule zag en hoe je hem kon weghalen. Vervolgens hebben we dat gedaan met een nieuwe meting. En dan kom je dus goed uit.

Alle negen koppels verwoordden in hun antwoorden ook dat ze de systematische fout hadden geëlimineerd met behulp van een  $\Delta\phi, \Delta x$ -grafiek.

Nog maar twee koppels maakten in hun beschrijving geen gebruik van de richtingscoëfficiënt, terwijl dat er bij de inhoudelijke vragen nog zes waren:

- We hebben het gemeten faseverschil en  $\Delta x$  uitgezet in een grafiek en toen met Excel berekend waar hij de y-as zou snijden. En we hebben gezien dat de systematische fout zit in het gemeten faseverschil. Daar moet je de waarde waar hij de y-as snijdt vanaf trekken en zo vind je het faseverschil wat je nodig hebt in de berekening. En dat hebben we vervolgens uitgerekend.

De overige zeven antwoordden de richtingscoëfficiënt te gebruiken. Eén van deze zeven noemde beide manieren.

Ten aanzien van de coaxkabels moet nog worden opgemerkt dat twee koppels wat frustratie toonden over het verschil in lengte van de kabels. Bijvoorbeeld:

- Ik vond die opstelling ook wat knullig. Ik vraag me nog steeds af waarom kun je die kabels niet even lang maken. Dat is toch niet zo moeilijk?

### **Subvraag A2.6**

---

*Subvraag A2.6* Zijn de leerlingen in staat uiteindelijk uit de metingen de lichtsnelheid in lucht te bepalen?

---

### *Inhoudelijke vragen op de site*

Bij opdracht 17 moesten de leerlingen meetdata verzamelen om hieruit de lichtsnelheid te bepalen. Op één koppel na, dat de x- en y-as omwisselde, vonden allen een redelijke waarde voor de lichtsnelheid.

Op de vraag of het evalueren van de meetmethode in lucht nu het resultaat opleverde wat ze verwacht hadden, antwoordden alle negen koppels dat dit inderdaad het geval was. Bijvoorbeeld:

- Ligt dicht bij de officiële waarde.
- Veel dichter bij de echte lichtsnelheid dan het vorige antwoord.
- Nu veel dichter in de buurt van de 'echte' waarde.

### **5.3.5 Conclusie**

Doel van onderzoeksvraag A2 was na te gaan of de website, waarin het tweede cluster van de didactische structuur was uitgewerkt, aan zijn functie voldeed. In dit tweede cluster werkten de leerlingen aan het ontwikkelen en vervolgens toepassen van een meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid in lucht.

#### **Subvraag A2.1**

Bij de start van het eerste subcluster waren de leerlingen al nieuwsgierig gemaakt naar hoe het golfkarakter van licht gebruikt kon worden (lokaal motief 1). Er werd nagegaan of de leerlingen, na het doorlopen van het eerste subcluster, inzagen hoe dit golfkarakter ingezet kon worden. De leerlingen bleken in staat de inzet van de golftheorie te verwoorden en het verband tussen de lichtsnelheid, frequentie, faseverschil en afstand tussen bron en detector te geven.

#### **Subvraag A2.2**

Vervolgens werd nagegaan of ze ook zagen welke aanpassing aan de meetmethode nodig was omdat de meetopstelling alleen het *gereduceerde* faseverschil kon meten.

De meeste leerlingen konden verwoorden dat de afstand tussen de bron en detector groter moest zijn dan de golflengte en begrepen dat de meetmethode moest worden aangepast omdat de opstelling het gereduceerde faseverschil meet.

De leerlingen konden dus benoemen dat er iets moest gebeuren en er waren geen aanwijzingen dat zij het zoeken naar een oplossing hiervoor niet als een logische volgende stap ervoeren. Ook het tweede lokale motief leek dus succesvol opgeroepen en de verbinding naar de tweede ontwikkelingsstap waarin de leerlingen de methode gingen aanpassen om de golflengte op te rekken succesvol gelegd.

### **Subvraag A2.3**

Nadat het moduleren was geïntroduceerd als een methode om de golflengte op te rekken, moest de derde subvraag nagaan of de leerlingen inzagen dat dit het probleem zou oplossen en of ze vervolgens ook begrepen hoe de meetmethode hierop aangepast moest worden. Hier ontstonden voor de leerlingen de eerste problemen. Al zagen de meeste leerlingen in waarom het nodig was te moduleren, het onder woorden brengen van wat het precies inhield vonden zij lastig. Wel konden de leerlingen verwoorden hoe de meetmethode door het moduleren aangepast moest worden. Bovendien zagen alle leerlingen dat dit uiteindelijk voor de gewenste oplossing zorgde. Al hadden de leerlingen dus problemen om precies te verwoorden wat het moduleren inhield, ze begrepen wel dat het voor een oplossing zorgde en het vormde dus geen struikelblok voor de verdere voortgang.

### **Subvraag A2.4**

De vierde subvraag (A2.4) ging na of de leerlingen inzagen dat de meetmethode nog verder moest worden aangepast omdat de opstelling niet de juiste waarde van de lichtsnelheid levert (lokaal motief 4).

Toen de tweede evaluatiestap geen juiste waarde voor de lichtsnelheid opleverde, zagen alle leerlingen in dat er nog iets mis was met de meetmethode. Bijna allemaal vermoedden ze dat de fout zat in de meting van het faseverschil en vrijwel alle leerlingen waren in staat aan te geven dat de volgende stap het elimineren van de systematische fout zou moeten zijn. De leerlingen lijken hiermee de volgende stap zinvol te vinden en het derde lokale motief lijkt in voldoende mate opgeroepen. Een ruime meerderheid van de koppels had blijkbaar eerdere vooruitwijzingen naar de coaxkabels opgepikt en noemden deze ook.

### **Subvraag A2.5**

De vijfde subvraag moest duidelijk maken of de leerlingen inzagen hoe de opstelling een systematische fout in de metingen veroorzaakte en hoe de meetmethode moest worden aangepast om die systematische fout te elimineren.

Ook al vermoedden de meeste leerlingen een systematische fout in het faseverschil, inzien wat de gevolgen hiervan voor de meetresultaten waren bleek niet voor iedereen vanzelfsprekend. Enkele koppels hadden moeite in te zien dat de signalen die door de computer vergeleken werden niet gelijktijdig bij de bron en de detector vertrokken waren. Ook inzien wat dit voor het gemeten faseverschil betekende werd moeilijk gevonden. Afleiden wat precies de gevolgen zouden zijn voor de meetmethode was dan ook in eerste instantie voor een aantal leerlingen lastig. Toch waren uiteindelijk wel alle leerlingen in staat te beschrijven hoe de systematische fout uit de meetdata geëlimineerd kon worden.

### Subvraag A2.6

Ten slotte moest worden nagegaan of de leerlingen uiteindelijk de lichtsnelheid in lucht uit de metingen konden bepalen.

Alle leerlingen bleken hiertoe in staat. Bij de inhoudelijke vragen gebruikte een minderheid de richtingscoëfficiënt om de lichtsnelheid te berekenen. Bij de onderbreking, nadat de leerlingen net de pagina met een samenvatting van beide methoden hadden gelezen, noemden wel bijna alle koppels deze manier.

## 5.4 Resultaten A3: Lichtsnelheid in andere media

### 5.4.1 Inleiding

Bij afronding van deel 2 (scherm 14) werd teruggeblikt op de ontwikkelde meetmethode. De verwachting was dat leerlingen, na het lezen van deze terugblik, in staat zouden zijn relatief zelfstandig de ontwikkelde procedure verder uit te bouwen tot een meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht. Dit is uitgewerkt in fase 4 van de didactische structuur (derde cluster, zie Figuur 5-6).



**Figuur 5-6** Derde cluster van de didactische structuur waarop onderzoeksvraag A.3 betrekking heeft. Voor de volledige figuur zie hoofdstuk 3, figuur 10

De didactische functie van de vierde fase is het toepassen van de ontwikkelde en geëvalueerde procedure voor het meten van de lichtsnelheid in lucht op het meten van de lichtsnelheid in andere media. Van de leerlingen werd verwacht dat zij – met minder begeleiding dan in het eerdere materiaal – de ontwikkelde meetmethode konden aanpassen voor gebruik in een meer complexe situatie. De derde onderzoeksvraag A3 ging na of het materiaal aan de didactische functie voldeed:

**Onderzoeksvraag A3.** *Zien de leerlingen in hoe de ontwikkelde meetmethode moet worden aangepast voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht en kunnen ze deze toepassen?*

Aan de hand van vier subvragen werd nagegaan of de leerlingen voldoende inhoudelijk

inzicht hadden en of ze steeds doorhadden waar ze mee bezig waren. Nagegaan werd of de leerlingen de meetmethode succesvol konden aanpassen (subvraag A3.1) en of ze hiermee tot goede meetresultaten komen (subvraag A3.2). Daarnaast werd, als onderdeel van de derde onderzoeksvraag ook nagegaan hoe de leerlingen de werkwijze van ontwikkelen en evalueren (subvraag A3.3) en de beperkte begeleiding (subvraag A3.4) ervaren hadden.

Omdat de eerste twee subvragen gericht waren op het cognitieve proces en het inhoudelijk inzicht van de leerlingen nagingen, werden voor beantwoording de inhoudelijke vragen ingezet als onderzoeksinstrument. De leerlingen hadden de opdracht gekregen om in de leerlingverslagen de ontwikkelde meetmethode en de gevonden resultaten te beschrijven. Deze verslagen werden gebruikt om ook zicht op het kennisniveau van de leerlingen krijgen nadat ze het gehele proces hadden doorlopen. De leerlingverslagen werden daarom ook ingezet als onderzoeksinstrument voor de beantwoording van de subvragen A3.1 en A3.2.

**Tabel 5-3** Onderzoeksinstrumenten bij onderzoeksvraag A3

	Inhoudelijke vragen	Onderbrekingen	Interview na afloop	Belevings-enquête	Leerlingverslagen
Subvraag A3.1	X				X
Subvraag A3.2	X				X
Subvraag A3.3			X		
Subvraag A3.4			X	X	

De subvragen A3.3 en A3.4 probeerden in kaart te brengen hoe de leerlingen het doorlopen leerproces hadden beleefd. De interviews na afloop en de belevingsenquête werden ingezet als onderzoeksinstrumenten. De leerlingen ondervonden in deel 3, zoals verwacht omdat de begeleiding beperkter was, meer problemen dan in het voorafgaande lesmateriaal. Om zicht te krijgen op de problemen van de verschillende koppels wordt bij het beschrijven van de resultaten vermeld over welk koppel het gaat. In tabel 5-3 is samengevat welke onderzoeksinstrumenten zijn ingezet bij het beantwoorden van de derde serie subvragen.

#### 5.4.2 Subvraag A3.1

**Subvraag A3.1** *Zien de leerlingen in dat het plaatsen van een cuvet met een ander medium dan lucht tussen bron en detector leidt tot een extra faseverschil en hoe daaruit de lichtsnelheid in het betreffende medium te bepalen is?*

Voordat de leerlingen de lichtsnelheid in andere media konden bepalen moesten zij eerst de ontwikkelde meetmethode verder aanpassen. Ze zouden moeten inzien dat het plaatsen van een cuvet tussen bron en detector met een ander medium dan lucht

leidt tot een extra faseverschil, waardoor de  $\Delta\phi, \Delta x$ -relatie die nu gemeten wordt, verschilt van de eerder gemeten relatie in lucht. De leerlingen zouden moeten inzien hoe uit de verticale verschuiving de lichtsnelheid in het medium berekend kan worden.

### **Inhoudelijke vragen op de site**

#### *Gevolgen voor faseverschil*

Doel van opdracht 19 is de leerlingen bewust te maken van de gevolgen voor het faseverschil wanneer er een medium tussen bron en detector geplaatst wordt.

Eerst moesten de leerlingen antwoorden wat er met de lichtsnelheid in een ander medium dan lucht gebeurt. Negen koppels gaven het juiste antwoord (is kleiner). Vervolgens konden alle tien koppels aangeven dat dit betekent dat de golflengte van het licht in het medium kleiner is. Bij het laatste onderdeel van opdracht 19 zagen ook alle koppels dat in dat geval het gemeten faseverschil tussen bron en detector groter wordt.

#### *Meetmethode poging 1*

Bij opdracht 20 moesten de leerlingen in een open vraag beschrijven hoe de meetmethode er volgens hen uit moest zien. Om te voorkomen dat leerlingen hier een antwoord geven waar ze niet achter staan werd in de vraag expliciet aangegeven dat ze hier desnoods 'geen idee' mochten antwoorden. Twee koppels (koppel 1 en 2) maakten hiervan gebruik. De overige acht deden wel een poging. Een volledig antwoord zou minstens twee elementen moeten bevatten. Ten eerste dat je met een medium ertussen een constant groter faseverschil meet. Ten tweede hoe je dit extra faseverschil kunt gebruiken om de lichtsnelheid te berekenen.

In de antwoorden van de acht koppels is te herkennen dat ze de snelheid willen gaan berekenen uit het verschil tussen het faseverschil met en zonder medium ertussen. De beschrijvingen van het tweede element zijn echter summier, onjuist of ontbreken. Twee van de acht koppels beperkten hun antwoord tot alleen het eerste element. Bijvoorbeeld:

- (Koppel 3) Je meet met een ander medium en zet deze gegevens uit in een grafiek in Excel, samen met de meetgegevens van lucht. Je zal een verschil zien in de lijnen van de grafiek, en met behulp daarvan kan je de lichtsnelheid in het andere medium bepalen.
- (Koppel 4) De asafsnede is de systematische fout plus het extra faseverschil, dus die laatste kan je berekenen. Verder weten we het nog niet.

Zes van de acht koppels benoemden naast het eerste element ook dat het gehele traject moest worden opgesplitst in een deel met medium en een deel met lucht. Ook gaven zij aan dat er iets moest gebeuren met het verschil in gemeten faseverschil met medium en zonder medium tussen bron en detector, maar zijn niet duidelijk over hoe ze uit de metingen de lichtsnelheid kunnen bepalen.

De beschrijvingen van de overige twee koppels wijken af van de meetmethode die in het materiaal wordt aangedragen (wanneer gekozen wordt voor het begeleid aanpassen van de methode), maar lijken, na nauwkeurige analyse, wel correct te zijn.



## Hoofdstuk 5

- Het ene koppel is nogal summier in hun beschrijving:
  - (Koppel 9) Je meet voor lucht bij een afstand  $x$  - de lengte van het medium, vervolgens meet je lengte  $x$  met het medium en corrigeer je met de oude meting.

Wat ze waarschijnlijk bedoelden is dat ze een eerste meting willen doen zonder medium over een bepaalde afstand  $\Delta x - L$  ( $L$ =lengte van het medium). Vervolgens willen ze de detector over een afstand  $L$  verschuiven, het medium ertussen plaatsen en een tweede meting doen. Het verschil tussen de hierbij gemeten faseverschillen geeft dan immers het faseverschil als gevolg van het medium. Het koppel beschrijft echter niet hoe hieruit dan vervolgens de lichtsnelheid in het medium bepaald kan worden.

- Het andere koppel baseert hun methode op het idee dat, in de situatie met een medium tussen bron en detector, de totale tijd die het licht aflegt gelijk is aan de tijd die het licht zich door het medium verplaatst plus de tijd die het licht door de lucht beweegt:
  - (Koppel 10) Eerst meten we de lichtsnelheid van de opstelling (dus lucht + medium). Dit doen we zoals we het net ook hebben gedaan. We weten de normale lichtsnelheid, dus kunnen we de lichtsnelheid in alleen het medium uitrekenen:  $(\text{afstand}/v)_{\text{van totaal}} = (\text{afstand}/c)_{\text{van lucht}} + (\text{afstand}/v)_{\text{van medium}}$ . Dan weten we de snelheid van het licht door het medium.

In eerste instantie lijkt dit een wat vaag antwoord, vooral omdat ze niet toelichten wat ze met de snelheid  $v_{\text{(van totaal)}}$  bedoelen. Maar wanneer we dit interpreteren als een soort gemiddelde snelheid bij doorlopen van medium en de omringende lucht en we wat preciezer proberen te begrijpen wat het koppel bedoelt, dan lijkt het toch geen onredelijk antwoord.

Wanneer we gebruik maken van  $t_{\text{totaal}} = t_{\text{door lucht}} + t_{\text{door medium}}$  dan kan '(afstand/ $v$ )<sub>van totaal</sub> = (afstand/ $c$ )<sub>van lucht</sub> + (afstand/ $v$ )<sub>van medium</sub>' namelijk herschreven worden naar: 
$$\frac{\Delta x}{c_{\text{totaal}}} = \frac{\Delta x - L}{c_{\text{lucht}}} + \frac{L}{c_{\text{medium}}}$$

De leerlingen lichtten echter niet toe hoe dit verder verwerkt zou moeten worden en noemden bijvoorbeeld niet dat een vaste afstand tussen bron en detector  $\Delta x$  gekozen zou moeten worden en  $c_{\text{totaal}}$  zou kunnen worden gesubstitueerd door de meetbare grootheden:  $c_{\text{totaal}} = \frac{\Delta x}{\Delta \varphi_{\text{totaal}}} \cdot f_{\text{mod}}$ . Ook vermeldden ze niet dat het in deze situatie gemeten faseverschil gecorrigeerd moet worden voor de eerder geconstateerde systematische fout om tot een waarde voor  $\Delta \varphi_{\text{totaal}}$  te komen die kan worden ingevuld (of wellicht sloeg 'Dit doen we zoals we het net ook hebben gedaan' daarop). Analyse van de observaties maakte ook duidelijk dat dit koppel in dit stadium de uitvoering van hun idee nog niet helemaal doordacht hadden:

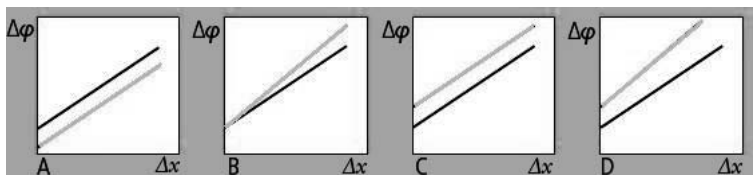
- L1: Hoe weet je dan de snelheid van het totaal?  
L2: Die meten we.  
L1: Ok, alleen je zit dan wel met dat de fase niet constant is, of maakt dat niks uit?  
L2: Weet ik niet. Het lijkt me gewoon logisch zo.

Bij het tweede deel van opdracht 20 moesten de leerlingen kiezen of ze de

meetmethode aan de hand van enkele opdrachten wilden ontwikkelen of dat ze direct wilden starten met het toepassen van de door hen bij opdracht 19 beschreven meetmethode. Geen van de koppels voelde zich blijkbaar zeker genoeg om direct met meten te starten, want alle leerlingen kozen voor het eerst vraaggestuurd ontwikkelen van de meetmethode.

### $\Delta\varphi, \Delta x$ -relatie

Bij opdracht 21 moesten de leerlingen aangeven welke figuur weergeeft hoe een diagram met het faseverschil als functie van de afstand er met medium (grijze lijn) en zonder medium (zwarte lijn) uit zou zien (zie Figuur 5-7).



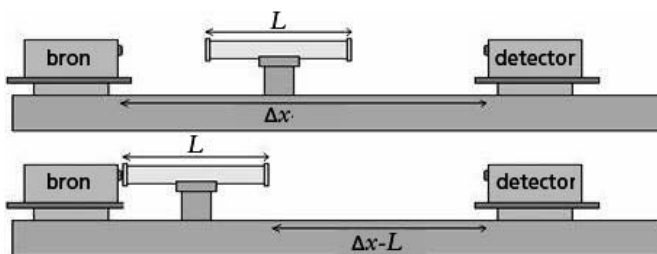
**Figuur 5-7** Diagrammen van opdracht 21.

De leerlingen moesten het diagram kiezen dat het beste de gemeten fase met medium (grijze lijn) en zonder medium (zwarte lijn) representeert.

Drie koppels (koppels 9 en 10, die de meetmethode ook al heel aardig beschreven en koppel 6) kiezen direct het juiste diagram C. De koppels 5 en 7 kiezen voor B en zien blijkbaar nog niet in dat het medium voor een *constant* extra faseverschil zorgt. Ook de overige vijf koppels lijken dit niet te zien, want zij kiezen voor diagram D. In de feedback worden de leerlingen alsnog op het constante extra faseverschil gewezen.

### Afleiding formule

Vervolgens gaan de leerlingen bij opdracht 22, aan de hand van Figuur 5-8, in stapjes, een relatie voor de lichtsnelheid in andere media afleiden.



**Figuur 5-8** Opsplitsing van de ruimte tussen bron en detector.

Door de ruimte op te splitsen uit een deel met medium en een deel met lucht (onderste figuur) kan een relatie afgeleid worden voor de lichtsnelheid in het medium.

Eerst worden ze gevraagd de formule voor het faseverschil tussen bron en detector uitgedrukt in  $\Delta x$ ,  $f_{\text{mod}}$  en  $c$  te herhalen voor verplaatsing door alleen maar lucht.

Acht koppels geven hier de juiste relatie ( $\Delta\varphi_{\text{lucht}} = (f_{\text{mod}}/c) \cdot \Delta x$ ).

Daarna moesten ze het faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{lm}}$  dat de detector meet wanneer er een medium (met lengte  $L$ ) tussen bron en detector wordt geplaatst, uitdrukken in  $\Delta x$ ,  $L$ ,  $c$ ,  $c_m$  en  $f_{\text{mod}}$ :  $\Delta\varphi_{\text{lm}} = \Delta\varphi_l + \Delta\varphi_m = (\Delta x - L)/c \cdot f_{\text{mod}} + (L/c_m) \cdot f_{\text{mod}}$ .

Slechts vier koppels (6, 7, 8 en 9) bleken hiertoe in staat. Van de overige zes koppels antwoordden twee koppels (5 en 10)  $\Delta\varphi_m = (L/c_m) \cdot f_{\text{mod}}$  en deze leken zich er niet van bewust dat het licht in de gevraagde situatie zich ook nog door lucht moet verplaatsen.

In het laatste onderdeel moesten ze ten slotte afleiden hoeveel na tussenplaatsen van een medium het *extra* faseverschil is ten opzichte van de situatie zonder medium. Dit is dus het verschil tussen het faseverschil afgeleid bij de vorige vraag (met medium) en het faseverschil in lucht:  $\Delta\varphi_{\text{extra}} = \Delta\varphi_{\text{lm}} - \Delta\varphi_{\text{lucht}} = (\Delta x - L)/c \cdot f_{\text{mod}} + (L/c_m) \cdot f_{\text{mod}} - (\Delta x/c) \cdot f_{\text{mod}}$ . Dit kan vereenvoudigd worden tot  $\Delta\varphi_{\text{extra}} = ((L/c_m) - (L/c)) \cdot f_{\text{mod}}$ .

Twee koppels (7 en 10) gaven deze vereenvoudigde relatie. Vijf koppels (1, 2, 3, 4, 6) zagen wel in dat de twee eerder afgeleide relaties van elkaar afgetrokken moeten worden maar vereenvoudigden deze niet waardoor in de relatie  $\Delta x$  bleef staan.

De overige drie koppels (8, 9 en opnieuw koppel 5) beantwoordden deze vraag fout. Zij gaven hier (weer) alleen het faseverschil als gevolg van het doorkruisen van het medium  $((L/c_m) \cdot f_{\text{mod}})$ . Deze leerlingen leken zich nog niet voldoende bewust dat het licht zich slechts over een afstand  $L$  door het medium verplaatst en niet de gehele ruimte tussen bron en detector met medium opgevuld is.

### Meetmethode poging 2

Nadat de juiste formule was afgeleid werden de leerlingen bij opdracht 23 opnieuw gevraagd de meetmethode te beschrijven.

- Vijf koppels (2, 3, 5, 6, 10) geven een goede beschrijving waarin ze noemen dat het faseverschil met en zonder medium moet worden gemeten en dat het verschil tussen deze gemeten faseverschillen kan worden gebruikt in de relatie voor het extra faseverschil (zoals afgeleid bij de vorige opdracht). Bijvoorbeeld:
  - Je meet met het andere medium nieuwe metingen, en zet deze metingen uit in een grafiek. In diezelfde grafiek zet je ook je metingen van lucht, en vervolgens trek je  $\Delta\varphi$  van lucht van je  $\Delta\varphi$  van je medium af. Daarna heb je een nieuwe  $\Delta\varphi$  die je invult in de formule waarmee je de lichtsnelheid berekent.
  - We doen een aantal metingen met dezelfde afstanden als hiervoor met alleen lucht. We trekken van de fase die we meten, de fase van hiervoor, af. Dus hebben we dan de extra fase. Dan is het invullen in de formule  $\Delta\varphi_{\text{extra}} = ((L/c_m) - (L/c)) \cdot f_{\text{mod}}$ . Alles is bekend, behalve  $c_m$ . Hierdoor weten we dus de lichtsnelheid in het medium.
- Twee andere koppels (4 en 9) geven wat summiere, maar wel correcte, beschrijvingen:
  - Je berekent de  $c_m$  met de vorige formule, en de  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  met  $\Delta\varphi_{\text{lm}} - \Delta\varphi_{\text{lucht}}$

## De A-vraag: het functioneren van de didactische structuur

- Extra faseverschil bepalen door asafsnede min systematische fout te doen. Dan formule omschrijven naar  $c_m = \dots$ . Dan invullen.
- De beschrijvingen van de overige drie koppels zijn onjuist of vaag. Twee koppels (7 en 8) leken hun methode te baseren op de formule voor  $\Delta\varphi_{lm}$ :
  - Je meet de fase(lm). Dan vul je die in de formule in. En dan kan je de lichtsnelheid berekenen door het medium.
  - Je gaan kijken wat  $\Delta\varphi$  is over de hele opstelling. We meten  $c$ ,  $f_{mod}$ ,  $\Delta x$  en  $L$  en zo kunnen we  $c_m$  bepalen.

Koppel 1 benoemt niet welk faseverschil ze willen meten:

- Je weet de frequentie, de  $L$ , de  $c$  en het faseverschil meet je, dus dan kan je de  $c$  in het andere medium uitrekenen.

## Verslagen

Om meer zicht te krijgen op de problemen die drie koppels (koppels 1, 7 en 8) hadden bij het formuleren van het meetplan werden ook hun beschrijvingen hiervan in de verslagen bestudeerd. Koppel 1 schreef in hun verslag:

- Omdat de lichtgolf dan ook nog door lucht gaat, moet je het berekende faseverschil met een cuvet ertussen aftrekken van het berekende faseverschil op die afstand met alleen lucht. Dan heb je het extra faseverschil. Met behulp van de formule  $\Delta\varphi_{extra} = ((L/c_m) - (L/c)) \cdot f_{mod}$  kan je dan dus de lichtsnelheid door het medium meten ( $c_m$ ).

Afgezien van de wat vreemd gekozen formulering 'berekende faseverschil', geven ze in hun verslag dus wel een correcte beschrijving van de meetmethode.

Koppel 7 had ten tijde van het verslag geen problemen meer de meetmethode onder woorden te brengen en gaf een prima beschrijving:

- Om de lichtsnelheid in andere media te berekenen, is een andere formule nodig. In de meetopstelling schuiven we een ander medium, een buis van 35 cm lang, gevuld met water of perspex, tussen de bron en de detector. Hierdoor wordt het gemeten faseverschil groter: Bij iedere waarde  $\Delta x$  komt er eenzelfde extra  $\Delta\varphi$  bij. Voor het nieuwe faseverschil vonden wij de volgende formule:  $\Delta\varphi_{lm} = ((\Delta x - L) \cdot f_{mod}) / c + (L \cdot f_{mod}) / c_m$ , waarin  $L$  de lengte van het medium is (35 cm), en  $c_m$  de lichtsnelheid in het medium. Voor het extra faseverschil vonden we de volgende formule:  $\Delta\varphi_{extra} = (L \cdot f_{mod}) / c_m - (L \cdot f_{mod}) / c$

Koppel 8 gaf in hun verslag alleen een algemene beschrijving van de meetmethode. Ze noemen hierin de relatie voor het extra faseverschil en ook de relatie voor het faseverschil  $\Delta\varphi_{lm}$  dat de detector meet na tussenplaatsen van het medium, zonder toe te lichten dat deze relatie alleen maar relevant was in de afleiding van de relatie voor het extra faseverschil. Dit roept enige twijfel op over of ze de meetmethode nu wel werkelijk begrepen hebben:

- Doordat de lichtstraal door zowel lucht als een ander medium ging ontstond er een faseverschil. Dit leverde de volgende formules op:  
 $\Delta\varphi_{lm} = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_m = ((\Delta x - L)/c) \cdot f_{mod} + (L/c_m) \cdot f_{mod}$  en  $\Delta\varphi_{extra} = ((L/c_m) - (L/c)) \cdot f_{mod}$ . Door deze formules om te schrijven kregen we de volgende formule, waarmee we de lichtsnelheid door het medium konden berekenen:  $c_m = L / (\Delta\varphi_{extra} / f_{mod} + L / c)$ .

### 5.4.3 Subvraag A3.2

**Subvraag A3.2** Zijn de leerlingen in staat de lichtsnelheid in een aantal media te bepalen?

#### Inhoudelijke vragen op de site

Bij opdracht 24 moesten de leerlingen de ontwikkelde meetmethode toepassen, de gevonden lichtsnelheden in de media water en perspex uitrekenen en het antwoord invullen. Negen koppels geven een antwoord dat in buurt van de literatuurwaarde ligt (respectievelijk  $2,0$  en  $2,3 \cdot 10^8$  m/s). Vier van hen (koppels 1, 6, 7 en 8) hadden hiervoor wel ongeplande externe hulp nodig om tot dit antwoord te komen. De koppels 1, 7 en 8 hadden ook al moeite om het meetplan te formuleren, maar koppel 6 had in de voorbereiding geen grote problemen laten zien. De externe hulp was nodig omdat deze koppels niet goed leken te begrijpen wat  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  was en waarom deze nodig was voor het vinden van de lichtsnelheid in het medium. Ze wilden bij het verwerken van de meetgegevens de gemeten waarden in de relatie voor  $\Delta\varphi_{\text{lm}}$  invullen. Na de ongeplande onderbreking werd hen alsnog duidelijk dat ze  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  moesten gebruiken. Tabel 5-4 geeft een samenvatting van de antwoorden van de leerlingen op de belangrijkste onderdelen van deel 3. Deze tabel laat zien dat drie van de vier koppels die uiteindelijk hulp nodig hadden tijdens de uitvoering van de metingen ook in de voorafgaande stappen problemen hadden. Verder valt op dat de twee koppels die al een aardig eerste meetplan schreven (koppels 9 en 10) de voorbereidende opdrachten ook redelijk goed doorliepen. Ze lieten wel hun initiële plan los en formuleerden het tweede meetplan aansluitend bij de ondersteunende opdrachten.

**Tabel 5-4** Samenvatting van de resultaten van de meetplannen en afleiding van meetmethode in andere media. De grijstint representeert hoe goed het antwoord was, van wit (juist) naar donkergrijs (onjuist).

	Opd 20 Meetplan 1	Opd 21 $\Delta\varphi, \Delta x$ -diagram	Opd 22: Afleiding $\Delta\varphi_{\text{lm}}$ $\Delta\varphi_{\text{extra}}$		Opd 23 Meetplan 2	Opd 24 Metingen
1	Geen idee	Onjuist	Onjuist	Half	Vaag	Hulp
2	Geen idee	Onjuist	Onjuist	Half	Ok	Ok
3	Extra $\Delta\varphi$ benoemd	Onjuist	Onjuist	Half	Ok	Ok
4	Extra $\Delta\varphi$ benoemd	Onjuist	Onjuist	Half	Summier	Ok
5	Extra $\Delta\varphi$ en opsplitsing traject benoemd	Onjuist	Onjuist	Onjuist	Ok	Ok
6	Extra $\Delta\varphi$ en opsplitsing traject benoemd	Ok	Ok	Half	Ok	Hulp
7	Extra $\Delta\varphi$ en opsplitsing traject benoemd	Onjuist	Ok	Ok	Vaag	Hulp
8	Extra $\Delta\varphi$ en opsplitsing traject benoemd	Onjuist	Ok	Onjuist	Vaag	Hulp
9	Summiere, juiste maar afwijkende methode	Ok	Ok	Onjuist	Summier	Ok
10	Juiste, maar afwijkende methode	Ok	Onjuist	Ok	Ok	Ok

Het vergelijken van de gevonden waarde met de literatuurwaarde zorgt bij deel 3 nog voor wat problemen. In BINAS is namelijk alleen de brekingsindex van water en perspex te vinden, maar niet de lichtsnelheid in deze media. In het lesmateriaal wordt dit pas vermeld nadat de leerlingen de waarde voor de lichtsnelheid al hebben moeten opgeven en zes koppels vragen zich hiervoor al af of ze de juiste waarde gevonden hebben.

### *Cuvet-correctie*

Het experiment wordt afgesloten met het corrigeren voor het extra faseverschil dat ontstaat doordat het licht door de glasplaatjes van het cuvet gaat (opdracht 25). Hiervoor is in de opstelling een lege cuvet beschikbaar. Door het extra faseverschil als gevolg van de cuvet met water te meten ten opzichte van het extra faseverschil als gevolg van de lege cuvet kan voor glasplaatjes gecorrigeerd worden.

Zes koppels (2, 5, 6, 7, 9 en 10) konden dit zo beschrijven. Drie van hen (6, 9 en 10) hadden het zelfs direct al gedaan bij de eerste berekening van de lichtsnelheid in water. Het zevende koppel (3) formuleerde de meetmethode niet erg precies, maar gaf wel een juiste waarde voor de gecorrigeerde lichtsnelheid, dus begreep het waarschijnlijk wel:

- We meten het extra faseverschil met de lege buis aanwezig in de meetopstelling, waarmee we de gemeten waarde kunnen corrigeren

De drie overige koppels (1, 4 en 8) (merk op dat de koppels 1 en 8 ook al moeite hadden om voorafgaand aan de perspexmetingen de meetmethode juist te beschrijven) geven antwoorden die te veel afwijken om als juist te beoordelen. Ze geven drie verschillende methoden maar geen van deze drie koppels lijkt in te zien dat het extra faseverschil moet worden gecorrigeerd met behulp van het gemeten faseverschil van de cuvet met lucht:

- Koppel 1: De  $c$  die je aan het einde invult moet bepaald worden met de glazen buis met lucht, verder hetzelfde.
- Koppel 4: Meet de lichtsnelheid door de cuvet met lucht erin. Vergelijk de waarde daarvan met de lichtsnelheid door alleen lucht. Hier kan je de fout uithalen, neem deze nu ook mee met het meten door de watercuvet.
- Koppel 8: Je doet hetzelfde als bij het berekenen van perspex en water, alleen doe je dat nu met een glazen medium. Als je dan nog berekent door hoeveel glas het licht moet, kun je dus ook hier de afwijkende fase van berekenen.

Toen de leerlingen vervolgens de methode gingen uitvoeren bleek dat koppel 4 het toch wel begrepen had, want zij voerden de methode op de juiste wijze uit. Koppels 1 en 8 bleven op afwijkende waarden uitkomen. Ook koppel 2 bleek plotseling een afwijkende waarde in te vullen. Uit de uitgebreide berekening die zij in hun verslag hadden opgenomen bleek het echter om een rekenfout te gaan waarover meer bij 'Verslagen'.

### **Verslagen**

Om na te gaan in hoeverre de leerlingen, na bepaling van de lichtsnelheid, kritisch zijn op hun eigen resultaten werd geïnventariseerd hoe de leerlingen in de verslagen

terugkijken op hun metingen. Vijf koppels vergeleken hun gevonden waarden expliciet met de literatuurwaarden maar gingen niet in op verklaringen van mogelijke afwijkingen. Koppel 2 dat tijdens de uitvoering na de glascorrectie op een verkeerde waarde uitkwam gaf in het verslag nog steeds dezelfde afwijkende waarde ( $1,8 \cdot 10^8$  m/s, terwijl de literatuurwaarde  $2,3 \cdot 10^8$  m/s is). Analyse van de door de leerlingen in het verslag uitgevoerde berekeningen maakte duidelijk dat zij per ongeluk gerekend hebben met de door Excel berekende waarde voor chi-kwadraat in plaats van met de asafsnede. Toch leken de leerlingen tevreden met de gevonden waarden want zij schreven:

- Uit deze grafieken hebben we de systematische fouten geëlimineerd en daaruit hebben we een redelijke benadering van de lichtsnelheid gekregen.

Zij vonden blijkbaar de waarden voldoende in de buurt liggen en merken niet op dat de waarde die zij voor water vonden lager was dan die van perspex terwijl dit juist andersom zou moeten zijn.

Van alle koppels gaat slechts één koppel (6) in op de mogelijke oorzaak van de afwijking ten opzichte van de literatuurwaarde:

- De waarde klopt niet helemaal precies, maar dit komt door meetonauwkeurigheden.

Maar ook hier was geen sprake van een reflectie op de metingen want zij lichtten de ‘meetonauwkeurigheden’ niet verder toe. Bovendien gaven deze leerlingen in hun verslag de literatuurwaarden niet. Twee andere koppels gaven ook alleen de zelf gevonden waarden zonder deze te vergelijken met de literatuur.

Het tiende koppel beschreef wel hoe de gegevens met de literatuur vergeleken zouden kunnen worden maar gaven de waarden zelf niet:

- Ondanks dat er in Binas geen waarde voor de lichtsnelheid van deze media te vinden was, konden we ons antwoord toch controleren, en wel met behulp van de brekingsindex. De formule om dit te berekenen was:  $n = c_{\text{vacuum}}/c_{\text{medium}}$ . Zowel de waarde van  $n$  als  $c_{\text{vacuum}}$  zijn in Binas te vinden, dus door  $c_{\text{medium}}$  in te vullen, kon je je antwoord controleren.

### 5.4.4 Subvraag A3.3

---

**Subvraag A3.3** *Hoe ervaren de leerlingen hierbij de functionaliteit van een reflectie op de eerder ontwikkelde meetmethode?*

---

Op scherm 14 werd expliciet teruggeblikt op de ontwikkelde meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht om deze kennis in te kunnen zetten bij het ontwikkelen van een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media.

Daarnaast werd in deze reflectie ook de gevolgde werkwijze van stapsgewijs ontwikkelen en evalueren benadrukt. Tot driemaal toe constateerden de leerlingen een probleem, ontwikkelden de meetmethode om het probleem op te lossen en keken vervolgens terug of deze oplossing het gewenste resultaat opleverde.

## Interviews

In het interview werd aan de leerlingen gevraagd of zij in deel 3 profijt hadden van de terugblik op scherm 14. De vraag werd per abuis slechts aan negen koppels gesteld. Een koppel merkte op dat ze het gevoel hadden dat deel 3 meer een vervolg dan een toepassing van deel 2 was. De overige acht koppels waren in meer of mindere mate positief. Vier gaven een bevestigend antwoord maar voegden daar verder geen argumenten aan toe.

Wat betreft de reflectie op de werkwijze benadrukten twee koppels het ontwikkelen en evalueren expliciet als een positief element:

- Als een prettige methode. Je gaat eerst wat bedenken en vervolgens ga je testen of dat eigenlijk wel klopt en als het niet klopt dan heb je dus niet de goede weg genomen.
- ME: In één van jullie belevingsenquêtes las ik dat je heel veel hindernissen tegenkomt en ik kon uit die woorden niet zo heel goed opmaken of dat negatief was.  
E<sup>4</sup>: Nee, dat was niet negatief, maar op de middelbare school, is het meestal meer rechttoe rechtaan. En hier was het anders. Dan had je een bepaalde berekening gedaan en dan klopte het niet met de lichtsnelheid want dan kwam je uit op 2 keer 10 tot de 8<sup>ste</sup> en dan wist je dat je verder moest zoeken. En iedere keer moest je dan nog dieper nadenken dan gewoon een rechte weg en dat was wat ik met hindernissen bedoelde.  
ME: En dat was iets wat anders was maar niet per se vervelend.  
L: Nee!  
E: Ik vond juist dat je wel goed werd geleid  
L: En het was wel uitdagend maar wel fijn dat je werd geleid.

Twee andere koppels gingen in op de vraag of de methode al dan niet toepasbaar is op verder onderzoek. Zo had het ene koppel het gevoel dat ze in deel 3 profijt hadden van deel 2:

- Ik denk dat we in deel 2 een soort systeem hebben ontwikkeld wat wij in deel 3 toepasten.

Het andere koppel heeft zijn twijfels over inzet bij ander onderzoek, want zij merken op dat ze het ontwikkelen en evalueren wel handig vonden maar vroegen zich ook af hoe je het zou kunnen evalueren als je een onderzoek doet waar je het eindantwoord niet weet:

- Ja, dat was wel handig. Maar de enige vraag die wel bij me opkwam is hoe moet je dat nou evalueren als je het antwoord niet weet. Dan weet je het gewoon niet zeker.

Wat betreft de terugblik op de ontwikkelde meetmethode vonden twee koppels het scherm overbodig:

- Koppel 10: Ik had niet het gevoel dat je er later iets mee moest doen. Want je hoefde het niet te leren. Het zou handig zijn als je het nog een keer wilt doen, maar we hoeven het niet nog een keer te doen.
- Koppel 8: Ik vond het niet zo nodig, want het meeste wist ik nog wel. Ik kan veel beter dingen doen dan dingen lezen. Dus als je dingen zo leest dan krijg ik het minder goed door dan wanneer ik er mee bezig ben.



De overige acht koppels gaven aan dat ze deze pagina wel nuttig vonden. Bijvoorbeeld:

- Het is niet zo dat je nou in één keer tot nieuwe inzichten komt, maar ik kan me voorstellen dat het voor sommige mensen wel makkelijk is
- Het is niet zozeer dat je hem hierdoor echt gaat begrijpen maar het is wel een afsluiting die je eigenlijk wel nodig hebt. Anders schiet je meteen door.  
En zo onthoud je het ook beter.

Eén van hen geeft aan dit scherm ook te hebben gewaardeerd omdat dit hen een bevestigend gevoel gaf dat ze begrepen waar ze mee bezig waren:

- Nou het geeft wel een gevoel van dit ken ik, dit snap ik.

### 5.4.5 Subvraag A3.4

In deel 3 werden de leerlingen, na formuleren van hun ideeën over het meetplan voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media, voor de keuze gesteld om direct met meten te starten of eerst nog aan de hand van enkele opdrachten de meetmethode te ontwikkelen. Ondanks de verwachting dat enkele leerlingen geheel zelfstandig in staat zouden zijn het experiment af te ronden, kozen alle leerlingen voor de tweede optie. De hulp die ze bij deze opdrachten ontvingen was minder uitgebreid dan de hulp die ze in het voorafgaande materiaal hadden ontvangen. De verwachting vooraf was dat deze beperktere begeleiding voor enkele leerlingen voor problemen zou kunnen zorgen. Subvraag A3.4 gaat na hoe de leerlingen de beperkte begeleiding beleefd hebben.

---

*Subvraag A3.4 Hoe ervaren de leerlingen de beperkte begeleiding: positief of negatief?*

---

#### Interview

In het interview werden de ervaringen van de leerlingen met de beperkte begeleiding van deel 3 geïnventariseerd. Deel 2 van het materiaal bevatte veel vragen met feedback die de leerlingen hielpen om de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht in kleine stappen te ontwikkelen. In deel 3 pasten de leerlingen, nu slechts door enkele vragen gestuurd, de in deel 2 ontwikkelde meetmethode aan om ook de lichtsnelheid in andere media te bepalen. In het interview werd aan de leerlingen gevraagd of er momenten (in het gehele experiment) waren waarop ze graag hulp zouden hebben gehad. Drie koppels (waaronder de koppels 9 en 10 die nauwelijks problemen ondervonden) gaven aan dat ze geen extra hulp nodig hadden. Twee van hen motiveerden dit met dat ze liever eerst zelf wilden proberen, het andere koppel gaf aan dat het niet echt nodig was omdat ze er zelf (met de feedback) wel uitkwamen. De zeven overige koppels zouden daarentegen wel graag meer hulp hebben gehad, vier van hen met name bij het begin van deel 3. Vijf van deze zes koppels specificeren

verder welke soort hulp ze gehad zouden willen hebben: twee koppels (3 en 6) hadden graag wat hints gekregen om zelf weer verder te kunnen, de andere drie (1, 5 en 8) hadden vooral behoefte aan bevestiging. Bijvoorbeeld:

- Omdat het een beetje vervelend is om iets te doen waarvan je niet weet of het goed is.
- We moesten een methode toepassen en die werd verder niet meer uitgelegd zodat we niet zeker wisten of onze methode klopte.

### **Belevingsenquête**

Omdat de leerlingen de belevingsenquête individueel hebben ingevuld worden de antwoorden per leerling en niet per koppel besproken.

Dat er een duidelijk waarneembaar verband is tussen de beperkte begeleiding en de mate waarin de leerlingen het materiaal als moeilijk ervaren, kwam uit de belevingsenquête sterk naar voren. Op de vraag 'Wat vond je moeilijk' wezen twaalf van de twintig leerlingen in de richting van deel 3. Tien van hen vonden vooral het bedenken van een formule waarmee je door metingen met de gegeven opstelling  $c_m$  kunt bepalen moeilijk. Twee andere leerlingen noemden ook het corrigeren van de invloed van de cuvet. Volgens drie van de twaalf leerlingen was deel 3 vooral moeilijker omdat de begeleiding daar beperkter was. Bijvoorbeeld:

- In het voorgaande kwam alles ook min of meer op je af, hier was het zo dat je meer zelf moest gaan bedenken en dat vond ik tamelijk moeilijk.

Een vierde leerling voegt hier nog aan toe dat ze bij deel 3 behoefte hadden aan meer bevestiging:

- Ik vond het laatste deel wel moeilijk. Je doet iets en je hebt geen idee of het goed is, heel frustrerend.

Niet alle leerlingen delen deze meningen overigens, want een andere leerling gaf aan deel 3 juist te hebben gewaardeerd:

- Het derde gedeelte vond ik iets moeilijker dan de twee gedeeltes ervoor. Dit kwam door het omzetten van de formule. Maar hierdoor vond ik het wel leuker.

Deze resultaten bevestigen de interviews: de beperkte begeleiding van deel 3 werd door de leerlingen opgemerkt en deel 3 wordt als moeilijker ervaren. Zowel de behoefte aan bevestiging als juist de waardering voor het feit dat het moeilijker is kwamen ook in de belevingsenquête naar voren.

### **5.4.6 Conclusie**

Nadat de leerlingen de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht ontwikkeld hadden ging ze aan de slag om deze aan te passen zodat ook de lichtsnelheid in andere media bepaald konden worden.

De derde onderzoeksvraag A3 ging na of de leerlingen hiertoe in staat waren en

brengt zo het functioneren van het derde cluster van de didactische structuur in kaart.

### Subvraag A3.1

De eerste subvraag ging na of de leerlingen inzagen dat het plaatsen van een medium tot een extra faseverschil leidde en hoe daaruit de lichtsnelheid in dat medium bepaald kon worden. Bij de start van deel 3 konden de leerlingen globaal beschrijven wat er met de lichtsnelheid en het faseverschil gebeurt wanneer er een medium tussen bron en detector wordt geplaatst. Twee koppels waren zelfs in staat een meetmethode te formuleren waarin alle relevante aspecten opgenomen waren. De anderen benoemden wel dat er sprake was van een extra faseverschil bij tussenplaatsing van een medium. Ze konden echter niet aangeven (of waren er onduidelijk over) hoe verwerkt moest worden dat het medium niet de gehele afstand tussen bron en detector opvult.

Ook leken ze niet te zien dat er sprake was van een constant extra faseverschil en ze hadden moeite met het uitwerken van het globale idee tot een concrete werkwijze. Alle leerlingen kozen voor het aan de hand van opdrachten uitwerken van de meetmethode. Bij het beantwoorden van deze opdrachten ondervonden ook veel leerlingen nog problemen. En slechts twee koppels waren in staat een relevante relatie af te leiden waarmee uiteindelijk de lichtsnelheid in het medium bepaald kon worden.

De leerlingen hadden moeite om het verschil te zien tussen het extra faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  (extra faseverschil wanneer er een medium wordt geplaatst ten opzichte van de situatie zonder medium) en het faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{lm}}$  dat de computer meet bij tussenplaatsen van een medium. Dit zou mogelijk verklaard kunnen worden doordat er in de feedback weinig aandacht was voor het toelichten van de afgeleide relaties en het verschil tussen  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$  en  $\Delta\varphi_{\text{lm}}$ .

### Subvraag A3.2

De volgende subvraag (A3.2) ging na of de leerlingen vervolgens in staat waren de lichtsnelheid in andere media te bepalen. Ondanks de weinig bemoedigende resultaten bij het ontwikkelen van de meetmethode bleken uiteindelijk toch de meeste koppels in staat een adequate beschrijving van de meetmethode te geven.

Analyse van de door de leerlingen uiteindelijk gevonden waarden voor de gemeten lichtsnelheid maakte wel duidelijk dat vier koppels er nog steeds moeite mee hadden de globaal omschreven meetmethode om te zetten naar een concrete werkwijze. Subvraag A3.1 heeft al laten zien dat een aantal leerlingen problemen had met het begrijpen van het verschil tussen  $\Delta\varphi_{\text{lm}}$  en  $\Delta\varphi_{\text{extra}}$ . Toen ze uiteindelijk de metingen gingen uitvoeren en verwerken werden deze problemen bevestigd toen bleek dat deze leerlingen de lichtsnelheid wilden berekenen met de relatie voor  $\Delta\varphi_{\text{lm}}$ . Ze bleven hangen in het gebruiken van de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht en pasten deze te beperkt aan de veranderde situatie aan. Na

enige externe hulp, waarbij ze gewezen werden op het gebruik van de relatie voor het extra faseverschil, slaagden toch de meeste koppels er in de lichtsnelheid in andere media te bepalen. De overige zes koppels waren wel in staat de lichtsnelheid in andere media zelfstandig te bepalen. Drie van hen pasten zelfs al de glascorrectie toe voordat hier op de site op gewezen werd. Twee van deze drie wisten ook al bij aanvang van deel 3 een correcte, maar andere, meetmethode te formuleren. Zij voelden zich echter blijkbaar niet zeker genoeg direct aan de metingen te beginnen, want ze kozen ervoor de sturende vragen te doorlopen en pasten uiteindelijk de in het lesmateriaal voorgestelde methode toe.

Uit de verslagen van de leerlingen werd duidelijk dat aan het vergelijken van de gevonden waarden met de literatuur en een hieraan gekoppelde foutenanalyse door alle koppels niet of nauwelijks aandacht besteed werd. De meesten beperkten zich tot het noemen van de gevonden waarden.

### **Subvraag A3.3**

Doel van subvraag A3.3 was na te gaan of de samenvatting van de meetmethode in lucht door de leerlingen als functioneel werd ervaren als voorbereiding op het aanpassen van de meetmethode voor verschillende media bij deel 3. De meeste leerlingen bleken dit een nuttige pagina te vinden. Ook over de werkwijze van stapsgewijs evalueren en ontwikkelen liet de meerderheid zich positief uit.

Of de afsluitende pagina ook bijdroeg aan het succesvol afronden van deel 3 van het experiment kan op grond van de verzamelde onderzoeksdata niet hard worden gemaakt.

### **Subvraag A3.4**

Ten slotte werd nagegaan hoe de leerlingen de beperktere begeleiding bij deel 3 ervoeren. Het was alle leerlingen opgevallen dat de begeleiding in deel 3 minder uitgebreid was dan in deel 2. Ongeveer de helft van de koppels beleefde de beperkte begeleiding als enigzins negatief en had behoefte aan hints, tussentijdse bevestiging dat ze op de goede weg waren of een paar extra tussenstapjes. Hier stond tegenover dat de andere helft van de leerlingen er geen problemen mee had en in sommige gevallen de beperkte begeleiding zelfs waardeerde omdat zij zich daardoor meer uitgedaagd voelden.

## **5.5 Resultaten A4: Experimenteel fysisicus**

### **5.5.1 Inleiding**

Het leerdoel van het experiment was niet alleen het ontwikkelen van een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht en andere media. Het doorlopen van

het experiment moest de leerlingen ook zicht geven op de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. De leerlingen werden erop gewezen dat de activiteiten die zij verrichtten bij het ontwikkelen van de meetmethode ook deel uitmaken van de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus.

De activiteiten waarbij deze parallel gelegd werd waren: theorie gebruiken waarin de te meten grootheid voorkomt, manipuleren van signalen (in dit geval moduleren), bedacht zijn op het optreden van systematische fouten, grafiek gebruiken voor het bepalen van de waarde van een grootheid en cyclisch ontwikkelen en evalueren.

Met de vierde onderzoeksvraag A4 werd nagaan of de leerlingen deze parallel tussen hun experiment en de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus zagen:

**Onderzoeksvraag A4.** *Zien de leerlingen de parallel tussen hun experiment en de praktijk van de experimenteel fysicus?*

Daarom werd tijdens de onderbrekingen en in het interview na afloop nagegaan welke elementen van het werk van een experimenteel fysicus de leerlingen zelf noemden en hoe zij de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus verwoordden. Met de antwoorden op de onderbrekingen kon in kaart gebracht worden hoe de leerlingen gedurende de uitvoering van het experiment aankeken tegen de parallel met de handelingspraktijk en met de antwoorden van het interview kon worden nagegaan hoe ze er na afronding op terugkeken (zie tabel 5-5).

**Tabel 5-5** Onderzoeksinstrumenten bij onderzoeksvraag A4

	Inhoudelijke Vragen	Onderbrekingen	Interview na afloop	Belevings-enquête	Leerling-verslagen
A4		X	X		

## 5.5.2 Resultaten

### Onderbrekingen

Bij twee onderbrekingen werden de leerlingen gevraagd wat ze tot dan toe geleerd hadden over het werk van een experimenteel fysicus. De eerste keer was tijdens de tweede onderbreking (na scherm 7) als ze net de eerste stap in het ontwikkelen van de meetmethode (inzet van de golftheorie) hebben gezet. De verwachting was dat de leerlingen hier de inzet van theorie zouden noemen. Ze hadden dit immers net zelf voor hun eigen onderzoek gedaan en de parallel tussen hun eigen werk en dat van de experimenteel fysicus was in een blauw kadertje op de site expliciet benoemd. Vier koppels noemden inderdaad dat een experimenteel fysicus theorie gebruikt om verbanden te bepalen of waarden van grootheden te meten:

- Die heeft natuurkundige grootheden en op basis daarvan gaat ie een experiment maken ofzoiets.

## De A-vraag: het functioneren van de didactische structuur

- Zoekt naar fundamentele theorie en dan gaat proberen daar experimenten op los te laten.

Vier andere koppels benoemden meer het proces als geheel waarin voortdurend sprake is van ontwikkelen en evalueren. Bijvoorbeeld:

- Dat hij allerlei manieren verzint om problemen, dit soort problemen waar hij dan tegenaan loopt, op te lossen. En wel te kijken of het allemaal nog wel klopt.
- Veel oplossingen moet verzinnen voor dingen...altijd klopt er wel net iets niet.

De twee overige koppels gaven aan de stukjes over experimentele fysica tot dan toe niet gelezen te hebben.

Na afronding van de derde stap (eliminieren van de systematische fout, scherm 14) werd voor de tweede maal aan de leerlingen gevraagd wat ze tot dan toe geleerd hadden over het werk van een experimenteel fysicus. Sinds de vorige onderbreking hadden de leerlingen gewerkt aan het manipuleren van het signaal en het elimineren van de systematische fout. Het manipuleren werd door één koppel expliciet genoemd:

- Hij kan dus dingen manipuleren.

Twee andere koppels beschrijven het wat globaler als het geschikt maken van de opstelling:

- De meetopstelling zo regelen dat een goede meting kan worden gedaan.
- Zeg maar iets dat schijnbaar onmeetbaar is dat je dat toch kunt meten.

Daarnaast noemden bijna alle koppels (negen) het elimineren van fouten. In de antwoorden van zes van hen is ook het herhaaldelijk zoeken naar fouten/cyclus van ontwikkelen en evalueren terug te vinden. Bijvoorbeeld:

- Iedere fout proberen te vinden...dus theorie, fout eruit, weer theorie.
- Kritisch zijn...dat je er niet vanuit moet gaan dat het in één keer goed gaat.

## Interviews

Terugkijkend op het geheel kregen de leerlingen tijdens het interview voor de laatste maal de vraag wat ze geleerd hadden over het werk van een experimenteel fysicus. Drie koppels begonnen met op te merken dat ze er niet zo veel van geleerd hadden, maar gaven vervolgens wel globale beschrijvingen van de handelingspraktijk. Ze benoemen het herhaaldelijk ontwikkelen en evalueren (eerste en derde citaat), het manipuleren (tweede citaat) en eliminieren van systematische fout (tweede en derde citaat):

- De methode hoe ze te werk gaan, de meetopstelling bepalen door eerst gewoon te kijken wat zullen we meten, meer denken en steeds meer fouten eruit halen.
- We hebben geleerd welke stappen hij zet, allereerst was het die opstelling, dus met het manipuleren van de golflengte. ik denk dat ze in het algemeen gaan manipuleren van sommige gegevens, om een nauwkeurige meting te krijgen. Ja en systematische fout eruit halen.
- De systematische fout eruit halen en dat ie een experiment gaat verzinnen en alles gaat nakijken en de onderzoeksmethode evalueren.

De andere koppels, op één na, noemen het herhaaldelijk ontwikkelen en evalueren  
Bijvoorbeeld:

## Hoofdstuk 5

- Bedenken van een goede onderzoeksmethode...controleren, fouten eruit halen.
- Heel nauwkeurig te werk gaat... En dingen moet kunnen zien waar fouten in kunnen zitten.

Twee koppels noemden ook nog het gebruik van diagrammen voor het elimineren van de systematische fout:

- Dat je een systematische fout kunt compenseren door te kijken wat het eigenlijk zou moeten zijn en dat vergelijk je met wat je hebt en dan kijk je weer hoe je dat kunt veranderen. Dat was hier dus dat je weet dat de grafiek door de oorsprong moet gaan en dat ging ie niet, dus dan moet je hem verschuiven.
- Gebruiken van zo'n functie en dan kijken of het door het nulpunt ging.

### 5.5.3 Conclusie

De meeste leerlingen verwoordden min of meer dat een experimenteel fysicus theorie gebruikt waarin de te meten grootte voorkomt. Ook het elimineren van systematische fouten lijkt goed over te zijn gekomen en het herhaaldelijk doorlopen van de ontwikkel-evaluatie-cyclus is in bijna alle antwoorden terug te vinden.

Het manipuleren van signalen en het gebruik van diagrammen worden slechts beperkt genoemd.

Terugkijkend op het gehele leerproces moet geconcludeerd worden dat op alle vragen over de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus de respons van de leerlingen beperkt was. Zij leken deze onderdelen voor kennisgeving aan te nemen en als een facultatief onderdeel te beschouwen.

De vraag is of er wel meer van de leerlingen verwacht zou kunnen worden. Ze zijn waarschijnlijk nog nooit eerder in contact gebracht met de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus en konden daardoor waarschijnlijk lastig buiten de tekst in de kaders treden. Bovendien waren geen opdrachten aan deze elementen verbonden. Hier komt bij dat de leerlingen in de reguliere lespraktijk niet gewend zijn dat er parallellen gelegd worden tussen hun eigen werk en dat van een beroepspraktijk. Toch lijkt het vooraf gestelde doel om de leerlingen, voor zover mogelijk met dit materiaal, zicht te geven op de handelingspraktijk wel behaald.

## 5.6 Conclusies A-vraag

In het onderzoek werd geprobeerd om hoofdvraag A aan de hand van vier onderzoeksvragen te beantwoorden. Dit moest duidelijk maken of de didactische structuur voldeed, zodanig dat de leerlingen in staat waren het experiment inhoudelijk gemotiveerd, zelfstandig en met voldoende zicht op waar ze mee bezig waren uit te voeren.

### Onderzoeksvraag A1

*Onderzoeksvraag A1: Worden de leerlingen globaal gemotiveerd om de lichtsnelheid te*

*bepalen en krijgen ze zicht op hoe ze dat zullen gaan doen?*

De gekozen opbouw waarbij de leerlingen eerst nieuwsgierig werden gemaakt naar de methode doordat zij zelf de problemen van het rechtstreeks meten ontdekten lijkt succesvol. De leerlingen raakten benieuwd naar de manier waarop de lichtsnelheid dan wel bepaald zou kunnen worden en hun nieuwsgierigheid werd versterkt door vervolgens de mogelijke oplossingsrichting te laten verkennen.

Op grond van de onderzoeksdata kon niet worden aangetoond dat de leerlingen zelf inzagen dat de golftheorie een voor de hand liggende oplossingsrichting was. Wel werd duidelijk dat ze geen redenen zagen deze oplossingsrichting te verwerpen en ze hadden er daarom ook geen problemen mee om de aangereikte oplossing voor kennisgeving aan te nemen.

Ook lijkt het materiaal erin geslaagd de leerlingen een globaal idee te geven van wat hen te wachten stond, want ze konden de volgende inhoudelijke stap verwoorden. Op grond van de onderzoeksdata kan dus worden geconcludeerd dat het globale motief bij de leerlingen is aangebracht.

## Onderzoeksvraag A2

*Onderzoeksvraag A2. Zien de leerlingen in hoe de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht er met de beschikbare meetopstelling uit moet zien en kunnen ze deze toepassen?*

Vervolgens werd nagegaan of het tweede cluster van de didactische structuur functioneerde. In het tweede cluster werkten de leerlingen, gestuurd door drie deelvragen, aan het achtereenvolgens ontwikkelen en evalueren van de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht. Het probleem dat binnen een deelvraag werd geconstateerd diende als lokaal motief om de meetmethode telkens te verbeteren. Het onderzoek maakte duidelijk dat de leerlingen bij het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht steeds het ontstane probleem konden benoemen en toelichten. Ook bleken ze op ieder moment redelijk tot goed in staat te verwoorden wat ze waarom gedaan hadden en wat er komen ging. Ze hadden daardoor steeds zicht op waar ze mee bezig waren. Het zelf constateren van de problemen en betrokken zijn bij het oplossen ervan leek te bewerkstelligen dat de leerlingen het leerproces als logisch ervoeren en zelfstandig konden doorlopen.

De lokale motieven (achtereenvolgens de behoefte oproepen aan een manier om golftheorie in te zetten, een manier om de golflengte op te kunnen rekken en een onjuiste waarde voor  $c$  te kunnen verklaren) lijken dus in voldoende mate opgeroepen. Anders dan bij de producten uit de eerste cyclus was er in dit deel van het materiaal geen sprake meer van inhoudelijke struikelblokken. Er werden wel enkele moeilijkheden met de inhoud geconstateerd, maar deze belemmerden de zelfstandige voortgang niet. De moeilijkheden hadden betrekking op het moduleren en de systematische fout.



Niet alle leerlingen leken de achtergronden van het moduleren en de oorzaak van de systematische fout te doorgronden. Ze konden het principe van het moduleren niet goed onder woorden brengen en vonden het lastig de oorzaak van de systematische fout in te zien. Ondanks de moeilijkheden hadden de leerlingen echter bij product 3 niet langer, zoals dat bij product 1 wel het geval was, moeite om in te zien waarom het nodig was te moduleren. Ze konden nu benoemen welk probleem door het moduleren werd opgelost. Ook konden ze nu wel benoemen waarom de lichtsnelheid niet berekend kon worden uit het faseverschil bij één afstand terwijl ze dat bij product 2 niet begrepen.

Er kon dus vastgesteld worden dat, ondanks het mogelijk niet geheel doorgronden van alle aspecten van de meetmethode, er geen ernstige belemmeringen in de voortgang van het leerproces waren en de leerlingen in staat waren de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht succesvol zelfstandig te ontwikkelen.

### Onderzoeksvraag A3

*Onderzoeksvraag A3. Zien de leerlingen in hoe de ontwikkelde meetmethode moet worden aangepast voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht en kunnen ze deze toepassen?*

Alle leerlingen zagen in dat het faseverschil groter wordt bij tussenplaatsen van een medium, maar bij aanvang van deel 3 hadden de meesten moeite dit te vertalen naar een concrete meetmethode. De verwachting vooraf was dat enkele leerlingen in staat zouden zijn de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media geheel zelfstandig aan te passen. Dat was misschien ook wel zo, maar toch bleken alle leerlingen voor extra begeleidende opdrachten bij het aanpassen van de methode te kiezen. De leerlingen vonden het bij de eerste opdrachten van deel 3 moeilijk in te zien wat precies het extra faseverschil inhield en hoe dit gebruikt kon worden om de lichtsnelheid in het medium te bepalen. Zes koppels slaagden er na het doorlopen van de opdrachten wel in om de lichtsnelheid in de andere media te bepalen. De vier andere koppels hielden tot het einde toe problemen en waren pas na extra uitleg over het extra faseverschil in staat de lichtsnelheid in andere media te meten.

Om deel 3 extra uitdagend te maken voor de leerlingen was er vooraf voor gekozen om ook bij de extra opdrachten de begeleiding beperkter te laten zijn dan in deel 2 het geval was. De beperkte begeleiding bij deel 3 werd door alle leerlingen opgemerkt, maar hun meningen hierover verschilden. Enkele leerlingen waardeerden juist de beperkte begeleiding omdat ze zich hierdoor meer uitgedaagd voelden. Een kleine meerderheid zou echter meer begeleiding hebben gewild. Sommigen hadden behoefte aan hints en anderen gaven aan de bevestiging te missen waardoor ze niet wisten of ze op de juiste weg waren.

Terugkijkend naar de geconstateerde problemen leken deze vooral veroorzaakt door de formulering van de feedback bij de opdracht waarin de formule voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media wordt afgeleid. In de feedback ontbreekt een toelichting op het verschil tussen het extra faseverschil en het faseverschil dat de computer meet na tussenplaatsen van een medium. In de huidige formuleringen werd alleen de relatie gegeven die de leerlingen hadden moeten afleiden zonder verder toe te lichten wat deze relatie eigenlijk zegt en hoe die ingezet kan worden. In de feedback op de opdrachten waarin de leerlingen de relaties moeten geven en afleiden wordt geen expliciete verbinding tussen de relaties gelegd waardoor de leerlingen waarschijnlijk niet inzien wat deze met elkaar te maken hebben en welke relatie uiteindelijk gebruikt moet worden. Het oplossen van de onduidelijkheden zou beperkt moeten blijven tot alleen het aanpassen van de formulering in de feedback. De behoefte van de leerlingen aan meer bevestiging is wel begrijpelijk, maar niet wenselijk. Het staat namelijk haaks op het vooraf gekozen uitgangspunt dat het succesvol doorlopen van deel 3 niet per se voor alle leerlingen weggelegd hoeft te zijn.

#### Onderzoeksvraag A4

*Onderzoeksvraag A4. Zien de leerlingen de parallel tussen hun experiment en de praktijk van de experimenteel fysisus?*

Van de handelingspraktijk leken vooral het herhaaldelijk alert zijn op fouten en het vinden van manieren om deze te elimineren goed te zijn overgekomen. De leerlingen leken zich te realiseren dat een experimenteel fysisus blijkbaar cycli van ontwikkelen en evalueren doorloopt.

De gekozen opzet van het spiegelen van het eigen werk aan dat van een experimenteel fysisus had voor de leerlingen een facultatief karakter. De indruk die de leerlingen door dit experiment kregen van die handelingspraktijk bleef daarom beperkt tot het kunnen benoemen en herkennen van enkele karakteristieke handelingen.

Ten slotte lijkt het een gemiste kans dat er geen aandacht is besteed aan de nauwkeurigheid van metingen en de invloed van toevallige fouten. Het gebruik van de richtingscoëfficiënt in plaats van de waarde van één meting biedt immers aanknopingspunten om aandacht te geven aan dit fundamentele aspect uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysisus. In aansluiting hierop kan dan ook worden toegelicht dat de gevonden waarden voor de lichtsnelheid een nauwkeurigheidsmarge nodig hebben om ze met literatuurwaarden te kunnen vergelijken.

#### Conclusie A-vraag: het functioneren van het didactisch ontwerp

Het belangrijkste uitgangspunt bij het ontwerp van de didactische structuur was

het streven de in de eerste cyclus met product 1 en 2 geconstateerde problemen op te lossen. Het onderzoek aan product 3 moest duidelijk maken of de didactische structuur voldeed, zodanig dat de leerlingen in staat waren het experiment inhoudelijk gemotiveerd en zelfstandig te doorlopen (Hoofdvraag A).

Product 3 leek de in product 1 en 2 geconstateerde problemen grotendeels te hebben opgelost. De leerlingen verdwaalden niet meer in de site, zoals dat bij product 1 wel het geval was. Er waren nog wel enkele inhoudelijke oneffenheden (moduleren en de systematische fout), maar deze resulteerden niet in het werkelijk vastlopen in het materiaal. De in de didactische structuur neergezette lijn kwam voor de leerlingen als logisch over en de leerlingen wisten waar ze mee bezig waren en waarom.

Er moet ten aanzien van de feedback wel een kritische kanttekening geplaatst worden. Met name bij deel 3 werden de beperkingen van het feedbacksysteem duidelijk. De feedback speelde daar onvoldoende in op de denkfouten van de leerlingen en kon hen daardoor onvoldoende helpen om weer het juiste pad te vinden. Met beperkte aanpassing van de feedback zou dit specifieke probleem mogelijk opgelost kunnen worden, maar het gevaar dat een leerling niet met de feedback uit de voeten kan zal altijd blijven bestaan. Een andere beperking werd duidelijk toen twee koppels in deel 3 bij hun beschrijving van de meetmethode weliswaar een juiste meetmethode formuleerden maar zich toch niet zeker genoeg voelden om deze ook direct uit te gaan voeren. In de huidige uitvoering van het materiaal krijgen de leerlingen geen feedback op hun meetmethode, maar worden ze voor de keuze gesteld om direct te gaan meten of om aan de hand van enkele opdrachten eerst nog de meetmethode verder te ontwikkelen. Het gebrek aan zelfvertrouwen van de leerlingen wat ervoor zorgt dat ze niet direct met meten durven te starten zou mogelijk opgelost kunnen worden door wel feedback op de door de leerlingen geformuleerde meetmethoden te geven. Het zal dan echter lastig zijn om de feedback zodanig te formuleren dat in de feedback de meetmethode niet al weggegeven wordt en dat met alle mogelijke gedachtegangen van de leerlingen rekening wordt gehouden. In ieder geval zou het mogelijk moeten zijn de leerlingen te stimuleren om met de door henzelf bedachte meetmethode aan de slag te gaan. Wanneer leerlingen kiezen voor het direct starten met meten, zouden ze erop gewezen moeten worden dat ze gedurende de uitvoering bij een eventueel vastlopen alsnog aan de hand van enkele opdrachten de meetmethode meer begeleid kunnen ontwikkelen.

# De B-vraag:

## het functioneren van de vormelementen

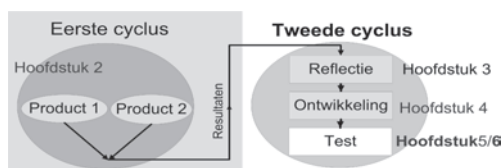
# 6

6.1	Inleiding	172
6.2	Resultaten B1: Functioneren van de vormelementen	173
6.2.1	Automatisch vragensysteem	173
6.2.2	'Waar ben ik'-window	175
6.2.3	Opbouw van de schermen	176
6.2.4	Animaties	177
6.2.5	Facultatieve pagina's	180
6.2.6	Webcams	181
6.2.7	Conclusies B1	181
6.3	Resultaten B2: Afstandskarakter	183
6.3.1	Gevoel echt met de opstelling bezig te zijn?	184
6.3.2	Liever op afstand of aan tafel?	185
6.3.3	Conclusie B2	187
6.4	Conclusie B-vraag	188

## 6.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is uitgewerkt hoe de resultaten van de eerste cyclus tot aanbevelingen voor de tweede cyclus hebben geleid.

Het ontwerp uit de tweede cyclus, uitgewerkt in product 3, werd gekenmerkt door twee aandachtsgebieden: inhoudelijke uitlijning en ondersteunende vormelementen.



**Figuur 6-1** Hoofdstuk 6 beschrijft het onderzoek aan de vormelementen in de testfase van de tweede cyclus van het ontwikkelingsonderzoek.

Het functioneren van de inhoudelijke uitlijning is in het voorgaande hoofdstuk aan de orde geweest. Het onderwerp van onderzoek in hoofdstuk 6 is de website waar de vormelementen deel van uitmaken (figuur 6-1). Deze vormelementen moesten samen met de inhoudelijke uitlijning er voor zorgen dat de leerlingen het materiaal zelfstandig, zonder aanwezigheid van de docent, kunnen doorlopen. De vormelementen moesten de inhoudelijke uitlijning ondersteunen bij het doorzien van de structuur van het materiaal zodat de leerlingen er niet in verdwalen (vormelementen: 'Waar ben ik'-window, opbouw van de schermen, facultatieve pagina's). Ook zouden ze moeten voorkomen dat leerlingen lange teksten van het scherm moeten lezen en er zou sprake moeten zijn van interactie, controle en feedback (vormelementen: animaties, automatisch vragen- en feedbacksysteem, webcams).

Met de tweede hoofdvraag van het onderzoek (B-vraag) werd onderzocht in hoeverre de website met de daarin opgenomen vormelementen gefunctioneerd heeft:

**Hoofdvraag B:** Functioneert de website met de opgenomen vormelementen in het faciliteren van het zelfstandig en op afstand uitvoeren van het experiment?

Het functioneren werd nagegaan aan de hand van twee onderzoeksvragen, B1 en B2, die gericht waren op de specifieke bijzondere elementen respectievelijk de beleving van de site als geheel.

De antwoorden op het interview na afloop zijn ingezet als belangrijkste instrument voor de beantwoording van de B-vraag. In de interviews werden de leerlingen gevraagd naar het functioneren van de elementen en hoe ze het gebruik ervan beleefd hadden. De beleving van de leerlingen werd ook met de belevingsenquête getoetst en daarom werd ook dit onderzoeksinstrument ingezet. Wanneer het interview nog niet voldoende zicht gaf op het functioneren konden ook de observaties tijdens de uitvoering worden ingezet om een beeld te vormen van hoe de leerlingen omgingen met de vormelementen.

## 6.2 Resultaten B1: Functioneren van de vormelementen

Eerst werd het functioneren van de bijzondere elementen nagegaan. In hoofdstuk 4 werden de functies van en de verwachtingen bij de vormelementen uitgewerkt. Om de eerste onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden werd per element nagegaan of het element aan deze functie en bijbehorende verwachting voldeed:

**Onderzoeksvraag B1:** *Functioneren de vormelementen naar verwachting?*

Voor de beantwoording van de onderzoeksvraag wordt per vormelement kort de functie herhaald en aan de hand van de onderzoeksdata duidelijk gemaakt of het element naar behoren functioneerde. Het functioneren van de vormelementen werd in kaart gebracht aan de hand van de interviews waarin de leerlingen moesten beargumenteren waarom ze de verschillende elementen functioneel vonden. Wanneer dit te weinig informatie opleverde werd ook de belevingsenquête geraadpleegd. Om zicht te krijgen op de manier waarop de leerlingen omgingen met de animaties, tegen welke problemen ze aanliepen en of er sprake was van kennisontwikkeling als gevolg van het werken met de animaties werd bij het nagaan van het functioneren ook teruggevallen op de observaties (zie tabel 6.1).

**Tabel 6-1** Inzet van de onderzoeksinstrumenten voor de beantwoording van de B2-vraag

	Interview na afloop	Belevings-enquête	Observaties
B1.1 Vragensysteem	X	X	
B1.2 Waar ben ik-window	X		
B1.3 Schermopbouw	X		
B1.4 Animaties	X		X
B1.5 Facultatieve pagina's	X		

### 6.2.1 Automatisch vragensysteem

De functie van het automatisch vragensysteem was de leerlingen te activeren, te sturen en te begeleiden in het ontwikkelen van de meetmethode en het begrijpen van de theorie. Het vragensysteem genereerde automatische feedback en controleerde het leerproces zodat de leerlingen, ondanks het ontbreken van een docent, zelfstandig konden werken aan het ontwikkelen van de meetmethode.

#### Interview

In het interview na afloop werd aan de leerlingen gevraagd of ze het bestuderen van de stof door middel van vragen als prettig hadden ervaren en of ze het gedwongen moeten beantwoorden van de vragen niet hinderlijk vonden. Acht koppels gaven

## Hoofdstuk 6

aan dat ze het bestuderen van de stof door middel van vragen prettig vonden. De antwoorden van de koppels bevatten verschillende (combinaties van) argumenten:

- Door de vragen werden ze tussentijds bevestigd dat ze op de goede weg zaten (vier koppels). Bijvoorbeeld:
  - Dat je moest doorgaan door vragen te beantwoorden vond ik op zich wel handig. Dat zorgt ervoor dat je het begrijpt voordat je verder gaat.
- Door de vragen waren ze actief bezig leerden hierdoor meer (drie koppels). Bijvoorbeeld:
  - Het blijft beter hangen als je er zelf even over nadenkt.
- De vragen gaven richting aan het begrijpen van de stof (één koppel):
  - Ja, het waren ook altijd vrij gerichte vragen en ze leiden je tot iets.
- Het vragensysteem splitste het materiaal in hanteerbare stukken op (één koppel):
  - Dat je niet een lap stof in één keer moet lezen.
- Het vragensysteem voorkwam vastlopen (twee koppels):
  - M: Ik vond het wel handig. Als je het even niet weet en je geeft het verkeerde antwoord dan zie je wel hoe het verder moet.  
C: Ja, dat is wel waar, dat als je een fout antwoord geeft dat je dan nog een keer goed na moet denken in plaats van dat je in één keer doorgaat en dat je dan weer heel ergens anders uitkomt.
  - Als je het fout had kwam er altijd het goede antwoord.

De overige twee koppels waren wat kritischer over het vragensysteem. Dit kwam bij beide koppels voort uit de beleving dat in het eerste deel wel erg kleine stappen gezet werden, waardoor relatief veel vragen beantwoord moesten worden:

- Aan het begin waren het wel hele kleine stapjes.
- T: Ja, het is waarschijnlijk maar een voorbeeld, maar ik vond de vragen soms enigszins aan de makkelijke kant.  
ME: En daarom voelde dat als tijd verspillen?  
T: Nou ja, als iets waar je in ieder geval sneller doorheen kon.  
B: Ik vond dat juist wel nuttig.  
T: Nou, laat ik het zo zeggen: aan het begin vond ik het allemaal wat makkelijk, maar later niet meer en toen werd het wel handiger.

Toen vervolgens aan de leerlingen gevraagd werd of de feedback hielp om een vraag te begrijpen, waren alle koppels positief. De argumenten die ze gaven kwamen overeen met die op de vorige vraag: de uitleg was goed en voorkwam vastlopen en de bevestiging op de juiste weg te zijn was prettig. Bijvoorbeeld:

- Als je een beetje onzeker was over je antwoord, dan is het moeilijk om bij de volgende vraag te kijken of je het wel goed weet. En het was leuk om gewoon eens te lezen dat je het bij het goede eind had. Dat er alleen links en rechts een klein aanvullinkje was misschien. Was zeker leuk om te zien dat je eigen ideeën wel klopten.

De open vragen vervulden een bijzondere functie in het vragensysteem, omdat ze

vrijheid boden in het zelf formuleren van antwoorden. Deze vrijheid zou echter alleen functioneel zijn wanneer de leerlingen ook werkelijk hun eigen antwoord zouden vergelijken met het antwoord in de feedback. Daarom werd in het interview ook aan de leerlingen gevraagd of ze bij deze vragen ook werkelijk hun antwoord controleerden. Vrijwel alle koppels (negens) gaven aan dat ze dit steeds gedaan hadden. Twee koppels merkten zelfs op dat ze het een goede manier vonden omdat ze geen betere manier zouden kunnen verzinnen om dit op een automatische manier bevredigend te kunnen doen:

- M1: Dat vind ik beter dan wanneer de computer het zou controleren.
- M2: Want die rekent dan meteen fout als er een spelfout inzit. Zeg ik 'nee' is het fout, het moet zijn 'nee punt'.
- Volgens mij is dat wel de enige goede manier want, anders ben je gebonden aan bepaalde formuleringen die je moet gebruiken. Dat werkt niet goed.

Tijdens vier interviews kwam ter sprake of er ook gegokt was. Alle vier koppels gaven aan dat ze dit niet gedaan hadden.

### **Belevingsenquête**

Ook de belevingsenquête leverde aanwijzingen ten aanzien van het goed functioneren van het vragensysteem. Zo noemden bijvoorbeeld twee leerlingen (van verschillende koppels) uit zichzelf het goed functioneren van het vragensysteem in hun antwoord op de vraag 'Wat vond je moeilijk':

- Over het algemeen vond ik het niet heel moeilijk. Meestal hoefde je niet echt heel diep na te denken over hoe iets werkte, omdat je zo in kleine stappen werkte en het programma je in alles begeleidde.
- Het zelf bedenken van meetmethodes, en soms het ombouwen van de formules. Ik moest hierbij goed nadenken, maar er was genoeg feedback zodat ik nooit echt vast kwam te zitten.

### **6.2.2 'Waar ben ik'-window**

De functie van het 'Waar ben ik'-window is tweeledig. Enerzijds fungeert het als een status window dat moet zorgen dat de leerlingen op ieder moment kunnen zien waar ze zich op de site bevinden, wat ze reeds afgerond hebben en wat er nog gaat komen. Daarnaast visualiseert het de inhoudelijke lijn van het materiaal en moet zo bijdragen aan het zicht geven op het totale proces. Binnen deze tweede functie biedt het ook de mogelijkheid om vooruit en terug te bladeren in het materiaal.

### **Interview**

Toen de leerlingen in het interview naar het uiterlijk van de site in het algemeen werden gevraagd brachten vier koppels uit zichzelf het 'waar ben ik'-window naar voren als voor hen functioneel element. Toen vervolgens expliciet naar het 'Waar ben ik window'-window werd gevraagd, waren alle koppels hierover positief. De functies die de leerlingen hierbij benoemden verschilden. Zeven koppels noemden het terugbladeren. Twee koppels waardeerden vooral de functie als status-window dat



zicht gaf op waar ze zich in het lesmateriaal bevonden:

- Handig dat je kon zien waar je was.
- Nee, niet om terug te bladeren. Gewoon om te kijken wat er nog ging komen.

Toen daarna werd doorgevraagd naar de status-functie antwoordden zes koppels dat ze deze functie niet gebruikt hadden. Vier van hen gaven aan dat dit niet nodig was omdat ze steeds wel wisten waar ze waren. Bijvoorbeeld:

- Nee, dat was de hele tijd wel duidelijk.
- Nou ja, misschien onbewust. Je weet wel ongeveer waar je zit. Vooral dus gewoon om informatie terug te halen.

Voor deze vier koppels was de structuur van het materiaal op zichzelf blijkbaar al duidelijk genoeg en had het 'Waar-ben-ik'-window hierbij geen ondersteunende functie. Mogelijk heeft het steeds in beeld zijn van het window hier echter onbewust aan bijgedragen. Vervolgens werd nagegaan of de mogelijkheid om met het 'Waar ben ik'-window vooruit te bladeren voor de leerlingen functioneel was.

Zeven koppels gaven aan dat ze niet vooruit gebladerd hebben. Twee van hen legden uit dat ze hier het nut niet van inzagen. Een ander koppel had het niet nodig, maar dacht dat het wel functioneel zou kunnen zijn:

- Als je echt vastloopt krijg je waarschijnlijk wel de behoefte om te kijken wat er allemaal nog komt. Maar wij liepen niet echt vast zo erg dat we dat wilden.

Eén koppel merkt ten slotte nog op dat ze het wel handig gevonden zouden hebben wanneer alle formules op een scherm zouden zijn samengevat:

- E: Maar dan vond ik het juist weer wat minder handig dat de formules niet, die je dan terug moest zoeken echt...  
ME: Je zou liever een formuleblaadje erbij willen hebben?  
D: Ja, of zelf opschrijven, maar dat kan minder op de computer.

### 6.2.3 Opbouw van de schermen

Bij het ontwerpen van de website is geprobeerd een opmaak te creëren die voor de leerlingen prettig aandoet, laat focussen op dat wat belangrijk is en ervoor zorgt dat de gewenste informatie snel (terug) te vinden is. Daarnaast waren de schermen zo opgezet dat op ieder scherm werd teruggegrepen naar het vorige scherm en vooruit gekeken naar wat op het volgende scherm ging komen. Bovendien waren er op een aantal cruciale momenten in het materiaal samenvattende en inleidende pagina's opgenomen. Doel van deze opzet was ervoor te zorgen dat de leerlingen steeds wisten waar ze mee bezig waren en wat hen nog te wachten stond.

#### Interview

Toen de leerlingen in het interview naar het uiterlijk van de site werden gevraagd, waren

alle koppels hierover positief. Op de vraag ‘Wat vond je van de site’ noemden acht koppels expliciet dat ze de site mooi, duidelijk of overzichtelijk vonden. Bijvoorbeeld:

- Duidelijk. Niet te saai en de koppen hadden leuke kleurtjes en leuke vorm.

Drie koppels gaven aan te waarderen dat de lay-out rustig was en geen gebruik maakte van felle kleuren of onrustig bewegende delen:

- Niet zo heel spannend. Maar het had ook niet zoveel nodig, want anders zou het alleen maar afleiden. Ik vond het wel mooi gemaakt.

Vervolgens werd de opbouw van de schermen besproken. Alle koppels waren positief toen ze, aan de hand van de voorbeeldpagina, gevraagd werden wat ze van de opbouw van de pagina's vonden. De herhaling op de schermen werd niet als storend ervaren. De waardering voor de opbouw werd met verschillende redenen onderbouwd:

- De opbouw hielp om het beter te begrijpen (zeven koppels). Bijvoorbeeld:
  - Een inleidinkje kan nooit kwaad. Als je een nieuwe berekening krijgt, dan is het toch altijd handig te recapitulieren wat je daarvoor hebt gedaan.
  - S1: Het is wel een logische opbouw. Je moet eventjes erin komen. Het maakt het compleet. S2: Ja, onbewust maakt het dat je beter snapt waar het over gaat.
  - D: De terugblik was alleen een soort samenvatting. E: Ja, en daarna kon je het ergens plaatsen.
- Omdat ze hierdoor niet terug hoefden te bladeren (drie koppels). Bijvoorbeeld:
  - Ik vond het wel fijn als er formules in stonden die je moest gaan gebruiken, dan hoefde je niet meer terug te bladeren.

## 6.2.4 Animaties

In het materiaal werden vijf animaties ingezet. De functie van de animaties was een uitleg te geven waar met een statische afbeelding heel veel tekst nodig zou zijn of waar, in de conventionele situatie, de docent zou moeten inspringen voor extra toelichting.

### Interview

In het interview werd eerst nagegaan hoe de animaties door de leerlingen beleefd waren. Alle leerlingen reageerden positief. Bijvoorbeeld:

- Erg leuk...die maakten het echt duidelijk.

Vijf van hen noemden hierbij dat zij de visualisatie waardeerden boven geschreven tekst of statische plaatjes. Bijvoorbeeld:

- Soms is het wel lastig om voor te stellen hoe iets nou zit en met zo'n animatie wordt het duidelijker...dat je het uit de tekst niet direct haalt en het bij de animaties in één oogopslag ziet.

Twee koppels waren gematigd positief. Ze gaven aan dat het wel handig zou kunnen zijn, maar dat de meeste animaties niet veel toevoegden. Over welke animaties ze dit

opmerken komt hieronder bij de bespreking van de losse animaties aan de orde. Vervolgens werd van de afzonderlijke animaties nagegaan of zij aan hun specifieke functie (samengevat in tabel 6-2) voldeden.

**Tabel 6-2** Functies van de animaties

	Waar (in deel 2: c in lucht)	Functie	
1	Golfkarakter gebruiken - meetmethode ontwikkelen	Voorkennis oproepen:	ten aanzien van lopende golven, fase en faseverschil
2	Golfkarakter gebruiken - meetmethode evalueren	Voorkennis oproepen:	ten aanzien van gereduceerde fase en gereduceerd faseverschil
3	Lichtsignaal moduleren - meetopstelling	Kennisontwikkeling:	Inzien dat door moduleren de golflengte wordt opgerekt en de snelheid gelijk blijft
4	Lichtsignaal moduleren - meetmethode ontwikkelen	Kennisontwikkeling:	Ervaren dat de golflengte van het gemoduleerde signaal groter is dan de afstand tussen bron en detector
5	Syst. fout elimineren - meetopstelling	Kennisontwikkeling:	Inzicht geven in de oorsprong van de systematische fout en de gevolgen hiervan voor de meetdata

Over de specifieke functies van de animaties werden slechts sporadisch opmerkingen gemaakt. De opmerkingen vielen in twee categorieën uiteen.

- Opmerkingen over de eerste twee animaties (gericht op het oproepen van voorkennis).

De leerlingen gaven aan dat deze animaties voor hen niet zoveel toevoegden omdat de stof bij hen al bekend was (vier koppels). Bijvoorbeeld:

- L: Ja, die eerste van het faseverschil. Op een gegeven moment was er eentje daar moest je zeggen wat het faseverschil was. En dat was op zich ook wel duidelijk zonder die animatie. E: Maar het was misschien ook omdat we dat nog niet zo lang geleden hadden gehad. Als je daar een half jaar geleden iets mee gedaan hebt, denk je misschien wel 'ohja'.

- Opmerkingen over de laatste drie animaties (kennisontwikkeling).

Zeven koppels gaven aan deze animaties als functioneel te hebben ervaren, met name de animaties over het moduleren (vier koppels) en over de systematische fout (drie koppels). Alle zeven koppels waarderden vooral dat deze animaties nieuwe kennis behandelden en visualiseerden wat het effect was. Bijvoorbeeld:

- Ze waren wel verduidelijkend. Vooral met moduleren, dan zag je gewoon goed hoe het dan precies in elkaar zit. Anders was het moeilijker voor je te zien.
- Ik vond die over het moduleren het beste of eigenlijk meer het meest nodig, omdat het toch iets is wat nieuw is.

Daarnaast werd door drie koppels genoemd dat de animatie over de systematische fout hen juist verwarde:

- Ja, ik snapte alleen niet, met die verschillende coaxkabels dat er niet evenveel metingen bij de computer aankwamen.
- T: Alleen de animatie over de pulsen tussen detector en computer bracht ons nogal in verwarring.  
B: Ja, op een gegeven moment gingen we af op de animatie en gingen we niet meer nadenken hahaha.

## Observaties

Uit verdere analyse van de observaties gedurende de uitvoering konden twee kernpunten van de verwarring bij de animatie over de systematische fout worden geconstateerd. Ten eerste vonden de leerlingen het lastig om in te zien welke signalen er gelijktijdig vertrokken:

- T: Maar ze zijn dus wel gelijktijdig verstuurd! Maar ze zijn niet gelijktijdig aangekomen.  
B: Nee, ze zijn ook niet gelijktijdig verstuurd, want de bron zendt een signaaltje en een tijdje daarna, een heel klein tijdje daarna...  
T: Oh ja, dat is natuurlijk omdat die afstand is overbrugd...

De leerlingen vast toen zij probeerden te begrijpen wat de animatie visualiseerde. Blijkbaar was deze onduidelijk. Mogelijk werd dit veroorzaakt door het plotselinge gebruik van pulsen waar bij het voorgaande steeds over lopende golven werd gesproken. De verwarring zou ook deels een gevolg kunnen zijn van onvoldoende uitleg over de werking van het meetsysteem en te weinig aandacht voor de wijze waarop de signalen gemeten werden.

Ten tweede begrepen drie koppels de vraag ‘Vergelijkt de computer het binnenkomende signaal van de lichtbron met een signaal dat de detector eerder of later naar de computer heeft verstuurd?’ verkeerd. Deze koppels antwoordden dat het signaal later bij de computer aan kwam.

- T: Als deze (wijst detector aan) aankomt komt die van de bron eerder.  
T: Wat ik denk dat ze zeggen is dat de bron die heeft er al eentje verstuurd van de volgende terwijl het signaal van de detector binnenkomt.  
B: Ja, dus dan wordt zo’n later signaal van de bron vergeleken met een eerder ...ja. Ja, nog wel een beetje vaag.  
T: Dat is de enige uitleg.

De problemen met de animatie leken dus enerzijds een gevolg te zijn van een onduidelijke vraagstelling in het lesmateriaal en werden anderzijds veroorzaakt doordat de animatie zelf onduidelijk was. Hierdoor liepen de leerlingen vast toen ze probeerden te begrijpen wat de animatie visualiseerde. Mogelijk werd de verwarring veroorzaakt door het plotselinge gebruik van pulsen waar bij het voorgaande steeds over lopende golven werd gesproken. Ook zou het deels een gevolg kunnen zijn van onvoldoende uitleg over de werking van het meetsysteem en te weinig aandacht voor de wijze waarop de computer uiteindelijk de signalen meette.

## 6.2.5 Facultatieve pagina's

Op een aantal schermen van de site werd verwezen naar facultatieve pagina's. Door de pagina's te openen in een apart en kleiner window kon de leerling wel over de achtergrondinformatie beschikken zonder het zicht op de hoofdlijn te verliezen. De

functie van deze pagina's was achtergrondinformatie te bieden. Dit was informatie die voor de uitvoering van het experiment niet strikt nodig was, maar mogelijk wel de motivatie zou versterken en/of het experiment in een breder kader zou plaatsen.

### Interview

Eerst werd nagegaan of de leerlingen gebruik maakten van de facultatieve pagina's en vervolgens werd nagegaan of ze aan hun functie voldeden.

De leerlingen maakten maar beperkt gebruik van de facultatieve pagina's. In het interview gaven slechts drie koppels aan ze allemaal wel (even) gelezen te hebben, drie koppels hadden alleen enkele pagina's gelezen en de overige vier koppels hadden alle facultatieve pagina's overgeslagen. Redenen die opgegeven werden voor het niet of beperkt lezen van de pagina's waren:

- Omdat het lezen van de pagina's niet nuttig leek. Leerlingen gaven aan dat ze de facultatieve pagina's alleen lazen als ze het gevoel hadden dat dit zou bijdragen aan het succesvol afronden van het experiment (zes koppels). Bijvoorbeeld:
  - Als het echt van belang zou zijn voor het experiment dan zou het er meteen wel bij hebben gestaan. Dus daarom las ik het niet, behalve als ik echt verder zou willen grazen.
- Omdat ze niet afgeleid wilden raken (één koppel):
  - Omdat ik dan afgeleid raak van waar ik mee bezig ben. Want dan wil ik daar verder over gaan lezen.

Eén koppel merkt op dat de facultatieve pagina's in een later stadium, bijvoorbeeld ten tijde van het schrijven van het verslag, wellicht wel interessant zouden kunnen zijn:

- Bij het schrijven van het verslag zou ik misschien af en toe wel even denken hé dit is interessant. Maar nu waren we met het onderzoek bezig.

Uit bijna alle opmerkingen over de specifieke pagina's (vijf van de zes pagina's) werd wel duidelijk dat de leerlingen de pagina's lazen uit een opgeroepen nieuwsgierigheid naar het onderwerp: ze wilden weten hoe iets precies werkt. Bijvoorbeeld:

- Ja, het wordt in de tekst daarvoor eigenlijk gezegd hoe hij het heeft gedaan, maar de exacte manier is toch wel iets wat we wilden kunnen reproduceren en we waren nieuwsgierig hoe het precies zat.

Het zesde koppel was gericht op het vinden van nuttige informatie:

- Systematische fout is het nuttigst, omdat dat een belangrijk onderdeel is van het project.

Aangezien de leerlingen de facultatieve pagina's maar beperkt hebben gelezen is het niet mogelijk om per pagina na te gaan of ze aan hun specifieke inhoudelijke functie voldeden.

### 6.2.6 Webcams

Bij het uitvoeren van de metingen hadden de leerlingen, om de meetopstelling te kunnen bekijken, de beschikking over twee webcams waarvan er één ook bestuurbaar

was. De functie hiervan was de leerlingen te betrekken bij de opstelling, hen de mogelijkheid te geven de opstelling tot in detail te bekijken en zicht te geven op veranderingen aan de opstelling als gevolg van hun eigen handelingen.

### **Interview**

Toen in het interview aan de leerlingen gevraagd werd of ze de webcam bestuurd hadden en wat ze hiervan vonden waren vrijwel alle koppels (acht koppels) enthousiast. De redenen die ze hiervoor gaven waren:

- Het bekijken van de status van de opstelling (vier koppels). Bijvoorbeeld:
  - Voornamelijk gebruikt om te kijken waar de kar stond en of het goede medium voor de lens zat.
  - Het is wel heel erg wennen dat je de apparatuur niet ziet. Door de webcam heb je toch nog enig overzicht over wat je eigenlijk aan het doen bent. Zo kun je ook controleren welk medium er bijvoorbeeld tussenstaat. Dat niet iemand er iets uit heeft gehaald.
- Een idee van de opstelling of gevoel voor het experiment krijgen (drie koppels):
  - Anders is het niet meer echt een experiment maar meer een computerspelletje.
  - Ik was wel verbaasd dat je zelf een afstand ding kon beïnvloeden. Ik was echt verbaasd dat lopende karretje te zien.
- Om wat te spelen (twee koppels):
  - We hebben de hele ruimte doorzocht.
  - C: Het leukste zou zijn als hij 360 graden kon draaien.  
M: Maar het was ook leuk dat je zo ver kon inzoomen zodat je alles kon lezen.
- Slechts één koppel gaf aan de webcam overbodig te hebben gevonden:
  - Ik vond het wel een beetje overbodig. Ik vertrouw dat ding wel.

## **6.2.7 Conclusies B1**

Aangezien bij onderzoeksvraag B1 het functioneren van de afzonderlijke vormelementen werd onderzocht, worden de conclusies ook per element gegeven.

### **B1.1 Vragensysteem**

De meeste leerlingen vonden het functioneel en prettig om aan de hand van het vragensysteem zelfstandig het experiment te doorlopen. Ze waardeerden de bevestiging dat ze op de goede weg waren, het actief met de stof bezig zijn en dat ze hierdoor geen lange teksten hoefden te lezen.

Het moeten beantwoorden van de vragen werd alleen bij het eerste deel door enkele leerlingen als enigszins storend ervaren, omdat zij deze vragen erg eenvoudig vonden. Het zelf moeten nakijken van de open vragen werd door de meeste leerlingen niet als hinderlijk ervaren en zorgde wel voor de gewenste vrijheid in het zelf formuleren van de antwoorden.

### **B1.2 'Waar ben ik'-window**

De meeste leerlingen vonden het 'Waar ben ik'-window een zinvol hulpmiddel. Met name het terugbladeren in het materiaal werd als functioneel ervaren; vooruitbladeren daarentegen werd door de leerlingen nauwelijks gedaan en ook niet als nuttig gezien. De functie van het zicht geven op waar zij zich in het materiaal bevinden werd slechts door een kleine minderheid uitdrukkelijk gebruikt. De overige leerlingen hadden hier geen behoefte aan, omdat ze naar eigen idee steeds goed zicht hadden op waar ze zich in het materiaal bevonden en wat nog ging komen. Vermoedelijk heeft ook voor deze leerlingen de voortdurende explicitering van de inhoudelijke lijn in het altijd zichtbare 'Waar ben ik'-window hier wel onbewust aan bijgedragen, maar dit kon op grond van de onderzoeksdata niet hard worden gemaakt.

### **B1.3 Opbouw van de schermen**

De leerlingen waren positief over het uiterlijk van de site. Ze vonden deze duidelijk en ervoeren de opbouw als rustig en functioneel. Ook het per scherm steeds terugblikken en vooruitwijzen werd door de meeste leerlingen als functioneel ervaren omdat ze het hierdoor beter begrepen en niet hoefden terug te bladeren. Het leek er dus op dat dit vormelement ondersteunde dat de leerlingen wisten waar ze mee bezig waren.

### **B1.4 Animaties**

Alle leerlingen vonden de animaties over het algemeen nuttig en functioneel. De waardering voor de animaties was groter als er nieuwe verschijnselen gevisualiseerd werden. Bij bespreking van de afzonderlijke animaties kwam naar voren dat de animaties waarmee voorkennis werd opgewekt duidelijk minder gewaardeerd werden omdat de voorkennis al aanwezig was. Toch werd de aanwezigheid van deze animaties niet als storend ervaren en de leerlingen zagen in dat de animaties wel een functie zouden hebben als de voorkennis niet meer voldoende aanwezig was. Vooral de animaties over het moduleren, waarin een nieuw principe werd gevisualiseerd dat voor de leerlingen niet direct inzichtelijk was, werden door de leerlingen als functioneel ervaren. Ze hielpen hen dit lastige verschijnsel te bevatten, al hielden ze wel moeite om het modulatieprincipe onder woorden te brengen (zie hoofdstuk 5). De animatie over de systematische fout had op een meerderheid van de leerlingen hetzelfde effect, hoewel er ook enkele leerlingen waren die juist verward werden door deze animatie. Voor hen maakte deze animatie niet duidelijk wat de oorsprong van de systematische fout was. Het kostte hen veel moeite om te interpreteren wat zij zagen en dit vervolgens terug te koppelen naar de meetmethode. De animatie zorgde bij hen wellicht voor meer verwarring dan wanneer ze er zonder animatie over hadden moeten nadenken.

### **B1.5 Facultatieve pagina's**

De facultatieve pagina's werden slechts beperkt gelezen. De leerlingen keken de pagina's alleen in als het onderwerp aansprak en als ze het gevoel hadden dat er informatie op te vinden was die direct ingezet kon worden voor het experiment. De functie van de pagina's was echter om juist verdiepend materiaal te geven dat buiten de kaders van de benodigde informatie trad. Omdat de leerlingen doelgericht werkten, paste hier blijkbaar verdiepen in de facultatieve pagina's niet bij. Ze vonden het, ten tijde van het uitvoeren van het experiment, niet prettig te worden afgeleid. Er werd niet waargenomen dat er specifieke pagina's waren die significant meer gelezen werden dan andere. Wat betreft de pagina's die wel gelezen werden, riep de hoofdttekst bij de leerlingen nieuwsgierigheid op. Dit is een aanwijzing dat de facultatieve pagina's de globale functie (extra verdiepende informatie verschaffen die mogelijk interessant kan zijn zonder af te leiden van de hoofdttekst) wel vervulden.

### **B1.6 Webcams**

De leerlingen ervoeren het als functioneel dat ze de opstelling met de webcams konden bekijken. Het maakte hen bewust van de opstelling van het experiment en ze gebruikten de webcams om de toestand van de opstelling te bekijken. De enthousiaste reacties van de leerlingen bevestigden dat, al zijn de webcams niet per se nodig voor het verzamelen van de data, ze toch bijdroegen aan een positieve beleving door de leerlingen en het afstandskarakter compenseerden.

## **6.3 Resultaten B2: Afstandskarakter**

*Onderzoeksvraag B2: Hoe beleven de leerlingen het afstandskarakter?*

Onderzoeksvraag B2 richtte zich op het in kaart brengen van de meningen van de leerlingen over het uitvoeren van een experiment op afstand. Het onderzoek moest duidelijk maken of de leerlingen het gevoel hadden echt met een experiment bezig te zijn en of ze dit leuk vonden (B2.1). Nagegaan werd of het op afstand kunnen besturen en ter beschikking hebben van een werkende opstelling als positief werd ervaren of dat de leerlingen terugkijkend het experiment liever aan tafel zouden hebben uitgevoerd (B2.2).

In het interview werden de leerlingen gevraagd terug te kijken op wat ze gedaan hadden. Deze antwoorden waren de belangrijkste onderzoeksbron. Wanneer hieruit onvoldoende duidelijk werd kon ook de belevingsenquête ingezet worden omdat de leerlingen hierin ook waren gevraagd terug te kijken op wat ze gedaan hadden. Met de observaties kon het gedrag van de leerlingen tijdens de uitvoering van het



experiment in kaart worden gebracht. Dit hielp om hun opmerkingen over hoe ze het uitvoeren van het experiment beleefd hadden te kunnen plaatsen (zie tabel 6.3).

**Tabel 6-3** Inzet van de onderzoeksinstrumenten voor de beantwoording van de B2-vraag

	Interview na afloop	Belevings-enquête	Observaties
Subvraag B2.1	X		
Subvraag B2.2	X	X	X

### 6.3.1 Gevoel echt met de opstelling bezig te zijn?

Het antwoord op onderzoeksvraag B2.1 moest duidelijk maken of de leerlingen het gevoel hadden echt met een opstelling bezig te zijn geweest.

#### Interviews

Om deze vraag te kunnen beantwoorden werd in het interview aan de leerlingen gevraagd of dit het geval was geweest. Voor één koppel was het blijkbaar zo vanzelfsprekend dat ze echt met een opstelling bezig waren geweest dat ze de vraag niet goed begrepen. Zij antwoordden:

- B: Ja, wat anders?

Vier andere koppels gaven echter aan dit gevoel niet echt te hebben gehad. Voor één van hen voelde het uitvoeren van het experiment meer als met de theorie bezig zijn dan met het uitvoeren van praktisch werk:

- Ik had meer het gevoel dat ik bezig was met de theorie hoe je het moest gaan doen, en de opstelling gebruikte je meer om te controleren of dat klopte.

Voor de andere drie voelde het meer als een soort spelletje. Bijvoorbeeld:

- M: Nou eerlijk gezegd, het was meer zoiets als een spelletje, dan druk je daar op, dan druk je daar op en dan 'plop' komt het.  
C: Ik denk als je die opstelling zelf eerst ziet, hoe het in elkaar zit dat het dan toch een heel andere beleving is.

De vijf overige koppels hadden wel het gevoel met een opstelling bezig te zijn geweest, maar merkten wel op dat het anders voelde dan in de conventionele situatie. Ze legden uit dat het wel voelde als echt experimenteren door de beschikbaarheid van de webcams en omdat ze werkelijk de controle over de opstelling hadden (drie koppels). Bijvoorbeeld:

- Dat wel ja, vooral door die camera. Hij deed precies wat ik wilde, dus als ik naar links wilde dan ging hij naar links. Knappe simulatie als die dat ook doet.

Eén van hen benoemde de meerwaarde van het op afstand experimenteren expliciet

door de voordelen van de geconditioneerde omgeving en het voor scholen beschikbaar komen van het experiment naar voren te brengen:

- M2: Je kan niet de opstelling kapot maken.  
M1: Een groot voordeel is ook dat een school uit hele andere delen van het land deze proef kan uitvoeren. Grote nadelen heb ik eigenlijk niet ondervonden.

### 6.3.2 Liever op afstand of aan tafel?

Het antwoord op onderzoeksvraag B2.2 moest duidelijk maken of de leerlingen het experiment liever op afstand of aan de tafel zouden willen uitvoeren.

#### Interview

Toen in het interview aan de leerlingen werd gevraagd of ze het experiment liever aan tafel of op afstand zouden hebben gedaan, gaven drie koppels aan experimenteel werk het liefste aan de tafel te doen. Twee van hen zouden dan ook de handleiding op papier willen krijgen, zodat ze hierin kunnen bladeren of er ook op andere momenten aan zouden kunnen werken:

- Alsnog aan tafel alles, ja dat je kan bladeren.
- Ik doe vaak al mijn huiswerk een beetje bij de andere lessen en aangezien ik niet mijn laptop meeneem naar al mijn lessen zou op papier handiger zijn want dan zou ik er alvast aan kunnen werken.

Vier andere koppels gaven aan het experiment liever op afstand te willen uitvoeren omdat ze dan nauwkeuriger, meer gestructureerd te werk gaan. Bijvoorbeeld:

- Dit beviel me wel, anders moet je het weer zelf doen en dan gaat het weer verkeerd en dan laat je iets vallen.

De overige drie koppels hadden geen duidelijke voorkeur. Bijvoorbeeld:

- M: Normaal houd ik niet zo van practica. Misschien vind ik dit eigenlijk nog wel handiger. Je drukt op een knopje en dan heb je het.  
C: Aan de ene kant is het wel leuk om te sleutelen aan de opstelling, aan de andere kant weet je veel minder dingen zeker en je hebt dan ook een veel grotere meetfout in ieder geval of dat je het verkeerd instelt en hier is het wel makkelijk te bedienen.

Drie koppels merken overigens ongevraagd wel op dat ze in ieder geval bij uitvoering “aan tafel” de site als handleiding zouden willen gebruiken. Bijvoorbeeld:

- M1: De website vind ik prettiger werken dan met een papieren handleiding, denk ik.  
M2: Een papieren handleiding zegt niets terug.

Het interview werd afgesloten door te vragen of de leerlingen nog iets kwijt wilden. Vier koppels lieten hier weten dat ze het experiment met plezier hadden uitgevoerd. Eén van hen voegt hieraan toe dat ze vooral de voorbereiding op het experiment (het lesmateriaal voorafgaand aan de uitvoering van de metingen) gewaardeerd hadden:

## Hoofdstuk 6

- Wat ik wel echt als verschil met een normaal practicum merk is dat je bij een normaal practicum sneller aan de slag gaat. Je wilt dan sneller bezig want je ziet dat ding er staan en je wilt gewoon wat doen. En hier kan dat niet. En dat vond ik goed.

### Belevingsenquête

Om een idee te krijgen van welke aspecten van het afstandskarakter door de leerlingen gewaardeerd werden werd in de belevingsenquête gevraagd terug te blikken op het geheel. Vier leerlingen gaven aan alles leuk te hebben gevonden. Eén van deze vier benoemde hierbij het werken met de opstelling in het bijzonder. Ook zeven andere leerlingen noemden dit argument. Bijvoorbeeld:

- Ik vond het leuk om de opstelling te zien, hoe nauwkeurig dat allemaal werkte en mooi in elkaar zat met camera en al.
- Het " rommelen " met de opstelling via het internet.
- Ik vond het idee dat we een practicumopstelling ergens ver weg konden laten bewegen ook wel grappig.

Een andere leerling verfiende dit tot vooral het werken met geavanceerde apparatuur:

- Dat je met wat betere apparatuur kan meten.

Vier leerlingen gaven aan dat ze het leuk vonden dat ze op een verwachte waarde uitkwamen. Bijvoorbeeld:

- Ik vond het leuk om precies te gaan uitrekenen welke waarde wij uit het experiment kregen en wat de literatuurwaarde was. Ook vond ik het leuk uit te vinden waar ik iets fout of juist goed had gedaan.

Drie leerlingen noemden dat ze de werkwijze van de website waardeerden:

- Het was een interessante proef en de presentatiewijze was leuk.
- Ik vond het experiment ook erg goed opgebouwd. Er zat veel begeleiding in, maar je moest heel duidelijk ook zelf goed nadenken! Je moest duidelijk meedenken, anders kon je de volgende stap niet maken.

De overige argumenten werden slechts door één leerling naar voren gebracht. Genoemd worden: kennis maken met het werk van een experimenteel fysicus, zelf onderzoeken, meetfouten ontdekken, samenwerken met partner, nieuwe dingen leren en omdat het leuk is:

- Het was ook leuk om de stukjes over een fysicus te lezen. Dat kijkje in hun aanpak was interessant.
- De omgeving, ook iets zelf onderzoeken is wel leuk om te doen.
- Discussiëren met M. over wat we nu het beste kunnen doen.
- Verder vond ik het leuk/interessant om te ontdekken wat de invloed is van verschillende meetfouten.
- Ik vond het leuk dat ik nieuwe dingen heb geleerd. Ik vond die vragen met de formules in elkaar over zetten ook leuk, maar dat komt omdat ik de wiskundige dingen meestal heel leuk vind.
- Bovendien ben je nu echt bezig met iets, het is niet saai sommetjes maken, en het heeft ook enig nut.

Op de vraag wat minder leuk was antwoordden zeven leerlingen dat de metingen op

den duur wel saai werden. Bijvoorbeeld:

- Aan het einde is het een beetje allemaal hetzelfde. Je moet elke keer weer die metingen doen. Dan wel met een ander medium, maar wordt toch wel een beetje eentonig.

### **Observaties**

Observaties van de metingen door leerlingen maakten duidelijk dat de leerlingen geen meetstrategie voorbereidden. Slechts één koppel besteedde tijd aan het nadenken over de manier waarop ze met de opstelling zo efficiënt mogelijk konden meten. Zij verkortten zo de benodigde meettijd aanzienlijk ten opzichte van de andere leerlingen.

### **6.3.3 Conclusie B2**

Met het onderzoek aan de B2-vraag werd nagegaan hoe de leerlingen het afstandskarakter beleefden. Eerst werd nagegaan of ze het gevoel hadden echt met een opstelling bezig te zijn. Het onderzoek aan de B1 vraag had al duidelijk gemaakt dat de webcams, die zichtbare veranderingen aan de opstelling in beeld brachten, een belangrijke rol speelden in het betrokken zijn bij de opstelling.

De meeste leerlingen gaven aan dat dit experiment wel anders voelde dan een experiment dat je aan tafel uitvoert. Voor sommigen beperkte dit 'anders' zich tot de constatering dat ze niet meer direct bij de opstelling aanwezig waren, voor anderen ging het wat verder. Deze leerlingen hadden meer het gevoel dat ze een spelletje aan het uitvoeren waren dan een experiment. Toch leek geen leerling het op afstand experimenteren als iets negatiefs te ervaren. Ze zagen voordelen in het nauwkeuriger kunnen werken, de geconditioneerde omgeving en de vergrote beschikbaarheid van de opstelling. De overige leerlingen hadden niet het gevoel een experiment te hebben uitgevoerd, maar meer dat ze bezig waren geweest met de theorie. De opstelling had voor hen een secundaire rol en diende alleen voor het controleren van de theorie.

De meningen van de leerlingen over het al dan niet op afstand uitvoeren van het experiment waren verdeeld en niet bijzonder uitgesproken. Wel kwam duidelijk de waardering voor de opzet en werkwijze naar voren. De meerderheid van de leerlingen had het idee met dit experiment op afstand nauwkeuriger, met meer zelfvertrouwen en met minder fouten te kunnen werken. Bijna alle leerlingen beoordeelden de werkwijze en de wijze van begeleiding bij het experiment zelfs als prettiger dan in de conventionele situatie. Het uitvoeren van de metingen werd op het laatst wel als saai ervaren. De belangrijkste meerwaarde van het uitvoeren van dit experiment op afstand lijkt dus te zitten in de werkwijze en wijze van begeleiding die het mogelijk maakten dat de leerlingen zelfstandig en met plezier het experiment konden uitvoeren.

## 6.4 Conclusie B-vraag

Doel van de B-vraag was na te gaan of de website met de daarin opgenomen vormelementen functioneerde in het faciliteren van het zelfstandig en op afstand uitvoeren van het experiment. Het onderzoek maakte duidelijk dat de website goed functioneerde. De leerlingen waardeerden de opzet, waren tevreden over de indeling en opmaak van de schermen en vonden het leuk om het experiment gestuurd door het vragensysteem zelfstandig te kunnen doorlopen. De gerichte feedback die ze hierbij ontvingen droeg bij aan het voorkomen van inhoudelijke knelpunten. Ook waardeerden de leerlingen het dat ze hierdoor actief met de stof bezig waren, geen lange teksten hoefden te lezen, en wel steeds bevestigd werden dat ze op de goede weg waren. Het 'Waar ben ik'-window ondersteunde hen in het (onbewust) voortdurend zicht houden op de grote lijn. In tegenstelling tot de eerste cyclus wisten de leerlingen nu wel steeds waar ze waren, verdwaalden niet in de site en herkenden steeds de inhoudelijke lijn in het materiaal, werden hierdoor geboeid en dwaalden (daarom) hier niet van af. De leerlingen lieten zich, vanwege hun doelgerichte houding, ook niet afleiden door de, kennelijk goed herkenbare, facultatieve pagina's, want deze werden nauwelijks bezocht. De bestuurbare webcam was een unaniem gewaardeerd vormelement. Deze zorgde voor betrokkenheid bij de opstelling en droeg bij aan het verkrijgen van zicht op de werking en de status van de opstelling.

De animaties werden gewaardeerd door de leerlingen, maar behoeven wel enige aanpassing omdat sommige nog niet geheel duidelijk waren. Vooral de animaties die een nog onbekend verschijnsel zoals moduleren behandelden, werden gewaardeerd. De animaties die zich richtten op onderwerpen die al bekend waren en bedoeld waren om voorkennis op te roepen werden als minder noodzakelijk beoordeeld.

De leerlingen hebben het experiment op afstand over het algemeen met plezier uitgevoerd en voelden zich redelijk betrokken bij de opstelling. Er was geen duidelijke voorkeur voor het al dan niet op afstand uitvoeren van de metingen. Er waren wel enkele leerlingen die het experiment toch liever aan de tafel zouden uitvoeren, maar de argumenten die zij hiervoor aandroegen maakten duidelijk dat deze groep leerlingen, onafhankelijk van de gekozen opzet, waarschijnlijk altijd een voorkeur voor het aan tafel uitvoeren van een experiment zouden houden. Zij vinden het nu eenmaal leuker direct bij een opstelling te zitten, deze te kunnen aanraken en dergelijke. Toch leken ook deze leerlingen het experiment met plezier te uitvoeren en waren er niet negatief over.

De leerlingen waren vooral te spreken over de werkwijze. Ze vonden het prettig zelfstandig, maar toch gestuurd te kunnen werken en bevestiging te krijgen als ze op de goede weg zijn, en hadden daardoor het gevoel dat ze nauwkeuriger en meer gestructureerd konden werken dan ze gewend waren bij de experimenten op school.

# Reflectie



7.1	Inleiding	190
7.2	De onderzoeksvraag	190
7.2.1	Resultaten eerste cyclus	190
7.2.2	Resultaten tweede cyclus	191
7.2.3	Antwoord op de globale onderzoeksvraag	195
7.3	Reflectie op het eindproduct	197
7.3.1	Kanttelingen bij de inhoudelijke uitlijning	197
7.3.2	Kanttelingen bij de vormelementen	201
7.3.3	Aanpassingen aan het lesmateriaal	202
7.4	Reflectie op de onderzoeksmethode	204
7.4.1	Onderzoekssetting	204
7.4.2	Onderzoeksinstrumenten	206
7.4.3	Ontwikkelproces	207
7.5	Toekomst	210
7.5.1	Recente ontwikkelingen	210
7.5.2	Verder onderzoek	213
7.5.3	Afsluiting	219

## 7.1 Inleiding

In dit afsluitende hoofdstuk wordt de balans opgemaakt van het uitgevoerde ontwikkelingsonderzoek waarin gewerkt werd aan de ontwikkeling van een experiment op afstand voor leerlingen uit 5 en 6 VWO. Om helder te krijgen wat het onderzoek heeft opgeleverd wordt eerst de onderzoeksvraag beantwoord (7.2). Daarna wordt er kritisch teruggekeken op het ontwikkelde product (7.3) en het doorlopen onderzoeksproces (7.4). Het hoofdstuk wordt afgesloten met een blik op de toekomst (7.5). Hierin worden eerst de resultaten in het perspectief van recente literatuur geplaatst. Vervolgens wordt nagegaan in hoeverre generalisatie mogelijk is en de opbrengst van het onderzoek toepasbaar is in andere situaties. Ten slotte worden suggesties voor verder onderzoek gedaan.

## 7.2 De onderzoeksvraag

In het ontwikkelingsonderzoek is in twee cycli gewerkt aan het beantwoorden van de in hoofdstuk 1 ingekaderde globale onderzoeksvraag: *Hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?*

Dit is gedaan door het ontwikkelen van een experiment waarmee de lichtsnelheid in verschillende media bepaald kon worden. Het is bedoeld voor leerlingen uit 5/6 VWO en wordt via een website aangestuurd en uitgevoerd. Om de meerwaarde van het afstandskarakter van het experiment maximaal te benutten werd als extra ontwerpvoorwaarde gesteld dat het experiment geheel zelfstandig, zonder hulp van de docent, door de leerlingen uit te voeren moest zijn.

### 7.2.1 Resultaten eerste cyclus

Het onderzoek aan het in de eerste cyclus ontwikkelde ontwerp van het experiment (product 1) liet zien dat, voor dit specifieke experiment met theoretisch complexe achtergrond, de geconstateerde problemen vooral betrekking hadden op de gebrekkige inhoudelijke uitlijning en de complexe website structuur van het product.

Technisch gezien functioneerde de opstelling naar behoren. De leerlingen konden zonder problemen op afstand de opstelling besturen en de benodigde meetgegevens verzamelen, maar werden bij het bestuderen van het materiaal weinig geactiveerd, verdwaalden in de site en wisten niet goed waar ze mee bezig waren.

Het onderzoek werd voortgezet met een tweede versie (product 2). De leerlingen moesten bij dit materiaal een actievere rol aannemen. Het onderzoek maakte duidelijk dat het lesmateriaal beter functioneerde wanneer de leerlingen de meetmethode zelf

ontdekten door vragen te beantwoorden dan wanneer de voorbereiding beperkt bleef tot het lezen van teksten op het scherm zoals bij product 1 het geval was. De leerlingen wisten beter waar ze mee bezig waren, maar ook nu werden enkele inhoudelijke struikelblokken geconstateerd die de zelfstandige voortgang belemmerden. Het materiaal was echter niet ontworpen voor een afstandsituatie. Bij het ontwerp van het materiaal was uitgegaan van de aanwezigheid van een docent die kon inspringen wanneer de leerlingen problemen hadden met het beantwoorden van de vragen. Op grond van de geconstateerde problemen met zowel product 1 als 2 werden in hoofdstuk 3 twee categorieën van aanbevelingen geformuleerd.

De eerste categorie had betrekking op de inhoud van het materiaal. De inhoud van het materiaal zou zodanig moeten zijn dat inhoudelijke knelpunten voorkomen werden en dat de leerlingen steeds zouden weten waar ze mee bezig waren.

De tweede categorie had betrekking op de opzet en werkwijze. Deze moesten zodanig gekozen worden dat problemen met het doorgronden van de structuur van de site voorkomen werden. Bovendien zouden er interactie, controle, feedback en reflectiefaciliteiten ingebouwd moeten worden.

De geconstateerde problemen waar de aanbevelingen uit voortkwamen hadden beide betrekking op het begeleidend materiaal van het experiment, maar niet op het technisch werkend krijgen van de opstelling. Dit bleek namelijk vrij eenvoudig te realiseren. Blijkbaar is dus, voor het specifieke experiment met een theoretisch relatief ingewikkelde achtergrond, vooral didactische ontwerpinspanning nodig om de problemen met inhoud, opzet en werkwijze op te lossen.

### **7.2.2 Resultaten tweede cyclus**

De ontwerpinspanning in de tweede cyclus startte met het uitwerken van de aanbevelingen die op grond van de bevindingen in de eerste cyclus waren geformuleerd. Dit leidde tot het voornemen om lesmateriaal te ontwikkelen dat zodanig was opgezet dat de leerlingen steeds zouden weten waar ze mee bezig waren en waarom. Binnen het Centrum voor BètaDidactiek werd ook in andere onderzoeksprojecten gewerkt aan de vraag hoe een onderwijsleerproces zou moeten worden vormgegeven zodanig dat een leerling steeds zicht houdt op de inhoudelijke lijn. Het lag dan ook voor de hand hierbij aan te sluiten en, net als de andere projecten, het lesmateriaal te ontwikkelen binnen het raamwerk van de probleemstellende benadering. In de probleemstellende benadering staat namelijk het ontwerpen van een voor leerlingen zinvol en logisch onderwijsleerproces centraal.

Bij het lichtsnelheidsexperiment was het voor de leerlingen zichtbaar maken van de rode draad in het materiaal nog belangrijker omdat de leerlingen het lesmateriaal, anders dan bij de andere onderzoeken in de groep, zelfstandig moesten kunnen



uitvoeren. Er moest dus geanticipeerd worden op de situatie dat er geen docent aanwezig zou zijn die wanneer nodig kon inspringen bij problemen en het zicht op de rode draad kon waarborgen. De vorm van het materiaal moest zodanig gekozen worden dat voor dit ontbreken van de docent kon worden gecompenseerd. Het ontwerp van het nieuwe materiaal (product 3) viel dan ook uiteen in enerzijds het inhoudelijk uitlijnen en anderzijds het vinden van geschikte vormelementen die door het afstandskarakter noodzakelijk waren.

De inhoudelijke uitlijning startte met het oproepen van een globaal motief zodat de leerlingen geïnteresseerd zouden raken in het onderwerp. Vervolgens werkten zij, gestuurd door enkele achtereenvolgens opgeroepen lokale motieven, aan het ontwikkelen van de meetmethode. Deze opbouw van het lesmateriaal moest ook voorkomen dat de leerlingen struikelden over inhoudelijke knelpunten zonder dat het materiaal een receptmatig karakter zou krijgen.

Wederom aansluitend bij de ontwikkelingen binnen het Centrum voor BètaDidactiek werd in het lesmateriaal een expliciete parallel gelegd met de handelingspraktijk van de experimenteel fysisch. De parallel werd uitgewerkt door het doel van het experiment bij te stellen van 'het bepalen van de lichtsnelheid in verschillende media' naar 'het ontwikkelen van een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in verschillende media'. Door het materiaal aan te laten sluiten bij de handelingspraktijk van een experimenteel fysisch kon het experiment voor de leerlingen in een breder kader worden geplaatst en verkregen zij zicht op (een deel van) deze handelingspraktijk.

Het reeds beschikbaar zijn van de opstelling en de daaruit volgende gevolgen voor de meetmethode vormde het startpunt van het leerproces van de leerlingen. Gebruik makend van karakteristieke procedures uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysisch werkten de leerlingen stap voor stap aan het ontwikkelen van een, gegeven de beschikbare opstelling, geschikte meetmethode. Er werden drie deelproblemen geformuleerd die achtereenvolgens opgelost moesten worden. Bij het oplossen van elk deelprobleem doorliepen de leerlingen dezelfde opeenvolgende stappen. Ze bestudeerden (een eigenaardigheid van) de meetopstelling, pasten de meetmethode hierop aan om vervolgens te evalueren of dit tot het gewenste resultaat had geleid en de verwachte waarde voor de lichtsnelheid opleverde.

De vormelementen bestonden uit een automatisch vragen- en feedbacksysteem om de leerlingen te activeren en zicht te geven op hun eigen leerproces, een 'Waar ben ik'-window waarin de rode draad in het materiaal werd gevisualiseerd, een vaste opbouw van schermen om de verbindingen tussen de opeenvolgende schermen duidelijk te maken, animaties, facultatieve pagina's en twee webcams.

Het onderzoek in de tweede cyclus moest duidelijk maken of de combinatie van de inhoudelijke uitlijning en de vormelementen tot een goed functionerend en zelfstandig uit te voeren experiment op afstand had geleid. Aan de hand van twee onderzoeksvragen werd nagegaan of dit het geval was.

### **Inhoudelijke uitlijning**

De eerste onderzoeksvraag concentreerde zich op de inhoudelijke uitlijning: *Voldoet de didactische structuur zodanig dat de leerlingen in staat zijn het experiment zelfstandig, inhoudelijk gemotiveerd en met voldoende zicht op waar ze mee bezig zijn uit te voeren?*

De resultaten, besproken in hoofdstuk 5, lieten zien dat de in de didactische structuur uitgezette lijn voor het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht goed functioneerde. De eerdere inhoudelijke knelpunten vormden niet langer struikelblokken en het proces dat de leerlingen doorliepen werd door hen als zinvol, logisch en prettig ervaren. Ze wisten waar ze inhoudelijk mee bezig waren, konden zelfstandig de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht ontwikkelen en bereikten zo de gewenste leerdoelen voor dit deel van het materiaal.

Bij het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media werden wel enkele problemen geconstateerd. In dit onderdeel werd van de leerlingen verwacht de eerder ontwikkelde meetmethode, met minder begeleiding dan bij de lichtsnelheid in lucht het geval was, uit te breiden voor andere media. De leerlingen konden kiezen of ze de meetmethode geheel zelfstandig of aan de hand van enkele tussenstappen wilden ontwikkelen. De verwachting vooraf was dat slechts een beperkte groep leerlingen in staat zou zijn de meetmethode geheel zelfstandig te formuleren. Enkele leerlingen leken hier inderdaad toe in staat. Toch kozen ze voor het in stappen ontwikkelen van de meetmethode en voerden vervolgens de daarin voorgestelde methode (succesvol) uit.

Alle leerlingen waren uiteindelijk in staat met behulp van de ondersteuning door het lesmateriaal het experiment af te ronden, zij het dat daarvoor bij een deel van die leerlingen wat extra ondersteuning van buitenaf (door de onderzoeker) nodig was. Verder werd geconstateerd dat de leerlingen in de loop van deel 3 het uitvoeren van de metingen als saai begonnen te ervaren.

In 7.3.3 wordt uitgewerkt welke aanpassingen gedaan zouden moeten worden om het materiaal op deze punten te verbeteren.

Wat betreft het meer algemene leerdoel om enig zicht te krijgen op de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus kon aangetoond worden dat de leerlingen in staat waren om enkele belangrijke elementen van deze praktijk te benoemen. De parallel met de handelingspraktijk leek echter vooral functioneel in het ontwerpproces te zijn geweest.

### **Vormelementen**

De tweede onderzoeksvraag was gericht op het functioneren van de site als geheel: *Functioneert de website met de opgenomen vormelementen in het faciliteren van het zelfstandig en op afstand uitvoeren van het experiment?*

Het onderzoek, beschreven in hoofdstuk 6, maakte duidelijk dat de website en de daarin opgenomen vormelementen goed gefunctioneerd hadden. Met name het 'Waar ben ik'-window en het vragensysteem waren functioneel voor het sturen en begeleiden van de leerlingen door het materiaal.

Het 'WaarBenIk-window' zorgde ervoor dat de leerlingen op ieder moment zicht hadden op waar ze zich in het materiaal bevonden. Bovendien verschafte het toegang tot eerder bezochte pagina's waarop ook gegeven antwoorden met ontvangen feedback te vinden waren.

Het vragensysteem zorgde er niet alleen voor dat de antwoorden die de leerlingen gaven automatisch van feedback werden voorzien (waardoor de leerlingen wisten dat ze zich nog steeds op de goede weg bevonden), maar bleek ook bij te dragen aan het plezier waarmee de leerlingen het materiaal doorliepen.

De inzet van de open vragen bleek een effectief middel om het receptmatige karakter te verminderen en de leerlingen te laten reflecteren en vooruitkijken. Waar we ons vooraf afvroegen of hiermee de leerlingen wel in voldoende mate te activeren zouden zijn, lieten de onderzoeksresultaten zien dat de leerlingen de laatste open vraag met hetzelfde enthousiasme beantwoordden als de eerste. Ze controleerden vervolgens nauwgezet en nieuwsgierig hun antwoorden.

Ook de opbouw van de schermen, waarbij eerst werd teruggeblikt naar het vorige scherm en afgesloten met een vooruitblik naar het volgende scherm werd door de leerlingen als functioneel ervaren. De webcams bleken belangrijk voor de leerlingen om zich bij de opstelling betrokken te voelen.

Bij het functioneren van de facultatieve pagina's en de animaties zijn wel enkele kanttekeningen te plaatsen. De facultatieve pagina's bleken voor de leerlingen functioneel in het onderscheiden van essentieel en facultatief materiaal en ondersteunden zo het zichtbaar houden van de inhoudelijke hoofdlijn in het materiaal, maar ze werden slechts sporadisch bezocht. Het facultatieve karakter bleek voor de meeste leerlingen een reden om het materiaal niet of nauwelijks te bekijken. Dit was geen gevolg van gebrek aan kwaliteit of diepgang van de pagina's maar paste bij de neiging van de leerlingen efficiënt te werk te gaan. Hierdoor waren zij eigenlijk alleen geïnteresseerd in materiaal dat nodig was voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag van het experiment. Slechts enkele leerlingen hadden gedurende de uitvoering van het experiment behoefte aan verdieping. De pagina's kunnen wel gehandhaafd blijven omdat ze niet storend zijn geweest bij het uitvoeren van het experiment en het niet onwaarschijnlijk is dat de behoefte aan verdieping pas op een

later moment, bijvoorbeeld tijdens het schrijven van het verslag, ontstaat. Wat betreft de animaties bleken vooral de animaties die een nieuw verschijnsel visualiseerden te worden gewaardeerd. De leerlingen ervoeren deze als functioneel omdat het bijdroeg aan de beeldvorming over het nieuwe verschijnsel. Bij animaties die bedoeld waren om de voorkennis op te roepen was dit beeld reeds aanwezig en, al gaven de leerlingen aan dat de inzet van animaties hierbij niet storend was, de voorkennis leek dan niet sneller of beter te worden opgeroepen dan zonder een animatie.

### 7.2.3 Antwoord op de globale onderzoeksvraag

De ontwikkeling van het materiaal, waarin ten eerste de inhoudelijke uitlijning en ten tweede de vormelementen een belangrijke rol speelden, heeft een product opgeleverd dat grotendeels naar behoren functioneerde. De kracht van het product was dat het voor de leerlingen een logische lijn had die ondersteund werd door de vormelementen. Het stuurde hen, aan de hand van vragen, in het ontwikkelen van de meetmethode. De vragen hielpen bij het oproepen van voorkennis, het expliciteren van de globale en de lokale motieven en het uitbreiden en toepassen van benodigde kennis. Het product stuurde de leerlingen wel, maar had geen receptmatig karakter en liet hen zelfstandig, binnen de beperkingen van de gegeven opstelling, de meetmethode ontdekken. Door op de juiste momenten de juiste vragen te stellen en de leerlingen daarbij gerichte feedback te geven werd het oproepen van de motieven voorbereid en gerealiseerd en werd voorkomen dat ze vastliepen in het materiaal. De leerlingen waardeerden deze werkwijze en gaven aan deze te prefereren boven wat ze op school gewend zijn omdat

- het, vergeleken met de experimenten die ze op school uitvoeren, minder saai was,
- ze het gevoel hadden meer te leren,
- ze meer gestructureerd en nauwkeuriger konden werken en
- ze minder vaak vastliepen.

Uit het ontwikkelingsonderzoek werd duidelijk dat het ontwikkelde product een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand heeft opgeleverd. Het bleek een succesvolle strategie om enerzijds de inhoud uit te lijnen binnen de probleemstellende benadering en daarbij gebruik te maken van de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus en anderzijds vormelementen in te zetten die de inhoudelijke uitlijning ondersteunden en het afstandskarakter compenseerden.

Terugkomend op de globale onderzoeksvraag (*Hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?*) leidde de strategie tot een product met de volgende didactische kenmerken:

- *Op een globaal niveau is er sprake van een voor de leerlingen herkenbare rode draad in het materiaal en de leerlingen weten waar ze mee bezig zijn.*

De basis voor de rode draad in het materiaal is gelegd door aandacht te besteden aan het opwekken van het globale motief en vervolgens het leerproces te sturen aan de hand van lokale motieven. Het vormelement '*Waar ben ik*'-window draagt bij aan het zichtbaar maken van de rode draad door de structuur van het materiaal te expliciteren. De leerlingen kunnen hierdoor zien wat ze al gedaan hebben en wat komen gaat, en kunnen terugbladeren naar delen van het materiaal die ze reeds afgerond hebben. De *facultatieve pagina's* spelen hierbij een indirecte rol. Extra verdiepend materiaal dat geen deel uitmaakt van de hoofdlijn wordt aangeboden op facultatieve pagina's die, door opmaak van de link en de pagina zelf, als zodanig goed herkenbaar zijn voor de leerlingen. De facultatieve pagina's faciliteren het afwijken van de rode draad doordat zij toegang bieden tot verdiepend materiaal terwijl duidelijk herkenbaar is dat het om een uitstapje ten opzichte van de rode draad gaat.

- *Inzoomend naar een meer lokaal niveau sluiten ook de losse activiteiten in het lesmateriaal goed op elkaar aan.*

De *opbouw van de schermen* draagt hieraan bij doordat op ieder scherm in de inleiding eerst wordt terug gegrepen naar wat tot dan toe is gedaan en wordt afgesloten met een vooruitwijzing naar wat komen gaat. Daarnaast zijn, op de schermen zelf, de verbindingen tussen de activiteiten geëxpliciteerd en werden de opdrachten expliciet verantwoord door bijvoorbeeld kort aan te geven wat het doel van een opdracht is.

- *Het product is zo opgezet dat de leerlingen zelfstandig en actief bezig zijn bij het doorlopen van het materiaal.*

Inhoudelijk is dit kenmerk uitgewerkt door het lesmateriaal op te bouwen aan de hand van opdrachten en de inhoudelijke knelpunten niet te vermijden maar de leerlingen te confronteren met de problemen en hen vervolgens een actieve rol te laten spelen bij het zoeken naar een oplossing. Dit actief betrekken werd concreet gemaakt door het *automatisch vragen- en feedbacksysteem*. Het vragensysteem zorgt ervoor dat de leerlingen het materiaal geheel zelfstandig kunnen doorlopen en een actieve rol in het ontwikkelen van de meetmethode spelen. Gerichte feedback waarborgt een zelfstandige voortgang en geeft de leerlingen zelfvertrouwen omdat ze daardoor weten of ze op de goede weg zijn. Door ook open vragen in te zetten waarbij leerlingen aan de hand van door het lesmateriaal gegenereerde feedback zelf hun antwoorden moeten controleren is de vrijheid in antwoordmogelijkheden vergroot zonder de zelfstandige voortgang te beperken.

Met name bij het introduceren van nieuwe begrippen zijn *animaties* ingezet zodat

de leerlingen zich hiervan makkelijker een beeld kunnen vormen. De inzet van animaties zorgt voor afwisseling van werkvormen en biedt mogelijkheden om de leerlingen actief bezig te laten zijn met het bestuderen van een verschijnsel doordat ze bijvoorbeeld parameters kunnen wijzigen en de gevolgen hiervan kunnen bekijken. De inzet van twee *webcams* zorgt ervoor dat leerlingen de opstelling vanuit verschillende hoeken kunnen bestuderen en zich zo een beeld van de opstelling kunnen vormen en tijdens het uitvoeren van de metingen de status van de opstelling kunnen controleren.

## 7.3 Reflectie op het eindproduct

Terugkijkend naar het ontwikkelde eindproduct worden eerst enkele kanttekeningen geplaatst bij de genoemde succesfactoren: de inhoudelijke uitlijning en de vormelementen. Vervolgens worden enkele suggesties voor verbeteringen aan het concrete lesmateriaal gegeven.

### 7.3.1 Kanttekeningen bij de inhoudelijke uitlijning

#### Oproepen van motieven

Het globale motief en de lokale motieven vormden ijkpunten in de didactische structuur. Het functioneren van de inhoudelijke uitlijning is direct gerelateerd aan het al dan niet opgeroepen zijn van deze motieven. Aangezien het al dan niet opgeroepen zijn van de lokale motieven dus blijkbaar een belangrijke rol speelt wordt nogmaals teruggekeken op wat hier in het onderzoek onder werd verstaan. Idealiter zouden de lokale motieven in de probleemstellende benadering de leerlingen ertoe moeten brengen om voor hen zinvolle vragen te stellen die richting geven aan de te ontwikkelen kennis en vaardigheden. In het concrete product van het lichtsnelheidsexperiment moest echter genoeg worden genomen met een beperkte uitwerking van de probleemstellende benadering waarbij de leerlingen niet zelf de vragen stellen, maar wel de vragen die in het materiaal gesteld worden *waarderen* (Lijnse, 2002, p67):

*“Kunnen we leerlingen er toe brengen vragen te stellen, of in ieder geval te waarderen, die, aan de ene kant zinvol zijn vanuit hun perspectief, en, aan de andere kant, voor hun beantwoording juist vragen om de ontwikkeling van de (mogelijk aangepaste) te onderwijzen nieuwe ideeën en concepten.”*

In de praktijk betekende dit dat er naar gestreefd werd de leerlingen op zijn minst in te laten zien dat er problemen lagen en dat het noodzakelijk was deze op te lossen

om tot een werkende meetmethode te komen. De afwezigheid van de docent en de beperkte interactiemogelijkheden stonden immers niet toe de deelvragen (lees: de op te wekken lokale motieven) door de leerlingen zelf te laten formuleren en de deelvragen werden daarom door het materiaal zelf gegeven.

In het onderzoek werd geconstateerd dat de leerlingen, zowel gedurende de uitvoering als ook na afloop van het gehele experiment, in staat waren de problemen die ze tegen kwamen te benoemen en toe te lichten. De in de didactische structuur uitgewerkte inhoudelijke lijn had blijkbaar bij de leerlingen aannemelijk gemaakt dat een bepaalde deelvraag op dat moment een relevante vraag was die eerst beantwoord moest worden voordat ze verder konden. De leerlingen konden vervolgens verwoorden waarom de (weliswaar aangereikte) aanpassing van de meetmethode dit probleem oploste. Er kon dus, op grond van de gekozen uitwerking van de probleemstellende benadering, geconcludeerd worden dat er sprake was van opgeroepen lokale motieven wat resulteerde in de gewenste situatie dat de leerlingen wisten waar ze inhoudelijk mee bezig waren en dat ze het leerproces als zinvol en coherent ervoeren.

### Fasering

Bij het opstellen van de didactische structuur (zoals beschreven in 3.4.5) zijn ten aanzien van de invulling van de fasen enkele keuzen gemaakt die, achteraf gezien, voor twee problemen in het leerproces hebben gezorgd.

Het eerste probleem heeft betrekking op de invulling van fase 4 (Proceduretoepassing) in het onderwijsleerproces. In hoofdstuk 3 (in 3.4.5) is aangegeven dat ervoor is gekozen om in fase 4 de meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media uit te werken als een toepassing van de in fase 2 en 3 ontwikkelde en geëvalueerde meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid in lucht. Het onderzoek liet zien dat de leerlingen in dit deel van het materiaal de neiging vertoonden deze meetmethode rechtstreeks te willen inzetten voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media en zich in eerste instantie weinig bewust leken van de noodzaak tot het eerst nog verder aanpassen van de methode.

Achteraf lijkt de verwarring bij de leerlingen een gevolg van het feit dat de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media niet zomaar een toepassing maar meer een uitbreiding van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht is.

Het tweede probleem is een gevolg van het beschreven probleem met fase 4. Voorafgaand aan het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht werd in het lesmateriaal fase 5/6 (Reflectie<sup>1</sup> en Metacognitie<sup>2</sup>)

---

1 Fase 5: in het licht van het globale motief creëren van een behoefte aan reflectie op het kunnen hanteren van de betreffende vaardigheid

2 Fase 6: het ontwikkelen van een (mogelijk nog gecontextualiseerd) metacognitief instrument voor het op een hoger niveau kunnen uitvoeren van de vaardigheid

uitgewerkt (scherm 14) door te reflecteren op: (a) de ontwikkelde meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht en (b) de verbinding tussen het eigen werk en dat van de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus.

De verwachting was dat (a) de leerlingen een gecontextualiseerd metacognitief instrument zou leveren dat hen in staat zou stellen de lichtsnelheid ook in andere media te bepalen, en dat (b) ervoor zou zorgen dat zij elementen uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus ook bij het maken van bijvoorbeeld een profielwerkstuk zouden kunnen inzetten.

Het terugkijken naar de ontwikkelde meetmethode met het oog op de toepassing daarvan in een vergelijkbare situatie was voor hen functioneel – al ging het daarbij, zoals eerder gezegd, om meer dan alleen maar toepassen. De leerlingen waren echter, achteraf gezien, in dit stadium van het experiment – direct na het ontwikkelen van de (inhoudelijk complexe) meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht en met het concrete vooruitzicht van het moeten gebruiken (of eigenlijk: aanpassen) van deze methode voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media – nog niet toe aan het op een metacognitief niveau terugkijken naar wat ze gedaan hadden. Dit tweede deel van fase 5/6, gericht op het ontwikkelen van een, zij het nog onvolledig, gedecontextualiseerd metacognitief instrument voor het (beter) uitvoeren van een ander, later experimenteel onderzoek in het kader van bijvoorbeeld het profielwerkstuk heeft dan ook waarschijnlijk niet aan zijn functie voldaan.

In 7.5 zal bij een poging tot generalisatie van de ontwikkelde didactische structuur een alternatieve fase-invulling worden voorgesteld die beide gesignaleerde problemen zou moeten oplossen.

### **Handelingspraktijk experimenteel fysicus**

In het lesmateriaal speelde de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus een belangrijke bijrol. De inzet van de handelingspraktijk binnen het lesmateriaal sloot aan bij de uit de eerste cyclus ontstane behoefte om het experiment te verbreden tot meer dan slechts het meten van de lichtsnelheid. Bovendien was de verwachting dat de handelingspraktijk richting zou kunnen geven aan het ontwerpproces.

De resultaten in hoofdstuk 5 maakten duidelijk dat de inzet van de handelingspraktijk vooral voor de ontwerper functioneel is geweest. Het inspireerde de ontwerper tijdens het ontwerpproces en bood houvast bij het uitlijnen van het materiaal en het formuleren van de deelvragen. Het droeg bij aan het structureren van het lesmateriaal en het vormgeven van een heldere en zichtbare lijn in het materiaal.

De meest waarschijnlijke verklaring voor de beperkt aantoonbare leeropbrengst ten aanzien de handelingspraktijk voor de leerlingen was de wijze waarop deze ingebed was in het lesmateriaal. De hoofdlijn van het materiaal was het ontwikkelen van de meetmethode om de lichtsnelheid te meten en de handelingspraktijk van de



experimenteel fysicus werd hierbij als een, weliswaar steeds terugkomend, zijspoor gepresenteerd waardoor het voor de leerlingen een vrijblijvend karakter had. Bovendien kon, in de huidige opzet, van de leerlingen niet veel meer verwacht worden dan dat zij de informatie over de handelingspraktijk voor kennisgeving aannamen.

Toch was in andere onderzoeken die gebruik maakten van handelingspraktijken wel sprake van een directe functionele rol van de handelingspraktijk voor leerlingen (Westbroek, 2005; Prins *et al.* 2008). Westbroek constateert bijvoorbeeld dat de leerlingen gemotiveerd werden door het doel van de authentieke praktijk waardoor ze beter de doelen van de opeenvolgende activiteiten inzagen. De wijze waarop de handelingspraktijk is ingezet bij het lichtsnelheidsexperiment verschilt op twee fundamentele aspecten van deze andere onderzoeken.

Een eerste verschil is dat er bij het lichtsnelheidsexperiment vooraf geen onderzoek is gedaan naar de karakteristieke kenmerken van de handelingspraktijk. Dit was geen ontwerpkeuze maar een gevolg van de ontstaansgeschiedenis van het experiment.

Prins *et al.* (2008) bijvoorbeeld, gingen op zoek naar een specialistische handelingspraktijk en deden een inventariserend onderzoek naar de mogelijke geschiktheid en kenmerken van verschillende praktijken. Bij het lichtsnelheidsexperiment werd gebruik gemaakt van reeds beschikbare en bestaande kennis ten aanzien van de veel algemenere praktijk van de experimentele fysica (bijvoorbeeld in Squires, 2001; Baird, 1998; Berendsen, 1999).

Een tweede verschil dat hierop aansluit is dat in het lichtsnelheidsexperiment geen aandacht wordt besteed aan het oproepen van de intuïtieve ideeën van de leerlingen ten aanzien van de handelingspraktijk. Westbroek noemt als voorwaarde voor het gebruik van een handelingspraktijk dat de leerlingen een karakteristieke procedure uit de handelingspraktijk intuïtief moeten kennen. Zij gebruikt vervolgens deze intuïtieve kennis om inhoudelijke motieven op te roepen bij de leerlingen. Zij zet deze karakteristieke procedure in om *“de relatie tussen context en need-to-know te versterken en om de procedure als vanzelf te integreren in het onderwijsleerproces”* (p315).

Bij het lichtsnelheidsexperiment maakten echter het ontbreken van de docent en de beperkte interactiemogelijkheden het lastig om zinvol te kunnen reageren op deze intuïtieve ideeën (voor zover die al aanwezig zijn). Bovendien wordt de praktijk op een meer algemeen, metacognitief niveau beschreven. De karakteristieke procedure van de authentieke praktijk wordt alleen gebruikt om de stappen van de globale procedure aan te geven. De door de handelingspraktijk opgeroepen motieven geven aan dat er iets moet gebeuren (inzet van theorie, manipuleren van een signaal, elimineren van een systematische fout), maar geven geen aanwijzing in welke richting de oplossing gezocht moet worden.

De voorwaarde van Westbroek om aan te sluiten bij intuïtieve ideeën van de

leerlingen beperkt overigens wel de mogelijk inzetbare handelingspraktijken tot praktijken waar leerlingen reeds (deels) bekend mee zijn. De voorwaarde zou dan ook slechts van toepassing moeten zijn op materiaal waar de handelingspraktijk een duidelijk dragende en sturende rol moet gaan vervullen. Het doel van de inzet van de handelingspraktijk zou immers ook kunnen zijn om de leerlingen bekend te maken met een tot dan toe voor hen onbekende praktijk en dan kan geen sprake zijn van intuïtieve bekendheid.

In werkelijkheid is de handelingspraktijk natuurlijk veel ingewikkelder, minder gestructureerd en veelomvattender dan in de beschrijving aan de leerlingen wordt voorgesteld. Om de handelingspraktijk binnen een experiment hanteerbaar te maken moet deze afgebakend worden en moet een focus gekozen worden. Het is dan ook niet bezwaarlijk dat er alleen een beknopte indruk van het instrumentarium van de experimenteel fysisch gegeven is, maar dit had wel uitdrukkelijker naar de leerlingen toe genoemd moeten worden.

### **7.3.2 Kanttekeningen bij de vormelementen**

Zoals al toegelicht werd geconstateerd dat de vormelementen goed functioneerden in het ondersteunen van de inhoudelijke uitlijning en het compenseren voor het afstandskarakter. Wanneer gedetailleerder naar de onderzoeksresultaten wordt gekeken is nog wel verdere verbetering mogelijk. Op concreet niveau bleken nog niet alle animaties optimaal te functioneren. Op enkele plaatsen in het materiaal bleken de animaties overbodig te zijn omdat ze nauwelijks meerwaarde hadden. Aangezien de leerlingen de aanwezigheid van deze animaties niet als storend ervoeren lijkt er echter vooral nog geen noodzaak ze te verwijderen. De animatie over de systematische fout zou wel verbeterd moeten worden omdat deze bij enkele leerlingen voor verwarring zorgde. Blijkbaar was in de ontwerpfase niet helder genoeg in kaart gebracht hoe de leerlingen de animatie zouden beleven en interpreteren. De animatie zou verbeterd moeten worden zodat deze beter aansluit bij de voorkennis van de leerlingen.

Een meer structurele tekortkoming van een vormelement heeft betrekking op feedback op de open vragen. De open vragen bleken in deel 2 van het materiaal een goed functionerend en effectief middel om een receptmatig karakter te voorkomen en de openheid te vergroten. In deel 3 werden echter ook de beperkingen van dit element duidelijk. In dit deel werden de leerlingen die een juiste meetmethode konden formuleren niet door feedback bevestigd en namen in de uiteindelijke uitvoering geheel de in het lesmateriaal voorgestelde methode over. Een oplossing voor deze tekortkoming vraagt allereerst om een uitvoering van het experiment door meer leerlingen zodat er een duidelijker beeld ontstaat van mogelijke leerlingantwoorden

waarop in de feedback geanticipeerd kan worden, maar daarnaast zouden ook de grenzen en mogelijkheden van de open vragen nog verder onderzocht moeten worden. In 7.5 zal hier dieper op in worden gegaan.

### 7.3.3 Aanpassingen aan het lesmateriaal

De inhoudelijke knelpunten die in de eerste cyclus aan het licht kwamen, waren in het materiaal van de tweede cyclus vrijwel opgelost. Wel kwamen uit de tweede cyclus enkele nieuwe problemen naar voren.

Een concreet verbeterpunt ten aanzien van het lesmateriaal over de lichtsnelheid in lucht heeft betrekking op de systematische fout:

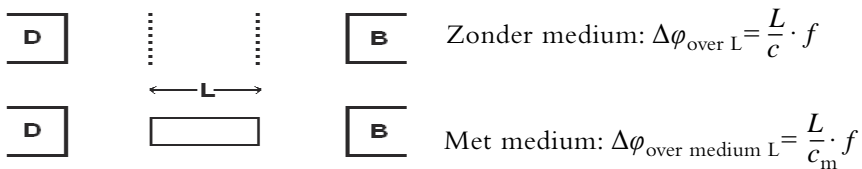
- In het huidige materiaal wordt de systematische fout te simplistisch voorgesteld. Deze wordt namelijk niet, zoals in het lesmateriaal wordt beweerd, alleen veroorzaakt door het verschil in kabellengte tussen de verbinding van bron met computer en detector met computer, maar ook doordat er gemeten wordt ten opzichte van een referentiesignaal. Vanuit de verwachting dat deze informatie het verhaal nodeloos ingewikkeld zou maken en het voor de lijn van het verhaal niet noodzakelijk was dat leerlingen dit ook inzagen, was dit in de huidige versie niet verwerkt. De reacties van enkele (met name de meest begaafde) leerlingen maken echter duidelijk dat zij de oorzaak van de systematische fout als een wat frustrerende en eenvoudig op te lossen eigenaardigheid van de opstelling zagen (in 5.3.4). Dit zou voorkomen kunnen worden door in het lesmateriaal kort de aard van de systematische fout te benoemen en hieraan een facultatieve pagina te koppelen met een uitgebreide toelichting voor geïnteresseerde leerlingen.

De geconstateerde problemen van de leerlingen met het derde deel van het materiaal zijn deels een gevolg van de vooraf gemaakte keuze de leerlingen in dit deel minder te sturen om het materiaal ook voor de meest begaafde leerlingen uitdagend te maken. Uit het onderzoek bleek echter dat ook de begaafde leerlingen door de huidige uitwerking onnodig op het verkeerde been worden gezet. Dit zou opgelost kunnen worden met enkele aanpassingen aan de inhoud zonder de intellectuele uitdaging te verminderen:

- In de huidige versie van het materiaal ontvangen de leerlingen geen feedback op de door hen voorgestelde meetmethode. Ze worden voor de keuze gesteld om ofwel direct met hun eigen methode aan de slag te gaan, ofwel te kiezen voor het begeleid, aan de hand van enkele vragen, ontwikkelen van de meetmethode. Het zou waarschijnlijk goed zijn deze werkwijze iets aan te passen en de leerlingen niet alleen voor de keuze te stellen, maar ook kort de kern van de meetmethode te beschrijven. Hierdoor zullen de leerlingen die in staat zijn een

juiste meetmethode te formuleren wellicht de bevestiging krijgen dat ze op de juiste weg zijn en direct met hun eigen methode aan de slag kunnen gaan. Uit de beschrijving van de kern van de meetmethode zou ook duidelijk worden dat er meerdere oplossingsrichtingen mogelijk zijn waarvan er, bij het begeleid ontwikkelen, slechts één uitgewerkt wordt.

- De vragen die de leerlingen moesten helpen bij het afleiden van de relatie voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media zouden aangepast moeten worden. In de huidige opzet hadden de leerlingen moeite een relatie af te leiden voor het extra faseverschil dat gemeten wordt bij het tussenplaatsen van een medium ten opzichte van de situatie zonder medium. In de huidige situatie beschouwen de leerlingen de gehele afstand tussen bron en detector. Ze werden gevraagd drie relaties te geven (voor faseverschil zonder medium, faseverschil met medium ertussen en het extra faseverschil als gevolg van het medium (verschil tussen de twee voorgaande relaties)), maar niet alle leerlingen leken te beseffen hoe deze drie relaties met elkaar verband houden. Mogelijk zou het duidelijker zijn de leerlingen alleen te laten kijken naar het stuk tussen bron en detector waar het medium wordt geplaatst, omdat er over de rest van de afstand tussen bron en detector niets verandert. Er hoeft dan alleen een relatie te worden afgeleid voor het faseverschil over de afstand  $L$  (respectievelijk zonder en met medium).



Het extra faseverschil is dan direct te schrijven als:

$$\Delta\varphi_{\text{extra}} = \Delta\varphi_{\text{over medium } L} - \Delta\varphi_{\text{over } L} = \left( \frac{L}{c_m} - \frac{L}{c} \right) \cdot f_{\text{mod}}$$

- De leerlingen zijn geneigd om, voor het bepalen van de lichtsnelheid in andere media, het faseverschil opnieuw, zoals dat ook voor lucht moest, bij verschillende afstanden te meten. Dit is echter, gezien de aangepaste meetmethode, niet nodig, terwijl het wel zorgt voor onnodig lange en saaie metingen. Bovendien veroorzaakt het verwarring omdat de richtingscoëfficiënten van de gemeten relaties, weliswaar binnen de toevallige fout, afwijken voor de verschillende media. De leerlingen zijn echter niet gewend de meetfout te betrekken in het doorrekenen en vergelijken van gevonden waarden. Beide problemen zouden eenvoudig voorkomen kunnen worden door de leerlingen in een eerder stadium attent maken op het niet opnieuw hoeven variëren van de afstand tussen bron en detector.
- Los van de overbodige metingen zou de meettijd ook teruggebracht kunnen worden door de meethandelingen in een efficiënte volgorde uit te voeren.

Het verplaatsen van de media kost meer tijd dan het veranderen van de afstand tussen bron en detector. Bovendien zijn de leerlingen geneigd om bij de metingen steeds de bron eerst in de uitgangspositie te willen plaatsen en vervolgens de afstand tussen de bron de detector te verkleinen. Het steeds moeten terugplaatsen van de bron in de uitgangspositie was echter een onnodige en tijdrovende actie, want ze hadden immers ook de metingen kunnen starten vanaf de positie waarin de bron zich op dat moment bevond en achtereenvolgens de afstand tussen bron en detector kunnen vergroten. De leerlingen zouden van dit soort eigenschappen van de opstelling bewust gemaakt moeten worden door hen expliciet naar een efficiënte meetvolgorde te vragen of zelfs, aan de hand van enkele opdrachten, bij de start van het experiment te sturen bij het verkennen van de opstelling. Deze verkennende metingen zouden de leerlingen een idee kunnen geven van de insteltijden van de opstelling. Door hen te laten ervaren wat de snelheid is waarmee de bron en media zich verplaatsen zouden zij de beste volgorde van de meethandelingen kunnen vaststellen.

Verder zou het goed zijn om, zoals in de conclusie van hoofdstuk 5 genoemd, voor een verdere verfijning en afwerking van het lesmateriaal ook aandacht aan toevallige fouten te besteden. In hoofdstuk 1 werd al toegelicht dat het valide en betrouwbaar uitvoeren van een onderzoek vaak onderbelicht blijft (Smits, 2003). De werkwijze voor het elimineren van de systematische fout bij het lichtsnelheidexperiment biedt aanleiding ook kort in te gaan op toevallige fouten. Aansluitend bij de toelichting op de werkwijze voor het elimineren van de systematische fout zou ook duidelijk gemaakt kunnen worden hoe met toevallige fouten omgegaan moet worden. De leerlingen zouden zo kunnen beseffen dat rekening houden met deze fouten een voorwaarde voor betrouwbaar onderzoek is.

## **7.4 Reflectie op de onderzoeksmethode**

### **7.4.1 Onderzoekssetting**

#### **Eerste cyclus**

Het onderzoek in de eerste cyclus aan de producten 1 en 2 werd in verschillende settings uitgevoerd. Het werd op grond van pragmatische keuzen opgezet door gebruik te maken van bestaande situaties die geschikt waren om docenten en leerlingen in contact te brengen met het lichtsnelheidexperiment. Gevolg hiervan was dat de onderzoeksparameters als de beschikbare tijd, de hoeveelheid leerlingen en docenten en de omgeving waarin het experiment moest worden uitgevoerd vastlagen en door

de situatie bepaald werden.

Het onderzoek aan product 1 had een verkennend en inventariserend karakter. Het doel was een algemeen idee te krijgen van wat er komt kijken bij het ontwikkelen van een experiment op afstand en zicht te krijgen op de mogelijkheden en problemen en was in eerste instantie vooral gericht op de vraag of het experiment technisch goed werkte. De pragmatische keuze voor de onderzoeksetting werd in hoofdstuk 2 verantwoord vanwege het verkennende karakter van het onderzoek. Terugkijkend kan geconcludeerd worden dat de onderzoeksresultaten inderdaad globaal een voldoende beeld van het (technisch) functioneren van product 1 gaven.

Er werd duidelijk dat het product technisch gezien al naar behoren functioneerde, maar dat er inhoudelijk nog veel verbeterd moest worden. Wanneer het onderzoek met meer leerlingen of meer docenten in een meer gecontroleerde omgeving zou zijn uitgevoerd zou dit hooguit tot een meer precieze omschrijving van de specifieke inhoudelijke knelpunten en problemen met de opzet en werkwijze van product 1 hebben geleid. Zulke gedetailleerde informatie zou echter niet zinvol zijn geweest. Product 1 was namelijk niet van een zodanige kwaliteit dat het geschikt was om verfijnd te worden tot een uiteindelijke versie. Eerst zouden namelijk de eisen en wensen aan inhoud, opzet en werkwijze verder in kaart gebracht moeten worden. Er werd (wederom op pragmatische gronden) voor gekozen om dit te doen door product 2 in te zetten.

Ook in het geval van product 2 kan geconcludeerd worden dat een uitgebreider onderzoek met dit product niet tot meer relevante resultaten zou hebben geleid. De resultaten lieten namelijk toe te concluderen dat gewerkt zou moeten worden aan een nieuw, meer didactisch verantwoord ontwerp en gaven voorlopig voldoende zicht op de richting waarin oplossingen voor de problemen met inhoud en werkwijze gezocht moesten worden.

### **Tweede cyclus**

In hoofdstuk 4 werd verantwoord waarom ervoor gekozen werd alle leerlingen het experiment op de universiteit (betaald) uit te laten voeren. Bij het observeren van de leerlingen bleek de onderzoeksomgeving wel enige invloed te hebben op de beleving van de leerlingen. Ze leken zich een beetje trots te voelen bij te kunnen dragen aan een onderzoek van de universiteit en vonden het spannend om op de universiteit te zijn en tussen de studenten in de kantine te eten. Toch zijn er geen aanwijzingen dat dit de onderzoeksdata heeft beïnvloed. Uit de observaties en de belevingsenquête werd zelfs duidelijk dat de meerderheid van de leerlingen het experiment zelf (ook) waardeerde. Ze gaven hiervoor diverse redenen: ze vonden het leuk de metingen te doen, de opstelling via de camera te bekijken en het experiment uit te voeren zonder bij de opstelling aanwezig te zijn. Ook waardeerden ze het werken met het

vragensysteem, het feit dat het experiment dieper ging dan wat op school mogelijk is en dat hun antwoord zo dicht bij de literatuurwaarde lag.

Het in koppels werken gaf zicht op de gedachtegang van de leerlingen gedurende de uitvoering omdat zij veelal hardop overleg pleegden voorafgaand aan het beantwoorden van een opdracht en het proberen te begrijpen van de feedback op de onjuiste antwoorden. Bij alle koppels leek sprake van een gelijkwaardige samenwerking en bovendien leek het overleggen en gezamenlijk uitvoeren van het experiment bij te dragen aan hun waardering voor het experiment.

Terugkijkend lijkt het aantal van tien koppels voldoende te zijn geweest om de relevante onderzoeksdata te verzamelen. Bij 'lichtsnelheid in lucht' verschilden de ervaringen tussen de verschillende koppels zo weinig en waren de onjuiste antwoorden zo gelijkmatig verspreid over alle koppels dat zelfs met minder koppels had kunnen worden volstaan.

De meeste problemen werden geconstateerd bij deel drie. Vooraf was al verwacht en zelfs beoogd dat niet alle leerlingen deel 3 zonder probleem zouden kunnen doorlopen. Het onderzoek liet zien dat inderdaad slechts een minderheid van de leerlingen hiertoe in staat bleek. Waar bij deel 2 met minder dan tien koppels had kunnen worden volstaan, bleken bij deel 3 de tien koppels wel nodig om de moeilijkheden van de leerlingen in kaart te kunnen brengen. De resultaten gaven geen aanleiding om aan te nemen dat tien koppels te weinig was. De problemen werden meestal geconstateerd bij meer dan één koppel en lijken een goede afspiegeling te zijn van wat de leerlingen als lastig ervoeren.

### 7.4.2 Onderzoeksinstrumenten

#### Eerste cyclus

De onderzoeksinstrumenten die in de eerste cyclus werden ingezet weerspiegelen het inventariserende karakter van de cyclus. Er werd gekozen voor instrumenten waarmee op een open wijze de onderzoeksdata konden worden verzameld. Het doel van de cyclus was immers om vooral een globaal beeld te vormen van het functioneren van het experiment. De instrumenten moesten vooral knelpunten signaleren en aanwijzingen voor verbeteringen aan het licht brengen, want in het stadium waarin het onderzoek zich op dat moment bevond was het nog niet nodig om de problemen tot in detail uit te werken.

De ingezette instrumenten bleken goed aan de verwachtingen te voldoen. De open discussies met docenten en didactische experts gaven voldoende aanleiding om een globale indruk van de mogelijkheden en problemen van product 1 te krijgen. Ook de inzet van de leerling-vragenlijst bij het evalueren van product 1 bleek een efficiënt middel om met beperkte inspanning toch een globale indruk van het functioneren

met product 1 te krijgen. Voor het onderzoek aan product 2 bleek het na afloop interviewen van de leerlingen een geschikt instrument om zicht te krijgen op de eisen aan de inhoud en werkwijze.

### **Tweede cyclus**

In hoofdstuk 4 werden de ingezette onderzoeksinstrumenten beschreven en verantwoord. Vooraf was niet geheel te voorspellen hoe de leerprocessen zouden verlopen en welke informatie de verschillende instrumenten hierover zouden opleveren. Door met verschillende instrumenten de leerprocessen in kaart te brengen werd gewaarborgd dat eventuele onduidelijke waarnemingen of schijnbare tegenspraak wanneer nodig verhelderd zouden kunnen worden.

Achteraf bleek het niet nodig alle instrumenten even intensief te gebruiken bij het verwerken van de onderzoeksgegevens. De inhoudelijke vragen op de site en de vragen tijdens de onderbrekingen waren de belangrijkste databronnen voor het nagaan van het inhoudelijk functioneren van het materiaal.

De interviews en de belevingsenquête leverden de meest bruikbare data over het functioneren van de vormelementen. Echter, de toon van de antwoorden van de leerlingen in de interviews verschilde niet van die in de belevingsenquête, waardoor de noodzaak tot een individueel ingevulde belevingsenquête komt te vervallen. De vragen die nu in de belevingsenquête aan de orde komen zouden ook in het interview geïntegreerd kunnen worden.

De verslagen waren nuttig om een aantal inhoudelijke problemen wat verder te verkennen. Ook kon worden nagegaan of de onderwerpen die leerlingen tijdens of direct na uitvoering lastig onder woorden konden brengen, in het verslag wel goed waren verwoord. De observaties konden wanneer nodig gebruikt worden om beter zicht te krijgen op waar voor leerlingen de kern van de verwarring lag.

Een risico van de inzet van de onderbrekingen als onderzoeksinstrument was dat deze het leerproces van de leerlingen zouden kunnen beïnvloeden. Mogelijk zou het, gedurende de uitvoering vragen waar ze mee bezig waren, ervoor kunnen zorgen dat de leerlingen zich hier meer bewust van werden dan wanneer er niet naar gevraagd zou zijn. Er is daarom bewust niet doorgevraagd op de antwoorden die de leerlingen gaven om te voorkomen dat het onderbreken wel van invloed zou zijn.

Een alternatieve onderzoeksmethode zou kunnen zijn het onderzoek met een controlegroep, die niet onderbroken wordt, te herhalen, maar dat zou weer voor nieuwe problemen zorgen. Het zal dan namelijk lastig zijn om van deze groep leerlingen duidelijk te krijgen of ze weten waar ze op dat moment mee bezig zijn en waarom. Deze leerlingen zullen dan immers in het interview achteraf moeten gaan reconstrueren, wat tot onbetrouwbare data kan leiden.



### 7.4.3 Ontwikkelproces

#### Eerste cyclus

De invulling van de twee cycli is sterk beïnvloed door de situatie waarin het onderzoek begonnen is. Het onderzoek startte bij de werkgroep Fysische Informatica vanuit een nieuwsgierigheid naar vooral de technische mogelijkheden, zoals toegelicht in het eerste hoofdstuk. Er was nauwelijks literatuur over het opzetten van een experiment op afstand waarin ook aandacht voor de didactiek was. Om zicht te krijgen op zowel de technische als de inhoudelijke mogelijkheden en problemen werd een eerste intuïtief ontwerp uitgewerkt en had het onderzoek een verkennend karakter.

Bij aanvang van het onderzoek was, door het ontbreken van literatuur en ervaring, nog niet duidelijk in welke richting het onderzoek zich zou moeten ontwikkelen en de eerste cyclus is nodig geweest om helder te krijgen dat de inhoudelijke en didactische invulling meer aandacht verdiende dan de technische opzet. De opbrengst van deze cyclus was weliswaar globaal, maar desalniettemin bepalend en richtinggevend voor de rest van het onderzoek. De ervaringen in de eerste cyclus gaven namelijk zicht op welke keuzes er ten aanzien van de inhoud gemaakt moesten worden en wat de inhoudelijke knelpunten waren. Bovendien brachten ze problemen met de opzet en werkwijze aan het licht.

Het werd duidelijk dat gestreefd zou moeten worden naar materiaal waarbij de leerlingen zelf een actieve rol spelen bij de voorbereiding op het experimentele werk. Juist vanwege de voorwaarde dat het experiment zelfstandig uit te voeren moest zijn, was het voorkómen van inhoudelijke knelpunten en het zorgen voor een duidelijk herkenbare rode draad extra belangrijk.

Terugkijkend lijkt de keuze van de probleemstellende benadering voor de hand te liggen, maar ten tijde van de afronding van de eerste cyclus waren de ideeën hierover als richtinggevend instrument in een ontwikkelproces nog niet zo gearticuleerd. Toch was na afloop van de eerste cyclus hiermee al wel zoveel ervaring dat de probleemstellende benadering een oplossingsrichting leek te bieden voor het ontwerpen van een onderwijsleerproces waarin de leerlingen steeds inhoudelijk zicht hebben op hun leerproces.

#### Tweede cyclus

Het in de tweede cyclus voorafgaand aan het werkelijk schrijven van het lesmateriaal eerst uitwerken van de didactische structuur, liet zien hoe de inzet van de probleemstellende benadering en de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus richting gaven aan het ontwerpproces. Het eerst identificeren van het globale motief en vervolgens van de lokale motieven en daarnaast de inzet van de handelingspraktijk bleken een effectieve werkwijze voor het aanbrengen en expliciteren van een logische

inhoudelijke lijn in het materiaal.

De probleemstellende benadering was nog niet eerder ingezet voor lesmateriaal dat zelfstandig, zonder aanwezigheid van een docent, te bestuderen moest zijn. In ander ontwikkelingsonderzoek speelde de docent juist een belangrijke rol bij het verbinden van de activiteiten, het inspringen bij inhoudelijke knelpunten en het ervoor zorgen dat de leerlingen steeds wisten waar ze mee bezig waren. Om te compenseren voor het ontbreken van deze rol moest in het ontwerpproces van het lichtsnelheidsexperiment ook veel tijd besteed worden aan het ontwikkelen van vormelementen.

Door de ervaringen van het lichtsnelheidsexperiment is beter zicht verkregen op de manier waarop het concrete ontwerpproces moet verlopen en wat hierbij de kernelementen in de drie ontwikkelfasen (reflectie, ontwikkeling en test) zijn:

#### *Reflectie*

- Voorafgaand aan het schrijven van het lesmateriaal werd een *didactische structuur* (zowel in grafische representatie als in uitgeschreven vorm) opgesteld (beschreven in 3.4). Eerst werd het *leerdoel* geformuleerd en werden het *globale motief* en de *lokale motieven* geïdentificeerd en de benodigde voorkennis in kaart gebracht. Daarmee werd de logische lijn herkenbaar voor de leerlingen
- In het ontwerpproces werd de *handelingspraktijk* van een experimenteel fysicus gebruikt als inspiratiebron voor het uitlijnen van het materiaal.
- De uitlijning van de inhoud gebeurde aan de hand van de in hoofdstuk 3 beschreven *fasering* van het onderwijsleerproces (Kortland, 2001; Lijnse & Klaassen, 2004). In de fasering werd de functie van een bepaald deel van de didactische structuur gedefinieerd. Ook dit bood houvast bij het opstellen van een vloeiend leerproces.

#### *Ontwikkeling*

- Er werd niet alleen een didactische structuur ontwikkeld, maar, in wisselwerking met het lesmateriaal, ook een *scenario*. Het scenario gaf een gedetailleerde beschrijving en verantwoording van en de verwachtingen bij de opeenvolgende activiteiten en vormde zo een brug tussen de didactische structuur en de uitwerking daarvan in lesmateriaal.

#### *Test*

- In het scenario werd per opdracht beschreven wat het *doel* en de *verwachting* bij een betreffende opdracht is. Dit bood in de onderzoeksfase houvast bij het nagaan van het functioneren van het materiaal.
- Om na te gaan of de leerlingen wisten waar ze mee bezig waren werden de

leerlingen *gedurende de uitvoering ondervraagd*. Deze onderbrekingen, samen met hun antwoorden op de inhoudelijke vragen in het materiaal, leverden bruikbare onderzoeksdata om zicht te krijgen op het doorlopen leerproces.

Gebruik makend van de ervaringen van het lichtsnelheidexperiment zal het ontwikkelproces van een nieuw experiment meer gestroomlijnd kunnen verlopen. Bij de start van de ontwikkeling van een nieuw experiment kan nu immers direct in de eerste cyclus gestart worden met het ontwerpen van het onderwijsleerproces binnen het raamwerk van de probleemstellende benadering. Daarnaast kan, wederom leunend op de ervaringen van het lichtsnelheidexperiment, ook wat betreft de opzet en werkwijze van het materiaal gebruik worden gemaakt van de al bij het lichtsnelheidexperiment uitgewerkte vormelementen.

In 7.5 zal geprobeerd worden om de ontwikkelde didactische structuur van het lichtsnelheid experiment te generaliseren zodat deze mogelijk als startpunt kan fungeren bij het ontwikkelen van nieuwe experimenten op afstand.

## 7.5 Toekomst

### 7.5.1 Recente ontwikkelingen

In Hoofdstuk 1 is besproken dat ten tijde van de start van het onderzoek nauwelijks literatuur beschikbaar was waarin de didactische aspecten van het opzetten van een experiment op afstand belicht werden. Nu het onderzoek aan het lichtsnelheidexperiment is afgerond, komt, om de resultaten in een groter kader te kunnen plaatsen, opnieuw de vraag op wat nu dan over de didactische aspecten in de literatuur te vinden is.

In de huidige stand van zaken is experimenteren op afstand een geaccepteerde onderwijsvorm. Publicaties op dit gebied geven vooral beschrijvingen van ontwikkelde producten. De producten zijn meestal opgezet om een experimentele opstelling beschikbaar te maken en te houden. De schaalgrootte waarop de ontwikkelingen van de producten plaatsvindt verschilt.

Eenzijds worden er nog steeds artikelen gepubliceerd over kleinschalige geïsoleerde initiatieven die zich beperken tot beschrijvingen van de theoretische achtergronden van het experiment en mogelijkheden van de opstelling (bijvoorbeeld: Santos *et al.*, 2006; Dobrogowski *et al.*, 2007; Jeschke *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2005; Schauer *et al.*, 2008). Daarnaast lijkt er meer sprake van samenwerkingsverbanden die streven naar het vergroten van de beschikbaarheid en toegangs- en integratiemogelijkheden van experimenten op afstand.

Lopende voorbeelden van zulke opschalingsprojecten zijn RCL<sup>3</sup> en Faulkes telescopes project:

- RCL staat voor ‘Remotely Controlled Laboratories’. Het project is geïnitieerd vanuit de Eberhard von Kuenheim stichting en wordt gefinancierd door de stichting, het bedrijfsleven en de universiteit van Kaiserslautern. Het doel van RCL is het vergroten van de beschikbaarheid van experimentele opstellingen door deze op afstand bestuurbaar te maken. Het geeft toegang tot zeventien op afstand bestuurbare experimenten en is opgezet vanuit de behoefte leerlingen te enthousiasmeren voor natuurkunde: ‘*Remote\_lab therefore opens the doors to the laboratory: this is where science is most fascinating, here is where light and pressure, mass and energy show their true power. Enjoyably and directly*’. Op de RCL-site worden de experimenten onderverdeeld in twee categorieën: experimenten die aanzetten tot spelen en nieuwsgierig maken (bijvoorbeeld de experimenten ‘Robot in een doolhof’, waarbij een robot door een doolhof moet worden verplaatst en ‘hete draad’) en een tweede categorie van experimenten die bruikbaar zijn binnen het voortgezet of hoger onderwijs (bijvoorbeeld de proef van Millikan en ‘buiging en interferentie van licht’ en ‘lichtsnelheid’, waarmee de lichtsnelheid wel bepaald kan worden door de afgelegde afstand en daarvoor benodigde tijd te meten). Alle experimenten voldoen aan een aantal kenmerken: ze zijn intuïtief bedienbaar, ze zijn interactief doordat er parameters ingesteld kunnen worden, kunnen met een webcam bekeken worden, de gemeten onderzoeksdata kunnen worden gedownload en er is achtergrondmateriaal (over de opstelling en de achterliggende theorie, beide in de vorm van statische pagina’s of pdf-documenten) beschikbaar. De opstellingen van de experimenten bevinden zich op diverse plaatsen, zoals universiteiten, meetinstituten, middelbare scholen en musea.
- Een omvangrijk project dat opvalt vanwege de uitgebreide aandacht voor het trainen van leerlingen en docenten is het *Faulkes-telescopes project*<sup>4</sup>. Het project startte in maart 2004 in Groot Brittannië en maakt deel uit van Las Cumbres Observatory Global Telescope Network (LCOGTN). Het doel van het project is leerlingen in contact te brengen met wetenschappelijk onderzoek met behulp van telescopen (Beare, 2004). Het is een omvangrijk wereldwijd project dat gratis toegang geeft tot op afstand bestuurbare telescopen en een daarbij aansluitend onderwijsprogramma. Het is mogelijk om toegang te krijgen tot twee telescopen (één in Hawaii en één in Australie). Faulkes biedt online trainingen over diverse onderwerpen gericht op onderzoek met de telescopen aan, verstrekt lesmateriaal en biedt leerlingen de mogelijkheid om in contact te komen met wetenschappelijk onderzoekers. De online trainingen zijn uitgebreid en geven

---

3 [http://www.remote-lab.de/index\\_en.html](http://www.remote-lab.de/index_en.html)

4 <http://faulkes-telescope.com/>

bijvoorbeeld achtergrondinformatie, test-data en toelichtingen op hoe deze moet worden verwerkt. De informatie is veelal in de vorm van een pdf-document, maar er zijn ook animaties en filmpjes beschikbaar. Er worden onderwerpen als beeldverwerking, asteroides en variabele sterren behandeld. Ook worden er thema's voor observatieprogramma's gegeven en wordt speciaal voor docenten informatie verstrekt over hoe het materiaal in de klas kan worden ingezet.

Ook bij deze grote projecten is de aandacht voor didactisch onderzoek nog steeds gering en wordt in publicaties over de projecten niet expliciet ingegaan op wat de (didactische) eisen aan de opzet zouden moeten zijn en wordt de opzet van het experiment niet verantwoord. Het Faulkes project onderscheidt zich in positieve zin van de andere projecten door op de site wel expliciet aandacht te besteden aan hoe het materiaal in de klas kan worden ingezet, maar ook bij het Faulkes-project wordt de gekozen opzet van het materiaal niet verantwoord of systematisch onderzocht. Gröber *et al.* (2007), die betrokken zijn bij het RCL-project, noemen wel elementen die niet zouden mogen ontbreken op de site: alle benodigde fysische achtergrondinformatie, toereikende beschrijving van de tools die ingezet worden, voorbeeldmetingen (zodat leerlingen hun eigen metingen kunnen plaatsen) en een voorbeeld van een foutendiscussie en kennisvragen. Maar hij gaat niet in op bijvoorbeeld de eisen aan de inhoudelijke invulling van deze elementen, de wijze waarop leerlingen geacht worden deze te bestuderen of hoe ze onderling verbonden zouden moeten worden. Gröber *et al.* (2008) bevelen aan dat verder onderzoek nodig is om docenten te ondersteunen in het omgaan met experimenteren op afstand, maar noemen niet dat hierbij de werkwijze van de leerlingen, die waarschijnlijk afwijkt van de conventionele situatie, bijzondere aandacht verdient.

Ten slotte valt op dat er artikelen zijn die ingaan op het op afstand samenwerken aan experimenten (bijvoorbeeld: van Joolingen *et al.*, 2005; Fakas *et al.*, 2005). De nadruk ligt bij deze artikelen op het beschrijven van de gereedschappen die voor deze samenwerking ontwikkeld zijn of zouden moeten worden.

In het CoLab project (van Joolingen *et al.*, 2005) werd bijvoorbeeld gewerkt aan het ontwikkelen van een leeromgeving waarin leerlingen gezamenlijk op afstand aan onderzoeksprojecten konden werken.

Ook Fakas *et al.* (2005) concentreren zich op het gereedschap en gaan in op een zogenaamd eJournal. Dit is een webbased labjournaal dat leerlingen in staat stelt vanaf verschillende locaties samen te werken aan experimenten op afstand. Ze kunnen zo gezamenlijk data verzamelen, aantekeningen maken, meetgegevens organiseren en datasets delen. Ook bij de artikelen uit deze derde categorie is de aandacht voor de didactiek minimaal. Er wordt bijvoorbeeld niet ingegaan op de didactische functie van de

samenwerking en de inhoudelijke eisen die dit aan het lesmateriaal stelt.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat er op het gebied van experimenten op afstand diverse ontwikkelingen gaande zijn, maar dat de aandacht voor de didactische aspecten nog steeds beperkt is. De eisen aan de inhoudelijke opbouw, werkwijze en vorm of aanwijzingen voor het ontwerpproces krijgen nergens echt aandacht. Hierbij aansluitend lijkt ook het gestructureerd evalueren van de experimenten op afstand nauwelijks te worden gedaan. Ma & Nickerson (2006) constateren in hun overzichtsartikel over experimenten op afstand, conventionele experimenten en simulaties dat er geen standaardcriteria zijn om de effectiviteit van experimenten (op afstand) te evalueren. Nickerson *et al.* (2007) presenteren vervolgens wel een evaluatiemodel, maar dit model concentreert zich op het in kaart brengen van de effectiviteit van afstandsexperimenten zonder hierin de invloed van de wijze van begeleiding en didactische en inhoudelijke opzet mee te nemen.

Op grond van de constatering dat er, vergeleken met projecten die rond 2000 liepen, in grotere samenwerkingsverbanden gewerkt wordt aan het ontwikkelen van experimenten op afstand kan geconcludeerd worden dat er blijkbaar een behoefte aan standaardisatie en opschaling is. In het Prolearn-project (een 'network of Excellence' dat werd gefinancierd door het 'Information Society Technology' (IST)-programma van de Europese Commissie en zich richt op 'technology enhanced professional learning'<sup>5</sup>) werd binnen het werkpakket 'online experimenting' zelfs speciaal gewerkt aan het opstellen van een meta-data systeem dat het makkelijker zou moeten maken om netwerken van afstandsexperimenten op te zetten (Faltin, 2006).

Maar, al wordt in veel publicaties het belang van aandacht voor didactiek wel genoemd, er is geen didactisch model voorhanden dat ingezet kan worden om nieuwe experimenten inhoudelijk vorm te geven of het functioneren van bestaande experimenten te evalueren.

Het onderzoek aan het lichtsnelheidsexperiment heeft een eerste stap gezet om te laten zien dat het wel degelijk mogelijk is om op een gestructureerde en navolgbare wijze een didactisch verantwoord experiment te ontwerpen en evalueren.

In 7.5.2 wordt nagegaan in hoeverre de opbrengst van het lichtsnelheidsexperiment als leidraad bij de ontwikkeling van nieuwe en de evaluatie van bestaande experimenten kan fungeren.

---

5 "Our mission is to bring together the most important research groups in the area of professional learning and training, as well as other key organisations and industrial partners, thus bridging the currently existing gap between research and education at universities and similar organisations and training and continuous education that is provided for and within companies".

### 7.5.2 Verder onderzoek

Nu het onderzoek is afgerond kan worden geïnventariseerd welke vragen onbeantwoord zijn gebleven en welke aanbevelingen voor de toekomst op grond van het uitgevoerde onderzoek gedaan kunnen worden.

In 7.3.1 werden ten aanzien van de invulling van het lichtsnelheidsexperiment enkele kanttekeningen geplaatst bij de huidige inzet van de *handelingspraktijk* en bij de grenzen van de *openheid* die nog verdere aandacht zouden verdienen.

Naast de ontwikkeling van het specifieke experiment heeft het onderzoek ook kennis opgeleverd die mogelijk zinvol kan zijn bij ontwikkelingsonderzoek van *nieuwe experimenten (op afstand)* en het *evalueren* van bestaande experimenten.

#### Handelingspraktijk

De onderzoeksresultaten lieten zien dat er verbetering mogelijk is ten aanzien van het nevendoeel: de leerlingen zicht geven op de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. Zoals in de reflectie al aan de orde kwam geeft het lichtsnelheidsexperiment geen volledig beeld van de handelingspraktijk van de experimenteel fysicus. Het is immers niet mogelijk met slechts een enkel experiment een volledig zicht op een gecompliceerde en veelomvattende handelingspraktijk als die van een experimenteel fysicus te geven. Het lichtsnelheidsexperiment kan hier alleen een bijdrage aan leveren als onderdeel in een reeks van experimenten en ander onderwijsmateriaal.

Er zou onderzocht moeten worden welke activiteiten in het huidige arsenaal van het natuurkunde onderwijs kunnen bijdragen aan het zicht op de handelingspraktijk en een leerlijn 'experimentele fysica' zouden kunnen vormen, en hoe experimenten (op afstand) hierbij ingezet kunnen worden. Gezien het meer en meer interdisciplinaire karakter van veel onderzoek, zou het wellicht nog beter zijn de leerlijn niet te beperken tot de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. Aansluitend bij van der Valk & van Soest (2004), Genseberger & van der Valk (2002) en van Rens (2005), zou gekozen kunnen worden voor de handelingspraktijk van een natuurwetenschappelijk onderzoeker met eventueel een vakoverschrijdende invulling. Een leerlijn biedt ook mogelijkheden de in het lichtsnelheidsexperiment maar zeer beperkt uitgewerkte fasen 5 en 6 meer inhoud te geven.

Bij het samenstellen van de leerlijn zou vooraf moeten worden nagegaan waar experimenten op afstand als bruikbaar middel kunnen worden ingezet en welke aspecten van de handelingspraktijk aan de hand van die experimenten belicht kunnen worden. De inzet van experimenten zou niet beperkt hoeven blijven tot alleen experimenten op afstand maar zou overwogen kunnen worden een mix van afstands- en 'hands on'- en virtuele experimenten in te zetten om de nodige openheid te creëren en voordelen van de verschillende vormen te benutten zoals Ma & Nickerson (2006) betogen.

### **Grenzen aan de openheid**

Ook verdient het aanbeveling de mogelijkheden wat betreft de openheid van een experiment verder te verkennen. Hierbij moet gedacht worden aan zowel openheid in het formuleren van de onderzoeksvraag als ook in de begeleiding van de leerlingen. In het geval van het lichtsnelheidsexperiment beperkten de aard van het experiment met de theoretisch complexe achtergrond en het type metingen dat uitgevoerd moest worden de mogelijkheid voor de leerlingen tot het zelf formuleren van de onderzoeksvraag. Het zal altijd lastig blijven de leerlingen met een experiment op afstand een open onderzoek te laten doen omdat het aantal vrijheidsgraden vooraf vastgelegd (want: instelbaar of afleesbaar) moet zijn.

Bovendien zijn aspecten als het ‘zoeken naar iets nieuws’ en ‘omgaan met verrassende resultaten’ nu eenmaal lastig te didactiseren.

Maar in een zoektocht naar de mogelijkheden van experimenten op afstand zouden de grenzen ten aanzien van deze openheid wel verkend moeten worden.

De mate van openheid heeft niet alleen betrekking op het formuleren van de onderzoeksvraag maar ook op de sturing en begeleiding van de leerlingen. Bij het lichtsnelheidsexperiment is ervoor gekozen het experiment voor leerlingen geheel zelfstandig en zonder aanwezigheid van een docent uitvoerbaar te maken. Voor nieuw te ontwikkelen experimenten zou de docent mogelijk toch een rol toebedeeld kunnen krijgen of zouden de mogelijkheden van de inzet van en eisen aan een beperkt beschikbare online tutor systematisch in kaart gebracht moeten worden. Dit zou zicht moeten geven op de grenzen aan de openheid in de begeleiding. Bij een online tutor wordt gedacht aan een persoon met inhoudelijke kennis van het experiment en didactische kwaliteiten die op regelmatige basis via email of chat voor de leerlingen beschikbaar is voor het beantwoorden van vragen, waardoor het tijd- en plaatsafhankelijke karakter van het experiment bewaard blijft. De tutor zou ook een rol kunnen spelen bij het in kaart brengen van de antwoorden van de leerlingen op de open vragen om deze op regelmatige basis te gebruiken voor het bijschaven van de formuleringen van de automatische feedback.

### **Ontwikkeling van nieuwe experimenten (op afstand)**

De ervaringen met het lichtsnelheidsexperiment lieten zien dat de didactische uitlijning van het experiment een prominente positie in het ontwerpproces innam. Wanneer gewerkt gaat worden aan het ontwikkelen van nieuwe experimenten op afstand, verdient dit opnieuw bijzondere aandacht.

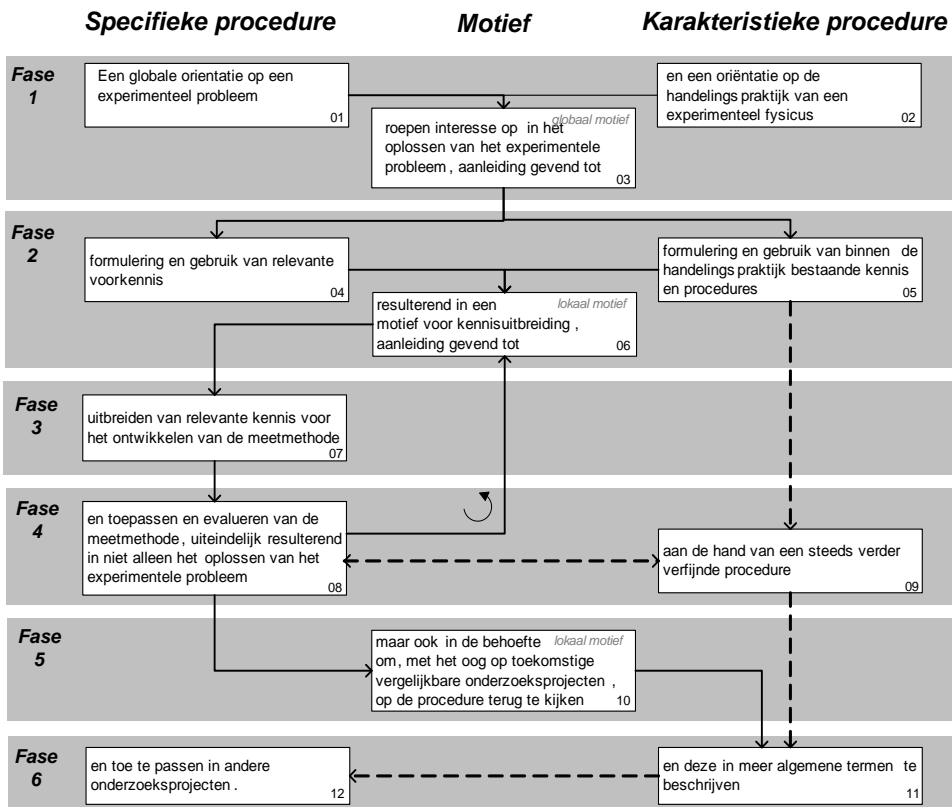
Wanneer de opbrengst van het lichtsnelheidsexperiment te generaliseren is, kan deze mogelijk productief ingezet worden als startpunt voor toekomstig ontwikkelonderzoek. In het antwoord op de onderzoeksvraag werd al beschreven tot welke didactische kenmerken de inhoudelijke uitlijning en de inzet van de vormelementen kan leiden.



Het opstellen van de inhoudelijke uitlijning bleek echter veel werk te zijn. Het zou waardevol zijn wanneer er een algemene structuur beschikbaar is die als basis voor toekomstige experimenten kan dienen. Kortland & Klaassen (2008) hebben reeds een dergelijke structuur uitgewerkt voor probleemstellend onderwijs in het algemeen. Op grond van de ervaringen met het lichtsnelheidsexperiment is nu geprobeerd deze algemene didactische structuur toe te spitsen op experimenten op afstand. Deze structuur is weergegeven in figuur 7.1 en geeft in algemene zin weer hoe het onderwijsleerproces van een experiment (op afstand) eruit zou kunnen zien:

- Fase 1 (blok 1-3) – Introductie, waarin bij de leerlingen een globale interesse in het onderwerp wordt opgewekt door zich te oriënteren op het experimentele probleem en de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus. De oriëntatie geeft de leerlingen zicht op de handelingspraktijk, laat hen herkennen dat karakteristieke procedures uit die handelingspraktijk wellicht inzetbaar zijn voor oplossing van het experimentele probleem en maakt hen nieuwsgierig naar die oplossing.
- Fase 2 (blok 4-6) – Kennisbehoefte, waarin bij de leerlingen, globaal geïnteresseerd geraakt in het onderwerp, de relevante voorkennis ten aanzien van het onderwerp en de handelingspraktijk wordt opgeroepen, en waarin de leerlingen zich realiseren dat die voorkennis nog onvoldoende is om het experimentele probleem op te lossen en dus in een bepaalde richting moet worden uitgebreid.
- Fase 3 (blok 7) – Procedureontwikkeling, waarin de leerlingen, gebruik makend van karakteristieke procedures uit de handelingspraktijk, de meetmethode ontwikkelen.
- Fase 4 (blok 8-9) – Proceduretoepassing, waarin de leerlingen de ontwikkelde meetmethode toepassen en evalueren om zo uiteindelijk de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden.
- Fase 5 (blok 10) – Reflectiebehoefte, waarin bij de leerlingen de behoefte aan reflectie wordt opgeroepen en de leerlingen zich realiseren dat het zinvol is op de doorlopen karakteristieke procedures terug te kijken.
- Fase 6 (blok 11-12) – Metacognitie, waarin de leerlingen de karakteristieke procedures expliciteren zodat ze die mogelijk kunnen inzetten bij toekomstige, vergelijkbare experimenten.

Kenmerkend in deze algemene didactische structuur zijn dus wederom de eerder in hoofdstuk 3 genoemde zes fasen met hun specifieke didactische functies: globale motivering (fase 1), kennisbehoefte (fase 2), procedureontwikkeling (fase 3), proceduretoepassing (fase 4), reflectiebehoefte (fase 5) en metacognitie (fase 6). Deze fasering lijkt overeen te komen met die van de specifieke didactische structuur van het lichtsnelheidsexperiment, maar wanneer nauwkeuriger wordt gekeken dan blijkt de algemene structuur toch af te wijken.



**Figuur 7-1** Gegeneraliseerde didactische uitlijning voor een probleemstellende benadering van het onderwijsleerproces van een experiment op afstand

In de reflectie op het product (7.3.1) werden al twee problemen bij de fasering van het lichtsnelheidsexperiment gesignaleerd. Die problemen zijn in deze algemene didactische structuur niet meer aan de orde.

Het eerste probleem betrof de invulling van fase 4 als proceduretoepassing. Dit probleem is in de algemene didactische structuur opgelost door het ontwikkelen van de procedure te zien als een cyclisch proces waarbij achtereenvolgens (steeds) de fasen 2, 3 en 4 worden doorlopen, zoals gevisualiseerd door de terugkoppeling van fase 4 naar fase 2 in figuur 7.1. In het geval van het lichtsnelheidsexperiment zou dit betekenen dat de leerlingen viermaal achtereenvolgens de fasen 2, 3 en 4 doorlopen, waarbij steeds eerst in fase 2 een kennisbehoefte voor het ontwikkelen van de meetmethode wordt opgeroepen, vervolgens in fase 3 de meetmethode wordt ontwikkeld die ten slotte in fase 4 wordt toegepast en geëvalueerd.

Het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht is dan niet meer een kwestie van proceduretoepassing, maar krijgt het karakter

van een vierde cyclus van kennisuitbreiding en ontwikkelen en evalueren van de meetmethode – een karakter dat overeenkomt met wat er feitelijk aan de leerlingen in dat stadium van het experiment wordt gevraagd. De verwachting is dat deze aanpassing voor een nog logischer lijn in het materiaal van het lichtsnelheidsexperiment zal zorgen. Met deze aanpassing van de didactische structuur is ook het tweede gesignaleerde probleem opgelost: de fasen 5 en 6 zitten nu niet meer ‘middenin’ het experiment, maar vormen een logische afsluiting. Het is overigens de vraag of het niet (nog) beter zou zijn om deze afsluiting nog verder ‘naar achteren’ te verplaatsen, bijvoorbeeld door de leerlingen de expliciete opdracht te geven in hun verslag van het experiment de ontwikkelde karakteristieke procedures<sup>6</sup> te benoemen.

Verder onderzoek zou moeten uitwijzen of de leerlingen dan meer open staan voor reflectie en metacognitie, en of ze bij latere onderzoeksprojecten gebruik maken van de opbrengst daarvan.

De hypothese, die voor het lichtsnelheidsexperiment bevestigd is, luidt dat het opzetten van een experiment op afstand volgens deze algemene structuur, mits goed uitgewerkt in het concrete lesmateriaal, leidt tot een onderwijsleerproces dat door leerlingen als zinvol wordt ervaren, hen in staat stelt de leerdoelen te bereiken en ervoor zorgt dat ze steeds weten waar ze mee bezig zijn en waarom. Gezien de positieve ervaringen met het lichtsnelheidsexperiment verdient het dan ook aanbeveling het ontwikkelingsonderzoek zelf verder voort te zetten en meer experimenten op afstand te ontwikkelen. Met het onderzoek aan het lichtsnelheidsexperiment is immers slechts één type experiment met specifieke gecompliceerde inhoud uitgewerkt. Onderzoek is nodig om ook de ontwerpeisen en mogelijkheden van ander type experimenten te verkennen. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan variatie in onderwerp, inhoudelijke complexiteit, complexiteit van de meethandelingen, complexiteit van de meetmethode, soort metingen, mate van vrijheid in het formuleren van de onderzoeksvraag en mate van geslotenheid in de begeleiding van de leerlingen. Naast deze variaties zouden in verder onderzoek ook conventionele experimenten betrokken kunnen worden. Want ook al was het doel van het onderzoek een experiment op afstand te ontwikkelen, in de didactische structuur van figuur 7.1 is het afstandskarakter niet meer te herkennen. Mogelijk zou de opgestelde algemene didactische structuur dus ook bruikbaar kunnen voor conventionele experimenten. Het zelfstandig moeten kunnen uitvoeren van het experiment was een belangrijke drijfveer om een inhoudelijke uitlijning te maken zodat inhoudelijke knelpunten

---

6 In het lichtsnelheidsexperiment waren dit procedures als: inzet van theorie, opsplitsen van een probleem in deelproblemen, cyclisch ontwikkelen en vervolgens evalueren van de meetmethode, manipuleren van signalen en elimineren van systematische fout.

voorkomen werden en de leerlingen steeds zicht zouden houden op hun eigen leerproces, maar kunnen wellicht ook de didactische kwaliteit van conventionele experimenten verhogen.

Ook de vormelementen zouden, al werden ze nu ingezet om te compenseren voor het afstandskarakter, mogelijk ook bij conventionele experimenten nuttig kunnen zijn. Een groot deel van de leerlingen gaf aan de begeleiding van het lichtsnelheidsexperiment te prefereren boven de begeleiding zoals ze die gewend zijn van experimenten op school. Onderzoek zou moeten uitwijzen of de begeleidingsmethode van het lichtsnelheidsexperiment ook voor conventionele experimenten functioneel zou kunnen zijn. Kenmerkende eigenschappen van het lichtsnelheidsexperiment die hierbij in ieder geval aandacht zouden moeten krijgen zijn:

- Een uitgelijnd onderwijsleerproces dat zo opgebouwd is dat leerlingen het als logisch en zinvol ervaren.
- Een werkwijze waarbij de leerlingen de meetmethode ontwikkelen door herhaaldelijk zelf tegen problemen aan te lopen en betrokken worden bij het oplossen hiervan.
- Een continue begeleiding en bevestiging van het al dan niet op de goede weg zijn.

### 7.5.3 Afsluiting

Naast inspanningen gericht op verder onderzoek zou ook tijd en energie moeten worden geïnvesteerd in het verduurzamen van het lichtsnelheidsexperiment (en andere nog te ontwikkelen experimenten). Want hoewel onderzoeksmatig misschien minder belangrijk, maar in de praktijk toch zeker interessant is het feit dat het onderzoek een product heeft opgeleverd dat vrijwel direct (en met enkele inhoudelijk/technische verbeteringen nog beter) inzetbaar is in de onderwijspraktijk. Het zou spijtig zijn wanneer een product dat met zoveel inspanning en aandacht tot stand is gekomen, goed functioneert en door leerlingen gewaardeerd wordt uiteindelijk niet zou terechtkomen op de plek waar het eigenlijk voor bedoeld was: de dagelijkse praktijk van het voortgezet onderwijs.

Het laten voortbestaan van het lichtsnelheidsexperiment en mogelijk ook opschalen vereist een structuur voor onderhoud en ondersteuning. In het verleden zijn er al initiatieven geweest om op nationaal niveau te komen tot een netwerk van experimenten op afstand (Bedaux *et al.*, 2007). In de opeenvolgende projecten e-Xperimenteren, e-Xperimenteren+ en Labsonline werden experimenten ontwikkeld en werd gewerkt aan het opzetten van een organisatiestructuur voor het beheer en onderhoud, maar deze kon na beëindiging van de financiering door

de Digitale universiteit<sup>7</sup> niet voorgezet worden. In Labsonline is geprobeerd om na afronding van het project een community van ontwerpers en gebruikers in stand te houden, maar blijkt dat zonder financiële ondersteuning niet haalbaar, want na stopzetten van de financiering is ook de community niet verder tot leven gekomen. Er is duidelijk, wil de organisatiestructuur kunnen voortleven, een continue financiële ondersteuning nodig.

## Literatuur

- Atkinson, P. (1990). Learning scientific knowledge in the student laboratory. In E. Hegarty-Hazel (Ed.), *The student laboratory and the science curriculum* (pp. 183–200). London: Routledge.
- Baird, D. C. (1998). *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*. Oxford: Oxford University Press.
- Beare, R. E. A. (2004). Astronomy-related content and robotic telescopes in upper secondary physics courses. *School Science Review* (86): 113–120.
- Bedaux, J., Van Gastel, L., Koreneef, T., Loonen, J. & Uiterwijk, K. (2007). Linking together reservation systems and remote labs. *International Journal of Online Engineering (iJOE)* - [www.i-joe.org](http://www.i-joe.org).
- Belanger, F. & Jordan, D. H. (2000). *Evaluation and implementation of distance learning: Technologies, tools and techniques*. Hershey, PA.: Idea Group Publishing.
- Berendsen, H. J. C. (1999). *Goed meten met Fouten*. Groningen: Laboratorium voor Biofysische Chemie (RUG).
- Cartwright, H. M. & Valentine, K. (2002). A spectrometer in the bedroom - The development and potential of internet-based experiments. *Computers & Education* 38(1-3): 53-64.
- Colwell, C., Scanlon, E. & Cooper, M. (2002). Using remote laboratories to extend access to science and engineering. *Computers & Education* 38(1-3): 65-76.
- Cooper, M. (2005). Remote laboratories in teaching and learning- Issues impinging on widespread adoption in science and engineering education. *International Journal of Online Engineering (iJOE)* - [www.i-joe.org](http://www.i-joe.org).
- Cox, A. J., Belloni, M., Dancy, M. & Christian, W. (2003). Teaching thermodynamics with Physlets® in introductory physics. *Physics Education* 38(5): 433-440.
- Cox, R. (2007). Technology-enhanced research: Educational ICT systems as research instruments. *Technology, Pedagogy and Education* 16(3): 337-356.
- Dancy, M. H. & Beichner, R. (2006). Impact of animation on assessment of conceptual understanding in physics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 2(1).
- Dewey, C. (1938). *Experience and Education*. New York: Collier Macmillan Publishers.
- Dobrogowski, W., Maziewski, A. & Zablotskii, V. (2007). Remote teaching experiments on magnetic domains in thin films. *European Journal of Physics* 28: 71–83.

- Fakas, G. J., Nguyen, A.V. & Gillet, D. (2005). The electronic laboratory journal: A collaborative and cooperative learning environment for web-based experimentation. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW) 14*: 189-216.
- Faltin, N. (2006). *Enlarged web-accessible knowledge base containing descriptions of major online labs for education*. Hannover: PROLEARN project (Deliverable 3-6 (European Commission Sixth Framework Project (IST-507310)) – workpackage Online Experimenting).
- Friedler, Y. & Tamir, P. (1990). Life in science laboratory classrooms at secondary level. In E. Hegarty-Hazel (Ed.), *The student laboratory and the science curriculum* (pp. 337-354). London: Routledge.
- Genseberger, R. & van der Valk, A. E. (2002). *Didactiek voor de  $\beta$ -vakken in de tweede fase van het HAVO/VWO. (Een bundel artikelen. Deel van het eindverslag van het BPS-project)*. Utrecht: CD- $\beta$ , Universiteit van Utrecht (interne publicatie).
- Gott, R. & Duggan, S. (1995). *Investigative work in the science curriculum*. Buckingham: Open University Press.
- Graham, A. R. (1982). Obtaining maximum benefits from laboratory instruction. *Frontiers in Education Conference Proceedings 1982, IEEE*, 148-151. Columbia, SC.
- Gravemeijer, K. P. E. (1994). *Developing Realistic Mathematics Education*. Utrecht: CD- $\beta$  Press.
- Gröber, S., Vetter, M., Eckert, B., Jodl, H. (2007). Experimenting from a distance - Remotely controlled laboratory (RCL). *European Journal of Physics 28*: 127-141.
- Gröber, S., Vetter, M., Eckert, B., Jodl, H. (2008). Remotely controlled laboratories: Aims, examples, and experience. *American Journal of Physics 76(4)*: 374-378
- Hegarty-Hazel, E. (1990). *The student laboratory and the science curriculum*. London: Routledge.
- Hirumi (2002). The design and sequencing of E-learning interactions: A grounded approach. *International Journal on E-learning 8(2)*: 30-42.
- Hodson, D. (1993). Re-thinking old ways: Towards a more critical approach to practical work in school science. *Studies in Science Education (22)*: 85-142.
- Hofstein, A. & Lunetta, V. N. (1982). The role of the laboratory in science teaching: Neglected aspects of research. *Review of Educational Research 52*: 201-217
- Hofstein, A. & Lunetta, V.N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education 88(1)*: 28-54.
- Jeschke, T., Scheel, H., Seiler, R. & Thomsen, C. (2005). The experiment in eLearning: Magnetism in virtual and remote experiments. *Conference Proceedings Interactive computer aided learning ICL, Villach/Austria, September 2005*. Kassel University Press.

- Kemmerling, G., Zwooll, K., De Laat, C. T. M. A., Kooijman, W., Korten, M., Lourens, W., van der Meer, E. & Oomens, A. A. M. (1999). Remote handling of TEXTOR diagnostics using CORBA as communication architecture. *Fusion Engineering and Design* 43(3): 335-341.
- Kirschner, P. A., Sweller, J. & Clark, R.E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist* 41(2): 75-86.
- Klaassen, C. J. W. M. (2006). *Een natuurwetenschappelijk curriculum gebaseerd op gedidactiseerde handelingspraktijken – Schets van een onderzoeksprogramma*. Utrecht: CD-β, Universiteit van Utrecht (intern discussiestuk).
- Klaassen, C. J. W. M. (1995). *A problem posing approach to teaching the topic of radioactivity*. Utrecht: CD-β Press.
- Kortland (2001), *A problem-posing approach to teaching decision making about the waste issue*. Utrecht: CD-β Press.
- Kortland, J. & Klaassen, C. J. W. M. (2008). *Ontwikkelingsonderzoek in uitvoering. FIsme-nw* - Utrecht: CD-β, Universiteit van Utrecht (intern discussiestuk).
- Krusberg (2007). Emerging Technologies in physics education. *Journal of Science Education and Technology* 16(5): 401-411.
- Lazarowitz, R. & Tamir, P. (1994). Research on using laboratory instruction in science teaching. In D. L. Gabel (ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 94-120). New York: Mac Millan Publishing.
- Lijnse, P. L. (1995). "Developmental research" as a way to an empirically based "didactical structure" of science. *Science Education* 79: 189-199.
- Lijnse, P. L. (2002). Op weg naar een didactische structuur van de natuurkunde?. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen* 19: 62-93.
- Lijnse, P. L. & Klaassen, C. J. W. M. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education* 26: 537-554.
- Ma, J. & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys* 38(3, Article 7).
- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? *American Psychologist* 59(1): 14-19.
- Muirhead, B. & Juwah, C. (2004). Interactivity in computer-mediated college and university education: A recent review of the literature. *Educational Technology & Society* 7(1): 12-20.
- Nickerson, J. V., Corter, J. E., Esche, S. K. & Chassapis, C. (2007). A model for evaluating the effectiveness of remote engineering laboratories and simulations in education. *Computers & Education* 49(3): 708-725.



- Ogborn, J. (1997). Constructivist metaphors of learning science. *Science & Education* 6: 121-133.
- Park, S. T. L., Lee, H., Yuk, K.C. & Lee, H. (2005). Web-based nuclear physics laboratory. *Proceedings m-ICTE2005 Recent Research Developments in Learning Technologies*.
- Powell, W. (2003). Essential design elements for succesful online courses. *Journal of Geoscience Education* 51(2): 221-230.
- Prins, G. T., Bulte, A. M. W., Van Driel, J. H. & Pilot, A. (2008). Selection of Authentic Modelling Practices as Contexts for Chemistry Education. *International Journal of Science Education* 30(14): 1867-1890.
- Santos, J., Augusto, J., Gomes, A., Gurriana, L., Lourenço, N., Maio, A., Marques, C. & Silva, J. (2006). The CRESCERE muon's lifetime experiment. *Proceedings IV International Conference on Multimedia and ICTs in Education - formatex.org*.
- Schauer, F., Ozvoldova, M & Lustig, F. (2008). Real remote physics experiments across internet – Inherent part of integrated e-learning. *International Journal of Online Engineering (iJOE)* 4(1): 52-55.
- Simons, P. R. J. (2002). *Digitale didactiek – Hoe (kunnen) academici leren ICT te gebruiken in hun onderwijs?* Inaugurele rede. Universiteit Utrecht.
- Smits, T. J. M. (2003). *Werken aan kwaliteitsverbetering van leerlingonderzoek*. Utrecht: CD-β Press.
- Squires, G. L. (2001). *Practical Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Taal, A., Andree, B. & Lourens, W. (1998). SENS, design, development and evaluation of a digital course on signal processing. *Proceedings of the 1998 Workshop on Computer Architecture Education WCAE '98* (article number 22). New York, NY: ACM.
- Ten Voorde, H. H. (1977). *Verwoorden en verstaan*. Den Haag: Staatsuitgeverij.
- Van der Laan, E. (2002). De praktijk van het practicum, een onderzoek naar de (on)mogelijkheden van de computer als meetinstrument in het natuurkundep practicum. In Deinum, J. F., van Maanen, J., van Streun, A. & Tolboom, J. R. (Eds), *Werken aan de kwaliteit van onderwijs in de betavakken*. (pp 125- 144). Groningen, Rijksuniversiteit Groningen.
- Van Joolingen, W. R., de Jong, T., Lazonder, A. W., Savelsbergh, E. R. & Manlove, S. (2005). Co-Lab: Research and development of an online learning environment for collaborative scientific discovery learning. *Computers in Human Behavior* 21(4): 671-688.
- Van Rens, E. M. M. (2005). *Effectief scheikundeonderwijs voor 'leren onderzoeken' in de tweede fase van het vwo*. Amsterdam: Vrije Universiteit.

- Van der Valk, A. E. & van Soest, M. F. N. (2004). *Onderzoek leren doen in de Bètavakken: elementen van een leerlijn in de onderbouw van twee scholen*. ICO-ISOR Onderwijsresearch. Utrecht, Utrecht University / Dept. Educational Sciences.
- Van Yperen, P. (2000). *Meten op afstand: ontwikkeling van een op afstand bestuurbaar experiment om de lichtsnelheid te bepalen*. Utrecht: Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur- en Sterrenkunde (Afstudeerscriptie).
- Verwer, E. (2005). *Boomvragen: ontwerp en implementatie van een adaptief diagnostisch systeem ter begeleiding van leerlingen en toepassing hiervan op een lichtsnelheidsexperiment op afstand*. Utrecht: Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur- en Sterrenkunde (Afstudeerscriptie).
- Vollebregt, M. J. (1998). *A problem posing approach to teaching an initial particle model*. Utrecht: CD-β Press.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Westbroek, H. (2005). *Characteristics of Meaningful Chemistry Education*. Utrecht: CD-β Press.
- White, J. (1988). *Learning Science*. Oxford: Basil Blackwell.
- Woo, Y. & Reeves, T. C. (2007). Meaningful interaction in web-based learning: A social constructivist interpretation. *Internet and Higher Education* 10: 15-25.

## Webreferenties

Product 1: <http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsiteoud/index.htm>

Product 2: [http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsite/index\\_new.htm](http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsite/index_new.htm)

Product 3: <http://www.phys.uu.nl/~moa/lichtsnelheid>

### **Hoofdstuk 1:**

<http://conference.kek.jp/heacc2001/pdf/th04.pdf>

[http://astro.caltech.edu/~pls/papers/spie\\_97.ps.gz](http://astro.caltech.edu/~pls/papers/spie_97.ps.gz)

<http://labfiz.uwb.edu.pl/exp/domeny/doswiadczenia.php?lang=en>

<http://invsee.asu.edu/Invsee/invsee.htm>

[http://optics.phys.spbu.ru/~Arkipov/distphys/eng\\_page.htm](http://optics.phys.spbu.ru/~Arkipov/distphys/eng_page.htm)

<http://www.cdbeta.uu.nl/vo/bbp/>

### **Hoofdstuk 2:**

<http://www1.phys.uu.nl/Masterclass/>

<http://physicsonstage.web.cern.ch/physicsonstage/>

<http://www.cdbeta.uu.nl/vo/woudschotennatuurkunde/default.php>

<http://www.cma.science.uva.nl/Software/>

<http://www.cdbeta.uu.nl/vo/bbp/>

[http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsite/index\\_new.htm](http://131.211.39.85/cgi-bin/mainsite/index_new.htm)

### **Hoofdstuk 7:**

[http://www.remote-lab.de/index\\_en.html](http://www.remote-lab.de/index_en.html)

<http://faulkes-telescope.com/>

<http://www.du.nl/>

<http://www.kuenheim-stiftung.de/index.php?idcatside=113>

## Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft het ontwikkelingsonderzoek waarin gewerkt is aan het opzetten van een “experiment op afstand” voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs dat via internet op afstand uitgevoerd kan worden. Het onderzoek startte in 2000 in een tijd dat de ontwikkelingen binnen de internettechnologie een enorme vlucht namen. Vanuit nieuwsgierigheid naar de mogelijkheden van deze technologie en de behoefte te verkennen in hoeverre die in het onderwijs toepasbaar zou kunnen zijn werd binnen de werkgroep Fysische Informatica van de natuurkundefaculteit van de Universiteit Utrecht het idee geboren een opstelling te bouwen die via internet te besturen en uit te lezen zou moeten zijn.

Hoofdstuk 1 beschrijft hoe bij de start van het ontwikkelingsonderzoek wereldwijd ook binnen andere onderzoeksgroepen en instituten gewerkt werd aan het via internet beschikbaar stellen van experimentele opstellingen. Deze initiatieven bleken, zoals gebruikelijk bij het beschikbaar komen van nieuwe technologie, vooral gericht op het (technisch) werkend krijgen van het experiment. Aandacht voor de didactische aspecten was in de literatuur nauwelijks te vinden.

In het hoofdstuk wordt de keuze beargumenteerd om didactisch onderzoek aan experimenteren op afstand te doen. Toegelicht wordt hoe experimenten op afstand, net als conventionele experimenten, een functionele rol in het onderwijs kunnen vervullen omdat de doelen van praktisch werk ook grotendeels op experimenten op afstand van toepassing zijn. Het op afstand experimenteren zou daarnaast enkele (veelal praktische) voordelen ten opzichte van conventionele experimenten kunnen bieden, zoals het plaats- en tijdonafhankelijk karakter, de vergrote beschikbaarheid van apparatuur en experimentele mogelijkheden en het werken in een gecontroleerde en geconditioneerde omgeving. Juist het streven naar het verzilveren van die meerwaarde stelde bijzondere eisen aan de opzet van het experiment op afstand. Een consequentie van het plaats- en tijdonafhankelijke karakter zou immers kunnen zijn dat leerlingen het experiment thuis (en dus zonder aanwezigheid van een docent) zouden uitvoeren. Besloten werd het onderzoek te richten op het verkennen van de mogelijkheden en problemen van een experiment op afstand dat geheel zelfstandig door de leerlingen uit te voeren zou moeten zijn. Het onderzoek werd voortgezet binnen het Centrum voor Bètadidactiek en zou een antwoord moeten geven op de volgende globale onderzoeksvraag: *hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?*

Het onderzoek werd uitgevoerd in twee cycli waarin gewerkt werd aan het ontwikkelen van een experiment waarmee leerlingen uit 5 of 6 VWO geheel zelfstandig de lichtsnelheid in lucht en in enkele andere media zouden kunnen bepalen.

In dit experiment wordt de lichtsnelheid bepaald door meting van het faseverschil tussen twee punten van een amplitude-gemoduleerd lichtsignaal als functie van de afstand tussen die twee punten (lichtbron en detector):  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ . Het gebruik van een amplitude-gemoduleerd lichtsignaal is nodig omdat de meetopstelling het gereduceerd faseverschil meet. Het meten van de  $\Delta \varphi, \Delta x$ -relatie is nodig om een optredende systematische fout te kunnen elimineren. De lichtsnelheid in andere media dan lucht is te bepalen uit het extra faseverschil als gevolg van het tussenplaatsen van een medium over een deel van de afstand tussen lichtbron en detector.

### ***Eerste cyclus: verkenning van de mogelijkheden en problemen***

Hoofdstuk 2 beschrijft de eerste cyclus van ontwikkeling en onderzoek die een verkennend en inventariserend karakter had. Op grond van intuïtieve keuzen werd gewerkt aan het opzetten van een eerste versie van het experiment op afstand (product 1). Dit was een website die toegang gaf tot de experimentele opstelling en daarnaast informatie gaf over de meetopstelling, de meetmethode en de achterliggende theorie. Van de leerlingen werd verwacht deze informatie te bestuderen en vervolgens de metingen uit te voeren en te verwerken. Het onderzoek liet zien dat het experiment technisch gezien heel behoorlijk functioneerde, maar dat er ten aanzien van de inhoud, de werkwijze en de opzet van het experiment nogal wat kanttekeningen te plaatsen waren. Er werden inhoudelijke struikelblokken geconstateerd, de leerlingen verdwaalden in het materiaal en wisten niet goed waar ze mee bezig waren.

Vervolgens werd aan de hand van een tweede versie (product 2) geprobeerd deze problemen verder te verkennen. Voor dit product werd, om pragmatische redenen, gebruik gemaakt van lesmateriaal bij het experiment dat al voor een ander doel, het natuurkunde-bovenbouwpracticum van de UU, ontwikkeld was. De inhoud van dit materiaal was didactisch meer doordacht en vereiste van de leerlingen een actievere houding doordat ze de meetmethode aan de hand van enkele vragen zelf ontwikkelden, maar was geschreven met het idee dat een docent aanwezig zou zijn die de leerlingen kon ondersteunen en zo nodig helpen bij problemen. Het onderzoek liet zien dat de leerlingen ook met dit product, zoals te verwachten was als gevolg van het ontbreken van de docent, inhoudelijke problemen ondervonden. Het aan de hand van vragen zelf ontwikkelen van de meetmethode leek er wel voor te zorgen dat de leerlingen een actievere houding aannamen en beter wisten waar ze mee bezig waren. Op grond van deze ervaringen werd een aantal aanbevelingen ten aanzien van de inhoud en de opzet en werkwijze geformuleerd die de input voor de tweede cyclus van ontwikkeling en onderzoek vormden. Ten aanzien van de inhoud werd aanbevolen te streven naar het voorkomen van inhoudelijke knelpunten bij het moduleren, de noodzaak van het meten van de  $\Delta \varphi, \Delta x$ -relatie en het bepalen van de lichtsnelheid in andere media. Daarnaast zou ervoor gezorgd moeten worden dat de

leerlingen steeds zouden weten waar ze mee bezig zijn en waarom ze dat doen. De tweede categorie aanbevelingen had betrekking op de vorm van het materiaal: de opzet en de werkwijze. In het ontwerp van het materiaal zou bijzondere aandacht moeten worden besteed aan een heldere en herkenbare structuur en het inbouwen van interactie en controle-, feedback- en reflectie-faciliteiten die leerlingen kunnen sturen en activeren.

### ***Tweede cyclus: Inhoudelijke uitlijning en ondersteunende vormelementen***

De eerste cyclus had laten zien dat de problemen betrekking hadden op de inhoud en de opzet en werkwijze. Voor het oplossen van deze problemen werd aangesloten bij de ontwikkelingen binnen andere onderzoeksprojecten van het Centrum voor BètaDidactiek waarin ook gewerkt werd aan de vraag hoe een onderwijsleerproces zou moeten worden vormgegeven zodanig dat de leerlingen steeds zicht houden op de inhoudelijke lijn. Het lesmateriaal werd daarom ontwikkeld binnen het raamwerk van de probleemstellende benadering waarin het ontwerpen van een voor leerlingen zinvol en logisch onderwijsleerproces centraal staat. Dit was vooral belangrijk omdat geanticipeerd moest worden op de situatie dat de leerlingen het experiment geheel zelfstandig moesten kunnen uitvoeren en er dus geen docent aanwezig zou zijn die kon inspringen en helpen bij het (opnieuw) krijgen van zicht op de grote lijn. Hoofdstuk 3 beschrijft hoe het materiaal inhoudelijk werd uitgelijnd binnen het raamwerk van de probleemstellende benadering. Voorafgaand aan het schrijven van het lesmateriaal werd een didactische structuur opgesteld waarin op hoofdlijnen een beschrijving en verantwoording van het gewenste en verwachte onderwijsleerproces gegeven werd.

Het onderwijsleerproces startte met het oproepen van een globaal motief dat de leerlingen zou moeten interesseren voor het onderwerp. Vervolgens werkten de leerlingen, gestuurd door enkele achtereenvolgens opgeroepen inhoudelijke lokale motieven, aan het ontwikkelen van de meetmethode. Dit zorgde voor een opbouw in het lesmateriaal waarbij de leerlingen herhaaldelijk geconfronteerd werden met problemen met de meetmethode en een actieve rol speelden bij het oplossen van deze problemen. Dit moest voorkomen dat de leerlingen zouden struikelen over inhoudelijke knelpunten zonder dat het materiaal een receptmatig karakter zou krijgen.

In het lesmateriaal werd ook een expliciete parallel met de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus gelegd. Hierdoor verkregen de leerlingen zicht op deze handelingspraktijk en kon het materiaal in een breder kader worden geplaatst. Gebruik makend van karakteristieke procedures uit de handelingspraktijk van een experimenteel fysicus werkten de leerlingen stap voor stap aan het ontwikkelen van

een, gegeven de beschikbare meetopstelling, geschikte meetmethode. Er werden drie deelproblemen geformuleerd die achtereenvolgens opgelost moesten worden. Bij het oplossen van elk deelprobleem doorliepen de leerlingen dezelfde stappen. Ze bestudeerden (een eigenaardigheid van) de meetopstelling, pasten de meetmethode hierop aan om vervolgens te evalueren of dit tot het gewenste resultaat had geleid en de verwachte waarde voor de lichtsnelheid opleverde.

Naast de inhoudelijke uitlijning was er ook aandacht voor de vorm van het materiaal. Er werd gezocht naar vormelementen die de inhoudelijke uitlijning ondersteunden en voor het ontbreken van de docent compenseerden. De vormelementen die ingezet werden waren een automatisch vragen- en feedbacksysteem om de leerlingen te activeren en zicht te geven op hun eigen leerproces, een 'Waar ben ik'-window waarin de rode draad in het materiaal werd gevisualiseerd, een vaste opbouw van schermen om de verbindingen tussen de opeenvolgende schermen duidelijk te maken, animaties, facultatieve pagina's en twee webcams.

Het onderzoek in de tweede cyclus zou duidelijk moeten maken of de combinatie van de inhoudelijke uitlijning en de vormelementen tot een goed functionerend en zelfstandig uit te voeren experiment op afstand had geleid. Aan de hand van twee onderzoeksvragen werd nagegaan of dit het geval was.

De eerste vraag (A-vraag) was gericht op het functioneren van de inhoudelijke uitlijning: *Voldoet de didactische structuur zodanig dat de leerlingen in staat zijn het experiment zelfstandig, inhoudelijk gemotiveerd en met voldoende zicht op waar ze mee bezig zijn uit te voeren?*

De tweede vraag (B-vraag) richtte zich op de vormelementen: *Functioneert de website met de opgenomen vormelementen in het faciliteren van het zelfstandig en op afstand uitvoeren van het experiment?*

Hoofdstuk 4 beschrijft hoe de didactische structuur en de ondersteunende vormelementen werden uitgewerkt tot concreet lesmateriaal en een bijbehorend scenario met een beschrijving en verantwoording van het gewenste en verwachte verloop van het onderwijsleerproces. Het hoofdstuk sluit af met een toelichting op de onderzoeksmethode waarin de hoofdvragen worden uitgewerkt in onderzoeksvragen en subvragen.

### ***Het functioneren van de didactische structuur***

In hoofdstuk 5 worden de resultaten van het onderzoek naar het functioneren van de didactische structuur (A-vraag) beschreven. Twintig leerlingen hebben in koppels het experiment uitgevoerd en zijn hierover gedurende het experiment en na afloop ondervraagd. De resultaten laten zien dat de in de didactische structuur uitgezette lijn voor het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht goed

functioneerde. De eerder gesignaleerde inhoudelijke knelpunten vormden niet langer struikelblokken en het proces dat de leerlingen doorliepen werd door hen als zinvol, logisch en prettig ervaren. Ze wisten waar ze inhoudelijk mee bezig waren, konden zelfstandig de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht ontwikkelen en bereikten zo de gewenste leerdoelen voor dit deel van het materiaal.

Bij het ontwikkelen van de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht werden wel enkele problemen geconstateerd. In dit onderdeel werd van de leerlingen verwacht de eerder ontwikkelde meetmethode uit te breiden voor andere media, met minder begeleiding dan bij de lichtsnelheid in lucht het geval was. De leerlingen konden kiezen of ze de meetmethode geheel zelfstandig of aan de hand van enkele tussenstappen wilden ontwikkelen. De verwachting vooraf was dat slechts een beperkte groep leerlingen in staat zou zijn de meetmethode geheel zelfstandig te formuleren. Enkele leerlingen leken hier inderdaad toe in staat. Toch kozen ze voor het in stappen ontwikkelen van de meetmethode. Alle leerlingen waren uiteindelijk in staat met behulp van de ondersteuning door het lesmateriaal het experiment af te ronden, zij het dat daarvoor bij een deel van die leerlingen wat extra ondersteuning van buitenaf (door de onderzoeker) nodig was.

Wat betreft het meer algemene leerdoel om enig zicht te krijgen op de handelingspraktijk van de experimenteel fysisicus kon aangetoond worden dat de leerlingen in staat waren om enkele belangrijke elementen van deze praktijk te benoemen.

### ***Het functioneren van de vormelementen***

In hoofdstuk 6 wordt het onderzoek naar het functioneren van de vormelementen (B-vraag) beschreven. Het onderzoek maakt duidelijk dat de website en de daarin opgenomen vormelementen goed gefunctioneerd hadden. Met name het ‘Waar ben ik’-window en het vragen- en feedbacksysteem waren functioneel voor het sturen en begeleiden van de leerlingen.

Het ‘WaarBenIk-window’ zorgde ervoor dat de leerlingen op ieder moment zicht hadden op waar ze zich in het materiaal bevonden. Bovendien verschaftte het toegang tot eerder bezochte pagina’s waarop ook gegeven antwoorden met ontvangen feedback te vinden waren. Het vragensysteem zorgde er niet alleen voor dat de antwoorden van de leerlingen automatisch van feedback werden voorzien (waardoor de leerlingen wisten dat ze zich nog steeds op de goede weg bevonden), maar bleek ook bij te dragen aan het plezier waarmee de leerlingen het materiaal doorliepen. De inzet van open vragen bleek een effectief middel om het receptmatige karakter te verminderen en de leerlingen te laten reflecteren en vooruitkijken. Ook de opbouw van de schermen, waarbij eerst werd teruggeblikt naar het vorige scherm en waarbij werd afgesloten met een vooruitblik naar het volgende scherm, werd door de leerlingen als functioneel ervaren. De webcams bleken belangrijk voor de



leerlingen om zich bij de opstelling betrokken te voelen.

Bij het functioneren van de facultatieve pagina's en de animaties zijn wel enkele kanttekeningen te plaatsen. De facultatieve pagina's bleken voor de leerlingen functioneel in het onderscheiden van essentieel en facultatief materiaal en ondersteunden zo het zichtbaar houden van de inhoudelijke hoofdlijn in het materiaal, maar ze werden slechts sporadisch bezocht. Wat betreft de animaties bleken vooral de animaties die een nieuw verschijnsel visualiseerden te worden gewaardeerd. De leerlingen ervoeren deze als functioneel omdat ze bijdroegen aan de beeldvorming over het nieuwe verschijnsel. Bij de animaties die bedoeld waren om de voorkennis op te roepen was dit beeld reeds aanwezig en de voorkennis leek dan niet sneller of beter te worden opgeroepen dan zonder een animatie. De leerlingen gaven aan de inzet van animaties hierbij echter niet storend te vinden.

### **Afsluiting**

Hoofdstuk 7 geeft antwoord op de globale onderzoeksvraag: *Hoe moet een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand worden opgezet?*. Uit het ontwikkelingsonderzoek wordt duidelijk dat het ontwikkelde eindproduct een zowel technisch als inhoudelijk goed functionerend experiment op afstand heeft opgeleverd. Het bleek een succesvolle strategie om enerzijds de inhoud uit te lijnen binnen de probleemstellende benadering en daarbij gebruik te maken van de handelingspraktijk van een experimenteel fysisch en anderzijds vormelementen in te zetten die de inhoudelijke uitlijning ondersteunden en het afstandskarakter compenseerden. Dit heeft geleid tot een eindproduct met de volgende didactische kenmerken:

- Op een globaal niveau is er sprake van een voor de leerlingen herkenbare rode draad in het materiaal en de leerlingen weten waar ze mee bezig zijn.
- Inzoomend naar een meer lokaal niveau sluiten ook de opeenvolgende activiteiten in het lesmateriaal goed op elkaar aan
- Het product is zo opgezet dat de leerlingen zelfstandig en actief bezig zijn bij het doorlopen van het materiaal.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met enkele suggesties voor verder onderzoek. Aansluitend bij de geconstateerde beperkingen wordt gesuggereerd in verder onderzoek de mogelijkheden van meer open activiteiten te bestuderen en de koppeling van experimenten aan de handelingspraktijk van een experimenteel fysisch verder uit te werken in een mogelijke leerlijn. Een hulpmiddel bij het ontwikkelen van nieuwe experimenten (op afstand) binnen deze leerlijn zou de uit het onderzoek voortgekomen gegeneraliseerde didactische structuur van een probleemstellend onderwijsleerproces in een gedidactiseerde handelingspraktijk van een experimenteel fysisch kunnen zijn.

## Summary

The subject of this thesis is a developmental study on “remote experimenting” in education. It concerns the development of a remote experiment that enables pre-university students to carry out a physics experiment at a distance via the internet. The project started in 2000 at a time when the development of internet technology was growing rapidly. Awareness of these new possibilities stimulated an idea within the Computational Physics research group of the Department of Physics of Utrecht University to try to build an experimental setup that could be controlled over the internet, in an attempt to explore the possibilities of the new technology for educational purposes. Chapter 1 describes how, at the start of the project, also other research groups and institutes worldwide were working on trying to make experimental setups available through the internet. These initiatives were, as is usual with new technologies, mainly focussed on the technical aspects of trying to get the experiment operational, without paying too much attention to pedagogical aspects. There was, nevertheless, a need for didactical research on remote experimenting, as is discussed in this chapter. It was explained that remote experiments can play a functional role in education, since the aims of practical work with conventional experiments are generally also applicable to remote experiments.

Remote experiments can offer several (practical) benefits when compared to conventional experiments, such as time and place independence, increased availability of experimental setups, and the possibility to work in a controlled environment. However, the desire to exploit these benefits put special demands on the design of the experiment, since, as a consequence of the time- and place independence, the students might be conducting the experiment without a teacher in the vicinity.

As a consequence of these demands it was decided to continue the project within the Centre for Science Education, and focus on exploring the possibilities and problems of remote experiments conducted in the absence of a teacher. The aim of the research was to answer the following global research question: What should a technically, as well as didactically, well-functioning remote experiment look like?

The research was carried out in two cycles and focused on the development of a remote experiment that could be conducted autonomously by pre-university students to measure the speed of light in several media.

In the experiment, the speed of light is determined by measuring the phase difference between two points of an amplitude-modulated signal as a function of the distance between the two points (source and detector):  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ . The signal needs to be modulated because the experimental setup measures the reduced phase difference. Because of a systematic error, the speed of light needs to be determined by measuring

the relationship between  $\Delta\varphi$  and  $\Delta x$ . The speed of light in other media than air can be determined by measuring the extra phase difference that is caused by placing the medium between the source and the detector.

### ***First cycle: exploring the possibilities and problems***

Chapter 2 describes the first cycle of development and research. In this explorative cycle a first version of the remote experiment was set up based on intuitive choices (product 1). It was a website that gave access to the experimental setup and contained information about the setup, the method of measurement and the underlying theory. The students were expected to study this information, conduct the measurements and process the data.

The research showed that technically the experiment already functioned quite well. However, many problems were observed concerning the content, and the way the students were tackling it. The students appeared not to be able to study the material independently because of content-related obstacles. Moreover, they tended to 'get lost' in the material, and did not seem to know what they were doing.

These problems were further examined using a second version of the material (product 2). For pragmatic reasons, material was used that had already been developed for another purpose (Secondary Education Physics Practicals of Utrecht University). This material was adapted and developed further, paying special attention to didactical aspects. It demanded a more active attitude of the students, and had them answer questions to develop the method of measurement themselves, but assumed nonetheless the presence of a teacher to help the students when necessary. The research showed that also with this product, as to be expected in the absence of the teacher, the students encountered content-related problems. However, encouraging the students to study the content by requiring them to answer questions, resulted in them adopting a more active attitude and they seemed to be more aware of what they were doing.

Based on these experiences, several recommendations were made concerning the content, the design and the students' working method. Concerning the content, it was advised to avoid content-related problems related to the modulation, the need for measuring the  $\Delta\varphi, \Delta x$ -relation and application of the method in other media. Also, the material should aim at making the students more aware of what they are doing and why they are doing it.

The second category of recommendations concerned the format of the material: the design and the working method. Special attention should be paid to designing a clear structure for the website and adding interaction and control, (feedback- and reflection facilities) to activate the students and guide them through the material.

### ***Second cycle: Didactical structure and supporting format features***

The first cycle brought to light problems concerning the content, and the design and working method. Other research projects at the Centre for Science Education were also concerned with teaching and learning processes in which students are constantly aware of what they are doing and tried to achieve this by developing the lesson material within the theoretical framework of the problem posing theory. This should lead to material in which the students see the point of what they are doing. This was particularly important in a remote experiment because the students have to be able to work alone without a teacher to get them back on track when necessary.

Chapter 3 describes how the content was structured within the theoretical framework of the problem posing approach. A didactical structure was designed before writing the actual lesson material for the website. This didactical structure describes the inter-related conceptual and content-related motivational pathway of the intended teaching-learning process. This starts by evoking a global motive that should serve to interest the students in the subject. Next, a series of “local” motives motivate the main phases of the teaching-learning process in which the students work on developing the method of measurement. As a result, the lesson material is set up in such a way that the students are repeatedly confronted with a practical problem to solve and they play an active role in developing the method of measurement. This was intended to prevent content-related problems which could cause the students to get stuck in the material, without giving it a recipe-like character.

The development of the method of measurement in the lesson material explicitly mirrored the authentic practice of an experimental physicist. The students developed the method by making use of the characteristic procedure of an authentic practice. This was intended to give the students a global insight into this practice and hence broaden the perspective of the experiment.

The students started working on the method of measurement on the basis of three sub-problems that first needed to be solved. While solving these problems they repeated three basic steps: firstly, study (a particular feature of) the experimental setup; secondly, adjust the method of measurement; and thirdly, evaluate whether the adjustment had led to the desired result and the expected value of the speed of light. As well as to improving the teaching-learning process, attention was also paid to the format of the material. In an attempt to compensate for the absence of the teacher and support the teaching-learning process some format elements were developed and deployed: an automated question-, answer-, and feedback system was set up to support the students, activate them and give them insight into their learning process, a ‘Where-am-I’-window that showed their current position within the material, a fixed structure of the content on the screen that showed the link between the current screen and the preceding and following screens, animations, facultative pages and two webcams.

The research in the second cycle was intended to make clear whether the combination of the didactical structure and the format-elements had led to a well functioning experiment that could be conducted autonomously. It was investigated on the basis of two research questions:

The first question (A-question) aimed at the functioning of the didactical structure: *Does the didactical structure succeed in enabling the students to conduct the experiment autonomously, while seeing the point of what they are doing.*

The second question (B-question) aimed at the format-elements: *Does the website with the included format elements succeed in supporting the students in conducting the experiment autonomously?*

Chapter 4 describes and justifies, in the so-called scenario, how the design was elaborated into actual learning material.

At the end of the chapter the research method is worked out into sub-questions.

### ***The functioning of the didactical structure***

In chapter 5 the results of the research on the functioning of the didactical structure (A-question) are presented. Twenty students conducted the experiment in pairs and were interviewed during and after the experiment. The results show that the pathway designed within the didactical structure functioned well for determining the speed of light in air. The problems encountered in the earlier version relating to the content no longer formed an obstacle and the students enjoyed doing the experiment. They seemed to be sufficiently aware of what they were doing and why they were doing it; they were able to develop the method of measurement for determining the speed of light in air autonomously and also reached the desired learning goals for this part of the material.

However, in the last part of the material where they developed the experimental method for other environments than air, some problems were detected. In this part the students received less support than in the prior part, and had to further develop the method in air to make it suitable for other substances. They were offered a choice to either do it fully autonomously, or to be guided by questions that gave some sense of the direction of the solution. Beforehand we were expected that only a limited group of students would be able to develop the method of measurement all by themselves. A few students did in fact actually appear to be capable of describing the method of measurement correctly. However, all the students chose to develop the method further on the basis of the questions. In the end all the students were, using the provided help, able to finish the experiment successfully, but a few of them did need some external help that went further than the support that was provided by the questions.

Concerning the more global learning target of gaining insight into the authentic

practice of an experimental physicist, it was found that the students were capable of naming the main elements of the practice.

### ***The functioning of the format elements***

In chapter 6 the results of the research on the functioning of the format elements (B-question) are presented. The research showed that both the website and its included format element functioned as they should have. Especially the ‘Where-am-I’-window and the question-, answer-, and feedback system were functional in supporting and guiding the students.

The ‘Where-am-I’-window made the students at all times aware of where they were in the material. Furthermore it provided access to formerly accessed pages, the answers they gave to the questions on those pages and the feedback they received.

The question-, answer-, and feedback system not only provided the students with proper feedback to their answers (which gave the students insight into their learning process), but also contributed to the students’ appreciation of the experiment. The open questions appeared to be an effective means to have the students both reflect back on, and look ahead, and reduce the recipe-like character.

Also, the standard structure of the pages which included first looking back to the previous screen and ended with looking ahead to what was to come, was experienced as functional by the students.

The webcams proved to be important for increasing the involvement of the students and giving them the idea of actually conducting an experiment.

The material also included facultative pages and animations. The facultative pages were functional in distinguishing the essential material from the facultative material, and therefore contributed to keeping track of the line through the material, but these were only read sporadically by the students.

The appreciation of the animations seemed to increase when the students visualised a new phenomenon, as this helped them to get a better idea of the phenomenon. Other animations were aimed at evoking pre-knowledge. However, as this knowledge was already defined, although these animations were not experienced as a hindrance, they did not evoke the pre-knowledge better or faster and were therefore experienced as less functional.

### ***Closing***

In Chapter 7 we seek to answer the global research question: What should a technically as well as didactically well functioning remote experiment look like?

The developmental research had led to a technically as well as didactically well functioning remote experiment. Two characteristics can be defined in the strategy

used: Firstly, designing the didactical structure within the theoretical framework of the problem posing theory making use of the idea of an authentic practice. Secondly, making use of format elements that support the didactical structure and take into account the remote character of the experiment. This strategy led to a final product with the following didactical characteristics:

- At a global level the line of reasoning through the material is made explicit and recognisable for the students, and the students are aware of what they are doing.
- At a more local level, the successive activities are well connected and the sequence of activities make the students see the point of what they are doing.
- The product is set up in such a way that it requires the students to adopt an active attitude while conducting the experiment autonomously.

The chapter ends with some suggestions for further research. With regard to the observed constraints it was suggested to further investigate possibilities for openness. Also, it was suggested to further investigate whether the authentic practice of an experimental physicist might be made more productive in a sequence of experiments. The generalized didactical structure for a teaching-learning process of an experiment that was an outcome of the speed-of-light experiment might be valuable as a tool when developing new experiments in the learning-track.

# Bijlagen

Bijlage I	Lesmateriaal	240
Bijlage II	Facultatieve pagina's	261
Bijlage III	Onderbrekingen	267
Bijlage IV	Belevingsenquête	268
Bijlage V	Interview	269
Bijlage VI	Instructies voor het verslag	271



# Bijlage I Lesmateriaal

## scherm 00a

Experimenteren op afstand

## De lichtsnelheid

welkom   algemene info   docenten   **experiment** ✉

**Experimenteren via internet** - Via deze website bestuur je vanaf je eigen computer een meetopstelling. Die meetopstelling staat in het Minnaertgebouw van het Departement Natuur- en Sterrenkunde, een onderdeel van de Faculteit Bètawetenschappen van de Universiteit Utrecht. Op deze manier krijg je toegang tot een vrij complexe meetopstelling – te complex om zomaar op school te bouwen.

**Meetmethode ontwikkelen** - Het experiment bestaat uit drie delen. In het eerste deel gaat het om de vraag waarom het lastig is om de lichtsnelheid rechtstreeks te meten. In het tweede deel maak je kennis met de meetopstelling en ontwikkel je in drie stappen een geschikte meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Die drie stappen zijn:

1. het golfkarakter van licht gebruiken,
2. het lichtsignaal moduleren en
3. de systematische fout elimineren.

Bij elk van die stappen gaat het om het *bedenken en evalueren van een mogelijk geschikte meetopstelling en meetmethode*. Het eerste en tweede deel vormen samen een afgerond experiment. Maar je kunt nog meer doen: in het derde deel van het experiment maak je de meetopstelling en meetmethode geschikt voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht, namelijk perspex en water.

**Voorkennis** – Om het experiment uit te voeren, heb je voldoende voorkennis nodig van de volgende verschijnselen: trillingen en lopende transversale golven.



Het Minnaertgebouw (1) met daarin de opstelling voor experimenteren op afstand via internet (m). Een vergelijkbare opstelling staat ook in de practicumzaal van het [Bovenbouwpracticum](#) (2), maar om daarmee te werken moet je daar wel naartoe gaan.

Ben je geïnteresseerd geraakt en wil je het experiment gaan uitvoeren. Klik dan hieronder op aanmelden/inloggen om je aan te melden. Als je dat eenmaal gedaan hebt kun je onderstaande link later gebruiken om opnieuw in te loggen en verder te gaan waar je gebleven was.

### Naar aanmelden/inloggen

## scherm 00b

Aanmelden is nodig zodat je meettijd kunt reserveren. Bovendien zorgt het ervoor dat je altijd verder kunt waar je gebleven bent met het bestuderen van de stof en het beantwoorden van de vragen.

Geef hieronder je voor- en achternaam en verzin een wachtwoord. Deze worden dan geregistreerd en je wordt automatisch binnengelaten in het systeem.

Heb je je al eerder aangemeld? Vul hieronder dan je gegevens in zodat het systeem je direct brengt naar waar je de vorige keer gebleven bent.

### Aanmelden/inloggen

Voornaam:

Achternaam:

Wachtwoord:

## scherm 00a

Klik op de 'begin'-knop hieronder om te starten met het uitzoeken van een meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid om vervolgens ook zelf deze metingen uit te gaan voeren.

Via het **'Waar ben ik'**-window kun je steeds zien hoe ver je bent. Wanneer je klikt op een pagina die je al gedaan hebt kun je ook nog teruglezen wat je eerder bestudeerd hebt.

Als je geen tijd hebt alles in 1 keer af te maken kun je later opnieuw inloggen en word je vanzelf gebracht naar de plek waar je gebleven was.

Waar ben ik?
1. Lichtheid
• 1 Experimenteren op afstand
• 2 Meettijd reserveren
• 3 Lichtsignaal meten
• 4 Licht als golfverschijnsel
• 5 Lichtheid in lucht
• 6 Lichtheid in perspex
• 7 Lichtheid in water

## scherm 01

### 1. Lichtsnelheid | 1. Experimenteren op afstand

**Meetmethode ontwikkelen** – Het experiment bestaat uit drie delen. In het eerste deel gaat het om de vraag waarom het lastig is om de lichtsnelheid rechtstreeks te meten. In het tweede deel ontwikkel je in drie stappen een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Die drie stappen zie je in het menu hiernaast: het golfkarakter van licht gebruiken, het lichtsignaal moduleren en de systematische fout elimineren. Bij elk van die stappen gaat het om het bedenken en evalueren van een mogelijk geschikte meetopstelling en meetmethode (zie ook Experimentele Fysica in het kader hieronder). Het eerste en tweede deel vormen samen een afgerond experiment. Maar je kunt nog meer doen: in het derde deel van het experiment maak je de meetopstelling en meetmethode geschikt voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht, namelijk perspex en water.

**Meettijd reserveren** – Om het experiment uit te voeren, moet je wel eerst meettijd reserveren – want de meetopstelling is natuurlijk niet door verschillende groepen tegelijkertijd te gebruiken.

#### Opdracht 1

Stel in overleg met je natuurkundedocent vast welke delen van het experiment je gaat uitvoeren: alleen het ontwikkelen van een meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht (deel 1 en 2) of ook voor de lichtsnelheid in perspex en water (deel 3). Klik daarna [meer informatie](#) om meettijd reserveren.

De tijd die je nodig hebt voor het voorbereiden van het experiment, het meten, het verwerken van de meetgegevens en het schrijven van het verslag ligt tussen de 6 en 10 uur, afhankelijk van het wel of niet uitvoeren van deel 3 en van de eisen die je docent aan het verslag stelt.

#### Experimentele Fysica

Het uitvoeren van dit experiment geeft je een beeld van het werk van een experimenteel fysicus. In de experimentele fysica gaat het onder andere om het bepalen van fundamentele natuurconstanten, zoals de lichtsnelheid, de gravitatieconstante en de constante van Planck. Een fundamentele natuurconstante zoals de lichtsnelheid speelt een belangrijke rol in de natuurkunde > [meer informatie](#). Maar het kan in de experimentele fysica ook gaan om het vaststellen van een relatie tussen twee grootheden, zoals het verband tussen de luchtwrijvingskracht op en de snelheid van een auto of een schaatser.

In dit experiment ga je zelf een deel van het werk van een experimenteel fysicus uitvoeren: het bedenken en evalueren van een meetopstelling en meetmethode. Dus: hoe zien een mogelijk geschikte meetopstelling en meetmethode voor – in dit geval – de lichtsnelheid in lucht en andere media er uit, en leveren die de juiste resultaten? En zo niet: hoe moeten die meetopstelling en meetmethode dan worden aangepast om wel de juiste resultaten te leveren? Dit soort vragen zul je vaker tegenkomen, bijvoorbeeld in een experimenteel onderzoek in het kader van je profielwerkstuk.

verder →

## scherm 02

### 1. Lichtsnelheid | 2. Lichtsnelheid meten

De waarde van de lichtsnelheid  $c$  is bekend:  $3,0 \cdot 10^8$  m/s in vacuüm en lucht. Dat is nogal groot. En dat roept de vraag op hoe je zoiets groots als de lichtsnelheid nu eigenlijk kunt meten.

#### Opdracht 2

Wat zijn je eerste ideeën over een manier waarop je de lichtsnelheid zou kunnen meten?

*Jouw antwoord:*

**bepalen van afstand en tijd**

*Controleer zelf je antwoord:*

Je eerste ideeën over een manier om de lichtsnelheid te meten zijn waarschijnlijk dezelfde als die van vele wetenschappers uit het verleden, en sluiten aan bij hoe je gewend bent om snelheid te meten: meten van de tijdsduur  $\Delta t$  die het licht nodig heeft voor het afleggen van een afstand  $\Delta s$ , en dan de lichtsnelheid  $c$  berekenen met  $c = \Delta s / \Delta t$ . Dat is de manier waarop Galileo Galilei als eerste probeert om de lichtsnelheid te bepalen.



Galileo Galilei

Galileo Galilei (1564-1642) is de eerste wetenschapper die een manier bedenkt om de lichtsnelheid te bepalen, namelijk: door het meten van de tijd die het licht nodig heeft om een bekende afstand tussen twee heuveltoppen af te leggen. Hij zet een assistent met een lantaarn op de ene heuveltop en gaat zelf met een tweede lantaarn op de andere heuveltop staan. De assistent krijgt de opdracht om de kap van zijn lantaarn weg te halen op het moment dat hij het licht van Galileo's lantaarn ziet. Galileo wil met een zandloper de tijd meten tussen het moment dat hij zelf de kap van zijn lantaarn haalt en het moment dat hij het licht van de lamp van zijn assistent ziet. Die tijd blijkt zo kort dat Galileo

de conclusie trekt dat de gemeten tijd een gevolg is van de menselijke reactietijd en dat de lichtsnelheid wel erg groot moet zijn. Latere – en meer succesvolle – pogingen zijn van Ole Rømer (1644-1710) die een schatting maakt van de lichtsnelheid op grond van astronomische waarnemingen aan de beweging van de maan lo rond de planeet Jupiter en van Albert A. Michelson (1852-1931) die de lichtsnelheid bepaalt met behulp van een vaste en een roterende spiegel op een



Meetopstelling van Galilei voor het bepalen van de lichtsnelheid

twee taal bergtoppen op een onderlinge afstand van zo'n 35 km > [meer informatie](#).

#### Opdracht 3

Leg uit waarom het Ole Rømer en Albert A. Michelson – in tegenstelling tot Galileo Galilei – wel lukt om de lichtsnelheid te bepalen.

*Jouw antwoord:*

**betere apparatuur, grotere afstanden**

*Controleer zelf je antwoord:*

De door Ole Rømer en Albert A. Michelson gebruikte meetmethode is vergelijkbaar met die van Galileo Galilei: de lichtsnelheid  $c$  bepalen door meting van  $\Delta s$  en  $\Delta t$ . Het verschil is dat zij met een veel grotere afstand  $\Delta s$  werken, waardoor de tijdsduur  $\Delta t$  groter en dus beter te meten is.

#### Opdracht 4

Galilei moest de tijd meten met een zandloper. Tegenwoordig bestaat er voor zo'n tijdmeting natuurlijk meer geavanceerde apparatuur. Stel dat je het experiment van Galilei herhaalt met apparatuur waarmee je een tijdsduur van 0,001 s nauwkeurig kan meten. Hoe ver zouden je assistenten dan uit elkaar moeten staan om de lichtsnelheid te kunnen meten?

✓ *Jouw antwoord:* **300 km**

Dit antwoord is juist. Voor de afstand die het licht aflegt in een tijdsduur  $\Delta t$  van 0,001 s geldt:  $c = \Delta s / \Delta t$   $\Delta s = c \Delta t = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,001 = 3 \cdot 10^5$  m. De twee lantarens zouden dus zo'n 300 km uit elkaar moeten staan. En dat is nogal ver – zo ver dat Galilei en zijn assistent het licht van de lantarens niet eens meer kunnen zien.

Het zal duidelijk zijn dat een meetmethode voor de lichtsnelheid vraagt om óf een grote afstand tussen lichtbron en lichtdetector óf een zeer nauwkeurig meetinstrument voor een extreem korte tijd. In een laboratorium is die afstand vrij beperkt. Daardoor is voor de tijdmeting zeer geavanceerde apparatuur nodig – zo geavanceerd dat we deze in dit experiment niet tot onze beschikking hebben. We moeten dus iets anders bedenken...

verder →

## scherm 03

### 1. Lichtsnelheid | | 3. Licht als golfverschijnsel



Christiaan Huygens  
(1629-1695)

Het bepalen van de lichtsnelheid uit een meting van afstand en tijd is praktisch niet uitvoerbaar – tenminste: niet op laboratoriumschaal zonder zeer geavanceerde meetapparatuur. Is die lichtsnelheid dan op een andere manier te bepalen? Is er een theorie over het karakter van licht die we daarvoor kunnen gebruiken? Het antwoord op die vraag is: ja, zo'n theorie is er – de theorie over het golfkarakter van licht. In de zeventiende eeuw is Christiaan Huygens (1629-1695) op zoek naar een verklaring voor de breking van licht aan het grensvlak van twee doorzichtige stoffen. Hij kan dit verschijnsel uiteindelijk verklaren door aan te nemen dat licht een golfkarakter heeft. Zoals je weet is er dan volgens de theorie van trillingen en golven 'iets' dat trilt met een frequentie  $f$ . Die trilling veroorzaakt een lopende golf met een golflengte  $\lambda$  die zich met de golfsnelheid  $v$  voortplant door een medium – lucht, glas, water of nog iets anders. Bij licht zou die golfsnelheid dan de lichtsnelheid  $c$  zijn. Volgens de theorie van trillingen en golven is er tussen die drie grootheden – frequentie, golflengte en lichtsnelheid – een bepaalde relatie. Een relatie die mogelijk bruikbaar is bij het ontwikkelen van een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid.

#### Opdracht 5

Wat is volgens de theorie van trillingen en golven de relatie tussen de frequentie  $f$ , de golflengte  $\lambda$  en de lichtsnelheid  $c$ ? Vul hieronder de juiste formule in door op de beschikbare symbolen te **klikken**.

(Vergeet niet het vermenigvuldigingsteken  $\times$  te gebruiken bij een vermenigvuldiging.)

✓ *Jouw antwoord:*  $c = \lambda \times f$

De juiste relatie is inderdaad  $c = \lambda \times f$ .

Met gebruik van de theorie over het golfkarakter van licht en de theorie over trillingen en golven is dus de lichtsnelheid te bepalen door het meten van de golflengte en de frequentie. Misschien heb je in de natuurkundelessen al eens eerder net zoiets gedaan: het meten van de golfsnelheid in een snaar (> [meer informatie](#)). Het bepalen van de lichtsnelheid uit een meting van golflengte en frequentie levert echter meer problemen dan het bepalen van de golfsnelheid in een snaar. De trilling van een snaar is zichtbaar te maken, zodat je de golflengte kunt meten. En de frequentie is te bepalen uit een weergave van het geluid van de trillende snaar op het scherm van een oscilloscoop. Maar hoe doe je dat dan bij licht? Een eerste probleem is: hoe meet je de golflengte en de frequentie van een lichtgolf? En daarbij komt nog een tweede probleem: de grootte-orde van de golflengte en de frequentie van licht.

#### Opdracht 6

In de meetopstelling van dit experiment gebruiken we rood licht.

Hoe groot is (ongeveer) de golflengte van rood licht?

✓ *Jouw antwoord:* **650 nm**

Correct, de golflengte is inderdaad in de orde van 700 nm.

Hoe groot is (ongeveer) de frequentie van rood licht? ( $k=1 \cdot 10^3$ ,  $M=1 \cdot 10^9$ ,  $G=1 \cdot 10^9$ ,  $T=1 \cdot 10^{12}$ )

✓ *Jouw antwoord:* **450 THz**

Correct, de frequentie van rood licht is ongeveer 400 THz

Welke problemen voorzie je bij het meten van deze golflengte en frequentie?

*Jouw antwoord:*

**Respectievelijk heel klein/heel groot**

*Controleer zelf je antwoord:*

Zoals je bij de voorgaande twee vragen gezien hebt, is de golflengte van licht wel heel erg klein en de frequentie heel erg groot. Het meten van die twee grootheden zou dus wel eens lastig kunnen zijn. Maar bovendien: hoe zijn die twee grootheden eigenlijk te meten?

Hiermee is deel 1 van dit experiment afgerond. Je weet nu hoe groot de lichtsnelheid is, en waarom deze niet zo eenvoudig te bepalen is uit een meting van afstand en tijd. Je hebt bovendien het idee dat de theorieën over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven mogelijk bruikbaar zijn bij het ontwikkelen van een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid. Maar je realiseert je ook dat je dan tegen meetproblemen oploopt: hoe meet je de (kleine) golflengte en de (grote) frequentie van licht? In deel 2 van dit experiment ga je die problemen in drie stappen oplossen.

verder →

## scherm 04

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 1. Inleiding

**Hoofdvraag** – De hoofdvraag bij dit experiment is: wat is een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht en andere media? Deel 1 van dit experiment suggereert dat je mogelijk het golfkarakter van licht kunt gebruiken. Dat ga je dan ook doen in dit deel 2 van het experiment.

**Deelvragen** – Voor het beantwoorden van de hoofdvraag zijn drie stappen nodig. Die stappen zie je in het menu hiernaast bij 2.2, 2.3 en 2.4. Bij de eerste stap (2.2) zoek je – volgens de suggestie in deel 1 van dit experiment – een antwoord op de volgende deelvraag:

• *Hoe gebruiken we de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven?*

Bij toepassing van het idee over het gebruik van deze theorie zal blijken dat er een probleem is met het meten van de (kleine) golflengte van het licht. Een oplossing voor dat probleem is het manipuleren van het lichtsignaal.

Bij de tweede stap (2.3) zoek je dus een antwoord op de volgende deelvraag:

• *Hoe manipuleren we het lichtsignaal om die theorie te kunnen gebruiken?*

Bij toepassing van het idee over het manipuleren van het lichtsignaal zal blijken dat er een probleem is met de metingen: er zit een systematische fout in. Bij de derde stap (2.4) zoek je dus een antwoord op de volgende deelvraag:

• *Hoe elimineren we de optredende systematische fout in de metingen?*

Met het antwoord op deze deelvragen heb je aan het eind van deel 2 van het experiment een meetopstelling en meetmethode die de juiste waarde van de lichtsnelheid in lucht opleveren. En die bouw je daarna in deel 3 van dit experiment verder uit tot een meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media, zoals perspex en water.

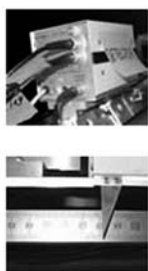
**Werkwijze** – In het menu hiernaast zie je dat elk van de drie stappen in deel 2 en ook deel 3 van dit experiment steeds bestaat uit drie onderdelen: eerst het bekijken van de meetopstelling, daarna het ontwikkelen van de meetmethode en ten slotte het evalueren van die meetmethode.

verder →

## scherm 05

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 2. Golfkarakter gebruiken | Meetopstelling

Hieronder zie je een foto van de meetopstelling die je gaat gebruiken. Deze meetopstelling bestaat uit drie onderdelen: een lichtbron, een detector en enkele media.



De *lichtbron* bevat een diode die rood licht uitzendt. Dit licht valt op de *detector* met een fotodiode. De lens voor de lichtbron zorgt voor een evenwijdige lichtbundel en de lens voor de detector zorgt voor het concentreren van deze lichtbundel op de fotodiode. De elektronische schakelingen in de lichtbron en de detector zetten het uitgezonden en ontvangen lichtsignaal om in een elektrisch signaal. Die twee signalen gaan via coaxkabels naar een computer – en die twee coaxkabels zullen later in dit experiment nog voor onverwachte problemen gaan zorgen.

De op afstand bestuurbare meetopstelling (links), de detector (rechtsboven) en de aflezing van de positie van de lichtbron op de rail (rechtsonder).

Het verwerkingsprogramma in de computer registreert de twee signaalspanningen als functie van de tijd. Het kan daaruit het faseverschil tussen de twee signalen berekenen. De lichtbron kan naar voren of naar achteren bewegen over een rail. De afstand tussen de lichtbron en de detector is af te lezen op de schaalverdeling op de rail. Deze afstand is minimaal 64 en maximaal 88 cm. De meetopstelling staat in lucht. Maar tussen de lichtbron en de detector zijn verschillende media te schuiven: een perspex staaf, een buis met water tussen twee glasplaatjes en een buis met alleen de twee glasplaatjes. Deze media gebruik je niet in dit deel 2 van het experiment, waarin het gaat om de lichtsnelheid in lucht. In deel 3 van dit experiment ga je ze wel gebruiken.

**Metten via internet** - Vanaf je eigen computer heb je via internet toegang tot de computer die in de meetopstelling staat. Daardoor heb je de beschikking over de meetgegevens die deze computer registreert. Op dezelfde manier kun je de computer in de meetopstelling ook opdracht geven om de afstand tussen de lichtbron en de detector te veranderen en/of een bepaald medium tussen de lichtbron en de detector te schuiven. Ten slotte kun je via die computer ook de camera bij de meetopstelling besturen.

verder →

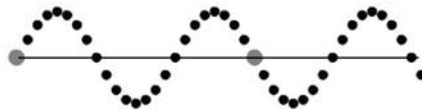
## scherm 06

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 2. Golfkarakter gebruiken | Meetmethode ontwikkelen

Hoe is met deze meetopstelling nu de lichtsnelheid te bepalen? In de meetopstelling is de afstand  $\Delta x$  tussen zender en detector in te stellen. Het idee achter de meetmethode is dat de lichtbron een lopende lichtgolf naar de detector stuurt, en dat de fasen van de lichttrilling bij de lichtbron en bij de detector van elkaar verschillen. Het verwerkingsprogramma in de computer kan dit faseverschil  $\Delta\phi$  tussen het uitgezonden en ontvangen lichtsignaal meten. De vraag is nu hoe je uit een meting van de afstand  $\Delta x$  en het daarbij gemeten faseverschil  $\Delta\phi$  de lichtsnelheid  $c$  kunt bepalen. Dat zoek je uit in de volgende twee opdrachten.

#### Opricht 7

Bekijk de volgende animatie van een lopende golf, en geef antwoord op de vragen die eronder staan.  
Een lopende golf



Hoe groot is het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee rood gemarkeerde punten van de lopende golf?

✓ *Jouw antwoord:* 1,5

Dit antwoord is juist. De afstand  $\Delta x$  tussen de twee rood gemarkeerde punten is gelijk aan anderhalve golflengte van de lopende golf. Voor het faseverschil tussen de twee punten geldt dan:  $\Delta\phi = 1,5$

Hoe verandert het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee rood gemarkeerde punten als je de afstand  $\Delta x$  tussen die twee punten groter maakt? Je kunt zo nodig in de animatie de afstand tussen de twee punten variëren.

✓ *Jouw antwoord:* Het faseverschil wordt groter

Dit antwoord is juist. Hoe groter de afstand  $\Delta x$  tussen de twee punten is, des te groter is het aantal golflengtes tussen de twee punten en des te groter is het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee punten.

Met welke formule kun je het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen twee punten met een onderlinge afstand  $\Delta x$  van een lopende golf berekenen?

Vul hieronder de juiste formule in door op de beschikbare symbolen te klikken.

Vergeet niet het vermenigvuldigingsteken  $\times$  te gebruiken bij een vermenigvuldiging.

✓ *Jouw antwoord:*  $\Delta\phi = \Delta x / \lambda$

Dit antwoord is juist. Voor het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen twee punten op een onderlinge afstand  $\Delta x$  in een lopende golf geldt:  $\Delta\phi = \Delta x / \lambda$ . Hierin is  $\lambda$  de golflengte van de lopende golf.

#### Opricht 8

Combineer de formules  $\Delta\phi = \Delta x / \lambda$  en  $c = \lambda \cdot f$  tot een nieuwe formule voor de lichtsnelheid  $c$  waarin de golflengte  $\lambda$  niet meer voorkomt.

Vul hieronder de juiste formule in door op de beschikbare symbolen te klikken.

Vergeet niet het vermenigvuldigingsteken  $\times$  te gebruiken bij een vermenigvuldiging.

✓ *Jouw antwoord:*  $c = f \times \Delta x / \Delta\phi$

Dit antwoord is juist. De eerste formule is te schrijven als  $\lambda = \Delta x / \Delta\phi$ . Dit invullen in de tweede formule levert:  $c = \lambda f = (\Delta x / \Delta\phi) f$ . In deze nieuwe formule voor de lichtsnelheid  $c$  komt de golflengte  $\lambda$  niet meer voor.

Met de formule uit opdracht 8 heb je een eerste stap gezet in de richting van een meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Want: als je de lichtbron en de detector in de meetopstelling opvat als twee punten van een lopende lichtgolf, dan is de afstand  $\Delta x$  tussen die twee punten te meten. Verder kan het verwerkingprogramma in de computer het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen die twee punten in de lichtgolf meten. Blijft over de vraag hoe je de frequentie  $f$  kunt meten. Dat probleem los je op in de tweede stap. Maar eerst zit je nog met een ander probleem: wat er tot nu toe is gezegd over het meten van dat faseverschil klopt niet helemaal...

verder →

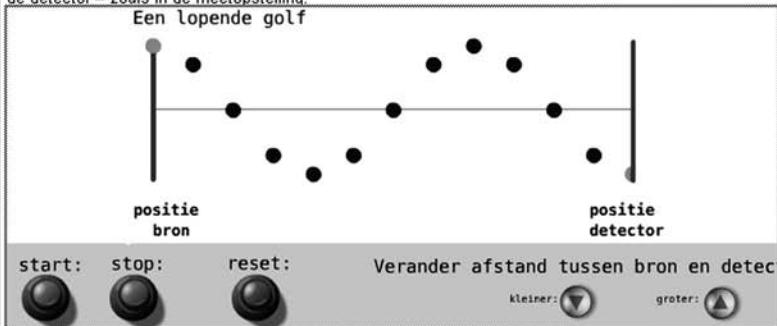
## scherm 07

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 2. Golfkarakter gebruiken | Meetmethode evalueren

De tot nu toe ontwikkelde meetmethode lijkt vrij eenvoudig: meet de afstand  $\Delta x$  en het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen twee punten (de lichtbron en de detector) in de lopende lichtgolf, en bepaal de lichtsnelheid  $c$  met de formule  $c = (\Delta x / \Delta\phi) \cdot f$  uit opdracht 8. Er is echter wel een probleem. Tot nu toe is gezegd dat het verwerkingsprogramma in de computer het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen twee punten (de lichtbron en de detector) in de lopende lichtgolf kan meten. Dat is niet helemaal juist. Het verwerkingsprogramma in de computer kan namelijk van de twee binnenkomende signalen (van de lichtbron en de detector) alleen de gereduceerde fase meten en daaruit het gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  tussen die twee punten berekenen. Of, met andere woorden: het verwerkingsprogramma in de computer kan niet 'zien' hoeveel volledige golven er tussen de lichtbron en de detector zitten. Het verwerkingsprogramma in de computer meet dus het gereduceerd faseverschil. De vraag is nu wanneer dat gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  gelijk is aan het faseverschil  $\Delta\phi$  uit de bij opdracht 8 gevonden formule. In de volgende opdracht ga je na wanneer het gereduceerd faseverschil en het faseverschil tussen twee punten op een lopende golf aan elkaar gelijk zijn, en tegen welk praktisch probleem je dan aanloopt.

**Opdracht 9**

In de volgende animatie van een lopende golf vallen de twee rood gemarkeerde punten samen met de lichtbron en de detector – zoals in de meetopstelling.



Bekijk de animatie, en geef antwoord op de volgende vragen. Je kunt daarbij zo nodig in de animatie de afstand tussen de zender en de detector variëren.

Hoe groot is het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee rood gemarkeerde punten van de lopende golf?

✓ *Jouw antwoord:* 1,5

Dit antwoord is juist. Het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee punten is 1,5.

Hoe groot is het gereduceerde faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  tussen de twee rood gemarkeerde punten van de lopende golf?

✓ *Jouw antwoord:* 0,5

Dit antwoord is juist. Het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee punten is 1,5. Het gereduceerde faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  is dan 0,5: het faseverschil min het aantal volledige golven tussen de twee punten.

Bij welke afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector is het faseverschil  $\Delta\phi$  even groot als het gereduceerde faseverschil  $\Delta\phi_{red}$ ?

✓ *Jouw antwoord:* De afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector moet **kleiner** zijn dan de golflengte  $\lambda$  van het lichtsignaal.

Dit antwoord is juist. Als de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector kleiner is dan de golflengte  $\lambda$  van het lichtsignaal, zit er minder dan één volledige golf tussen de lichtbron en de detector. In dat geval geldt:  $\Delta\phi_{red} = \Delta\phi$

Tegen welk praktisch probleem loop je nu aan, kijkend naar de beschikbare meetopstelling?

*Jouw antwoord:* afstand tussen bron en detector is minimaal 64 cm.

*Controleer zelf je antwoord:* Controleer je antwoord met behulp van de tekst hieronder.

De golflengte  $\lambda$  van (rood) licht is heel klein (grootte-orde  $7 \cdot 10^{-7}$  m). Het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  is alleen gelijk aan het faseverschil  $\Delta\phi$  als de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector kleiner is dan deze golflengte  $\lambda$ . In de meetopstelling is de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector minimaal 64 cm. En zelfs al zou je de lichtbron en de detector tegen elkaar aan kunnen zetten, dan nog is de afstand  $\Delta x$  te groot ten opzichte van die kleine golflengte. Dit praktische probleem los je op in de volgende, tweede stap bij het ontwikkelen van een meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid: het moduleren van het lichtsignaal. Dan zal blijken dat je tegelijkertijd ook een oplossing hebt voor het nog openstaande probleem van het meten van de frequentie  $f$ . En daarmee heb je dan alle grootheden die nodig zijn om de lichtsnelheid  $c$  in lucht met de formule uit opdracht 8 te bepalen.

zie volgende pagina voor vervolg van scherm 07

## vervolg scherm 07

**Experimentele Fysica**

Je hebt nu kennis gemaakt met één van de aspecten van het werk van een experimenteel fysicus: het gebruik van natuurkundige theorieën waarin de te meten grootheid een rol speelt. In dit geval: de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven, waarin de lichtsnelheid een rol speelt. Daarbij heb je ook gemerkt dat een grootheid als snelheid niet rechtstreeks te meten is (behalve met de snelheidsmeter van een fiets of auto). Je bepaalt een snelheid meestal door het meten van afstand en tijdsduur. En als dat – zoals in het geval van de lichtsnelheid – niet gaat lukken, stap je op grond van de bijbehorende theorie over op het meten van afstand, gereduceerd faseverschil en frequentie.

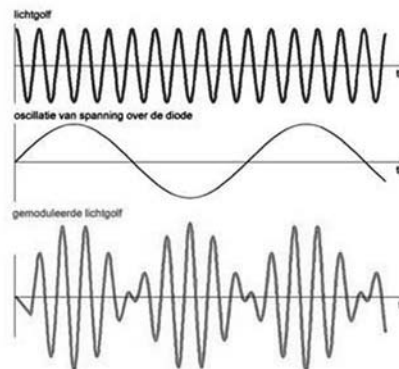
verder →

## scherm 08

## 2. Lichtsnelheid in lucht | 3. Lichtsignaal moduleren | Meetopstelling &amp;nbs

De oplossing van het praktische probleem van een te grote afstand tussen lichtbron en detector (namelijk:  $\Delta x > \lambda$ ) is het 'oprekken' van de golflengte van het lichtsignaal. Als je die golflengte groter kunt maken dan de afstand tussen lichtbron en detector (grootte-orde 1 m), zal het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\varphi_{red}$  even groot zijn als het faseverschil  $\Delta\varphi$  van het lichtsignaal bij de lichtbron en de detector – en kun je met de formule  $c = (\Delta x / \Delta\varphi) \times f$  de lichtsnelheid bepalen.

Dit 'oprekken' van de golflengte doe je door het lichtsignaal te *moduleren*. De truc is om de spanning over de diode in de lichtbron periodiek te variëren, waardoor de intensiteit van het licht varieert. Of, in termen van het golfkarakter van licht: waardoor de amplitude van het lichtsignaal varieert. Het principe van moduleren zie je in de figuur hiernaast. Het bovenste plaatje geeft de lichtgolf, het middelste plaatje de variërende spanning over de diode. Als we die twee bij elkaar 'optellen' ontstaat de gemoduleerde lichtgolf van het onderste plaatje. De frequentie  $f_{mod}$  waarmee de spanning over de diode oscilleert is ingesteld op een waarde die veel kleiner is dan de frequentie  $f$  van het licht. Daardoor is de golflengte  $\lambda_{mod}$  van de 'amplitude-trilling' veel groter dan de golflengte  $\lambda$  van het licht. De meetopstelling is zo ingesteld dat deze het gereduceerd faseverschil in deze langere golf meet. Of, met andere woorden: de meetopstelling meet aan de modulatie in de lichtgolf, en niet aan de lichtgolf zelf. Deze truc van het lichtsignaal moduleren en de meetopstelling laten meten aan de modulatie in de lichtgolf roept op zijn minst twee vragen op:

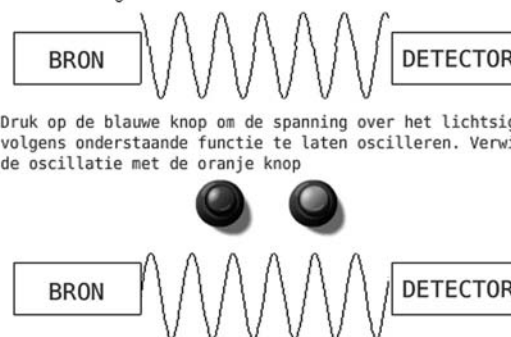


- is de snelheid van deze modulatie in de lichtgolf wel gelijk aan de lichtsnelheid, en
- is de golflengte van de modulatie in de lichtgolf lang genoeg?

Dat zoek je uit in de volgende twee opdrachten.

**Opdracht 10**

In de volgende twee animaties van een lopende golf tussen lichtbron en detector is het lichtsignaal nog niet gemoduleerd. In beide animaties zie je hoe snel het lichtsignaal beweegt. In de onderste animatie kun je het moduleren van het lichtsignaal aan en uit zetten.



Druk op de blauwe knop om de spanning over het lichtsignaal volgens onderstaande functie te laten oscilleren. Verwijder de oscillatie met de oranje knop

zie volgende pagina voor vervolg van scherm 08



## vervolg van scherm 08

Zet het moduleren van het lichtsignaal in de onderste animatie aan. Controleer in de animatie dat de golflengte van de modulatie in de lichtgolf groter is dan de golflengte van het licht.

Zet het moduleren van het lichtsignaal in de onderste animatie aan. Controleer in de animatie dat de golflengte van de modulatie in de lichtgolf groter is dan de golflengte van het licht.

Vergelijk de snelheid van de modulatie in de lichtgolf met de snelheid van het licht. Welke conclusie trek je?

✓ *Jouw antwoord:* De snelheid van de modulatie in de lichtgolf is **even groot als de lichtsnelheid**.

Dit antwoord is juist. De snelheid van de modulatie in de lichtgolf is even groot als de lichtsnelheid. Het veranderen van de amplitude van de lichtgolf door het moduleren heeft geen invloed op de snelheid van de lichtgolf.

### Opdracht 11

Met behulp van de elektronica in de meetopstelling is de modulatiefrequentie  $f_{\text{mod}}$  ingesteld op 50 MHz.

Hoe groot is dan de golflengte van de modulatie in de lichtgolf? Gebruik bij je berekening de waarde van de lichtsnelheid:  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s.

✓ *Jouw antwoord:* **6 m**

Dit antwoord is juist. Want:  $c = \lambda \cdot f > \lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 50 \cdot 10^6 = 6$  m.

Is deze golflengte van de modulatie in de lichtgolf lang genoeg? Leg uit waarom wel/niet.

*Jouw antwoord:* **ja want afstand tussen bron en detector is 0.86m**

*Controleer zelf je antwoord:* Door het moduleren van de lichtgolf met een frequentie van 50 MHz is de golflengte van de modulatie in de lichtgolf voldoende 'opgerek't' (grootte-orde 5 m). De golflengte van de modulatie in de lichtgolf is namelijk groter dan de afstand tussen lichtbron en detector (grootte-orde 1 m), zodat het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{red}}$  gelijk is aan het faseverschil  $\Delta\varphi$  tussen lichtbron en detector.

De lichtbron in de meetopstelling levert een gemoduleerde lichtgolf. En de meetopstelling meet aan de modulatie in de lichtgolf. De snelheid van deze modulatie in de lichtgolf is gelijk aan de lichtsnelheid. En de golflengte van de modulatie is groter dan de afstand tussen lichtbron en detector, zodat het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{red}}$  gelijk is aan het faseverschil  $\Delta\varphi$  tussen lichtbron en detector. Het idee van het moduleren van de lichtgolf in deze meetopstelling komt voor een 'experimenteel fysicus' niet uit de lucht vallen. Het moduleren van golven speelt namelijk een belangrijke rol bij het verzenden van radio- en tv-signalen via een zogenaamde draaggolf >[meer informatie](#). Verder is ook het door de computer laten meten van het faseverschil tussen twee signalen (van lichtbron en detector) voor een experimenteel fysicus een standaardtechniek >[meer informatie](#).

Dan is het nu ten slotte nog de vraag hoe je de eerder ontwikkelde meetmethode moet aanpassen voor het meten van de lichtsnelheid met deze gemoduleerde lichtgolf.

verder →

## scherm 09

## 2. Lichtsnelheid in lucht | 3. Lichtsignaal moduleren | Meetopstelling

De oplossing van het praktische probleem van een te grote afstand tussen lichtbron en detector (namelijk:  $\Delta x > \lambda$ ) is het 'oprekken' van de golflengte van het lichtsignaal. Als je die golflengte groter kunt maken dan de afstand tussen lichtbron en detector (grootte-orde 1 m), zal het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  even groot zijn als het faseverschil  $\Delta\phi$  van het lichtsignaal bij de lichtbron en de detector – en kun je met de formule  $c = (\Delta x / \Delta\phi) \times f$  de lightsnelheid bepalen.

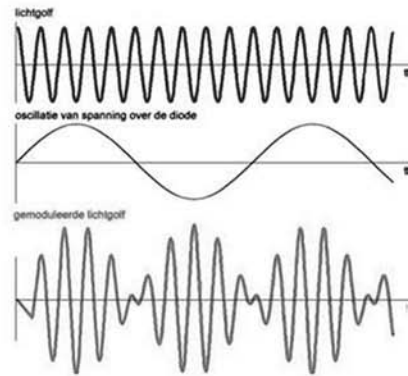
Dit 'oprekken' van de golflengte doe je door het lichtsignaal te *moduleren*. De truc is om de spanning over de diode in de lichtbron periodiek te variëren, waardoor de intensiteit van het licht varieert. Of, in termen van het golfkarakter van licht: waardoor de amplitude van het lichtsignaal varieert. Het principe van moduleren zie je in de figuur hiernaast. Het bovenste plaatje geeft de lichtgolf, het middelste plaatje de variërende spanning over de diode. Als we die twee bij elkaar 'optellen' ontstaat de gemoduleerde lichtgolf van het onderste plaatje.

De frequentie  $f_{mod}$  waarmee de spanning over de diode oscilleert is ingesteld op een waarde die veel kleiner is dan de frequentie  $f$  van het licht. Daardoor is de golflengte  $\lambda_{mod}$  van de 'amplitude-trilling' veel groter dan de golflengte  $\lambda$  van het licht. De meetopstelling is zo ingesteld dat deze het gereduceerd faseverschil in deze langere golf meet. Of, met andere woorden: de meetopstelling meet aan de modulatie in de lichtgolf, en niet aan de lichtgolf zelf.

Deze truc van het lichtsignaal moduleren en de meetopstelling laten meten aan de modulatie in de lichtgolf roept op zijn minst twee vragen op:

- is de snelheid van deze modulatie in de lichtgolf wel gelijk aan de lightsnelheid, en
- is de golflengte van de modulatie in de lichtgolf lang genoeg?

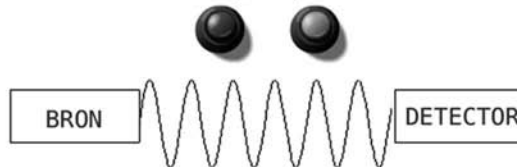
Dat zoek je uit in de volgende twee opdrachten.

**Opdracht 10**

In de volgende twee animaties van een lopende golf tussen lichtbron en detector is het lichtsignaal nog niet gemoduleerd. In beide animaties zie je hoe snel het lichtsignaal beweegt. In de onderste animatie kun je het moduleren van het lichtsignaal aan en uit zetten.



Druk op de blauwe knop om de spanning over het lichtsignaal volgens onderstaande functie te laten oscilleren. Verwijder de oscillatie met de oranje knop



Zet het moduleren van het lichtsignaal in de onderste animatie aan. Controleer in de animatie dat de golflengte van de modulatie in de lichtgolf groter is dan de golflengte van het licht.

verder →

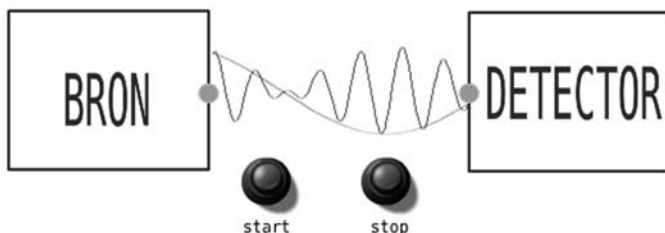
## scherm 10

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 3. Lichtsignaal moduleren | Meetmethode ontwikkelen

Bij de start van dit onderdeel 2.3 is gezegd dat het golfkarakter van licht de mogelijkheid geeft om de lichtsnelheid in lucht te bepalen met de formule  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f$ . Maar nu je weet dat de meetopstelling werkt met een gemoduleerde lichtgolf, moet je deze formule nog iets aanpassen. Dat doe je in de volgende opdracht.

#### Opdracht 12

In de volgende animatie zie je nogmaals voor alle duidelijkheid wat de meetopstelling meet: het gereduceerd faseverschil tussen de twee groene punten (bij de lichtbron en bij de detector) van de modulatie in de lichtgolf. Om de animatie duidelijker te maken is de golflengte van de modulatie in de lichtgolf en de afstand tussen zender en detector zijn in deze animatie niet geheel op schaal. De golflengte van het licht is in de animatie naar verhouding veel te groot.



Controleer in de animatie dat de golflengte van de modulatie in de lichtgolf groter is dan de afstand tussen de lichtbron en detector. Eerder is gezegd dat de lichtsnelheid in lucht te bepalen is met de formule  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f$ . Welke frequentie moet nu in deze formule worden ingevuld: de frequentie  $f$  van het licht of de frequentie  $f_{mod}$  van de modulatie in de lichtgolf?

✓ *Jouw antwoord:* De in de formule in te vullen frequentie is  $f_{mod}$

Dit antwoord is juist. De meetopstelling meet het gereduceerd faseverschil tussen twee punten van de modulatie in de lichtgolf. De bijbehorende frequentie is dan de modulatiefrequentie  $f_{mod}$  van 50 MHz.

Met het moduleren van het lichtsignaal in de meetopstelling heb je weer een stap gezet in de richting van een meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Want: de frequentie  $f_{mod}$  van de modulatie in de lichtgolf is bekend, de afstand  $\Delta x$  tussen de lichtbron en detector is te meten in de meetopstelling, het faseverschil  $\Delta \varphi$  tussen lichtbron en detector is gelijk aan het gereduceerd faseverschil  $\Delta \varphi_{red}$  en dit gereduceerd faseverschil is met de meetopstelling te meten. En daarmee heb je dan alle grootheden die nodig zijn om de lichtsnelheid in lucht met de formule uit opdracht 12 te bepalen. De vraag is nu: levert dit de juiste resultaten? Daarmee is het tijd voor de eerste meetsessie...

verder →

## scherm 11

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 3. Lichtsignaal moduleren | Meetmethode evalueren

In opdracht 12 heb je gezien dat het moduleren van de lichtgolf met een frequentie  $f_{\text{mod}}$  van 50 MHz de mogelijkheid geeft om de lichtsnelheid in lucht te bepalen met de formule  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) f_{\text{mod}}$ . Dat doe je in de volgende opdracht. Maar dat is niet voor niets opdracht 13...

#### Opdracht 13

Roep hieronder de meetsite op voor het evalueren van de ontwikkelde meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Controleer met de camera dat er geen medium tussen de lichtbron en detector staat.

- Meet driemaal het gereduceerd faseverschil  $\Delta\varphi_{\text{red}}$  bij steeds dezelfde afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector (klik in het meetprogramma op punt accepteren om werkelijk een meting te doen, klik op data opslaan om de meetgegevens in een datafile op de server op te slaan). Bepaal uit die metingen de waarde van de lichtsnelheid  $c$ . Vul het resultaat van je metingen en berekening hieronder in.

Klik [hier](#) om de meetsite op te roepen [gebruik de username en het wachtwoord die je vanochtend gekregen hebt].

<i>Jouw antwoord:</i>	Afstand (in m):	Faseverschil:	
	0.86	0.229	<i>Lichtsnelheid:</i> $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
	0.86	0.229	
	0.86	0.230	

- Levert het evalueren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht het resultaat dat je had verwacht? Waarom wel of niet? Geef hieronder je antwoord.

*Jouw antwoord:* **nee, zou snelheid van  $3 \cdot 10^8$  verwachten**

*Controleer zelf je antwoord:* Het uitvoeren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht levert nog niet het gewenste resultaat: de grootte-orde klopt wel (grootte-orde  $10^8 \text{ m/s}$ ), maar de precieze waarde duidelijk nog niet.

Het evalueren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht levert toch nog niet het juiste resultaat. Er is dus nog iets mis met de metingen of met de meetmethode of met de meetopstelling... Dat probleem ga je in de volgende (en laatste) stap in onderdeel 2.4 oplossen.

#### Experimentele fysica

Je hebt nu kennis gemaakt met een ander aspect van het werk van een experimenteel fysicus: het manipuleren van signalen in de meetopstelling. In dit geval: het moduleren van de amplitude van een lichtsignaal. Je hebt ook gemerkt dat je een ontwikkelde meetopstelling en meetmethode altijd moet evalueren: leveren die het juiste resultaat? In dit geval was dat vrij eenvoudig te doen door het meetresultaat te vergelijken met de bekende waarde van de lichtsnelheid. Maar 'het juiste resultaat' is natuurlijk meestal niet van tevoren bekend.

verder →

## scherm 12

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 4. Systematische fout elimineren | Meetopstelling

In onderdeel 2.3 heb je gezien dat het golfkarakter van licht de mogelijkheid geeft om het lichtsignaal te moduleren en om daarmee de lightsnelheid in lucht te bepalen met de formule  $c = (\Delta x / \Delta \varphi) \cdot f_{\text{mod}}$ . In deze formule is  $\Delta x$  de ingestelde afstand tussen de lichtbron en de detector,  $\Delta \varphi$  het faseverschil tussen de modulatie in het lichtsignaal bij de lichtbron en de detector (gelijk aan het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta \varphi_{\text{red}}$ ) en  $f_{\text{mod}}$  de gegeven modulatiefrequentie van het lichtsignaal.

Toch leveren de metingen een onjuiste waarde van de lightsnelheid op. Je kunt ervan uitgaan dat de theorie en de gebruikte formule goed zijn. En je hebt waarschijnlijk wel gecontroleerd of je geen rekenfouten hebt gemaakt. Dan moet er met die metingen iets mis zijn. Nu heb je bij een meting natuurlijk altijd te maken met een *meetonzekerheid*: het aflezen van meetapparatuur is nooit helemaal nauwkeurig. Maar je hebt het faseverschil driemaal gemeten, en dat levert elke keer ongeveer dezelfde waarde op. En bovendien: de uit het gemiddelde van die drie meetwaarden berekende lightsnelheid in lucht wijkt wel erg veel af van wat die zou moeten zijn. Teveel om dat aan die meetonzekerheid toe te schrijven. Wat kan er dan mis zijn gegaan? De apparatuur die je gebruikt kan een fout in je metingen veroorzaken door bijvoorbeeld de weerstand van meetinstrumenten of kabels of door verwarming van bepaalde onderdelen van de meetopstelling. Zo'n fout zal dan in elke meting optreden: er is sprake van een *systematische fout*. Zodra je weet hoe groot deze systematische fout is, kun je ervoor corrigeren. In de volgende opdracht bedenk je in welke gemeten grootheid zo'n systematische fout zou kunnen zitten.

#### Opricht 14

Bij de uitgevoerde meting van de lightsnelheid in lucht kan een systematische fout zitten in de grootheden  $\Delta x$ ,  $\Delta \varphi$  en/of  $f_{\text{mod}}$ .

In de meting van welke grootheid zou een systematische fout kunnen zitten? Geef een toelichting op je keuze: waarom juist in de meting van die grootheid?

*Jouw antwoord:*

*Er zit waarschijnlijk een systematische fout in de meting van  $\Delta x$  stel je zelf in en  $f_{\text{mod}}$  is gegeven door modulatie*

*Controleer zelf je antwoord:*

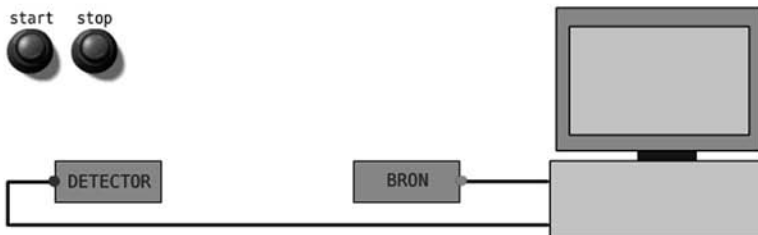
De afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector is ingesteld en is bovendien in de meetopstelling te controleren. Het is niet erg waarschijnlijk dat er in de meting van deze grootheid een systematische fout zit, maar het is ook weer niet helemaal uitgesloten. De modulatiefrequentie  $f_{\text{mod}}$  van 50 MHz is gegeven. Dit gegeven kan natuurlijk fout zijn, maar ook dat is niet erg waarschijnlijk. Blijft over een systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta \varphi$ .

Je hebt nu een idee van de grootheid waarbij het mis gaat. Maar je weet dat pas zeker als je weet waarom er in de meting van die grootheid een systematische fout zit.

De systematische fout zit in de meting van het faseverschil  $\Delta \varphi$ . Het probleem wordt veroorzaakt door een combinatie van twee factoren. Allereerst kost het doorgeven van de signalen van de lichtbron en de detector via de coaxkabels naar de computer tijd. En daarnaast hebben deze twee coaxkabels een verschillende lengte. De coaxkabel van de lichtbron naar de computer is korter dan de coaxkabel van de detector naar de computer. De computer krijgt het signaal van de detector dus met een bepaalde vertraging binnen. Welke gevolgen dat heeft voor het gemeten faseverschil kun je je proberen voor te stellen met de animatie in opdracht 15.

#### Opricht 15

Bekijk de volgende animatie van de manier waarop de signalen van lichtbron en detector bij de computer binnenkomen. In de animatie sturen de lichtbron en de detector steeds regelmatig hun signaal op hetzelfde tijdstip naar de computer. De computer zou het faseverschil tussen twee gelijktijdig *verstuurde* signalen moeten meten. Maar de computer meet het faseverschil tussen twee gelijktijdig *binnenkomende* signalen.



Zijn de signalen die gelijktijdig bij de computer binnenkomen ook gelijktijdig door de lichtbron en detector naar de computer verstuurd?

*Jouw antwoord:* **nee**

Dit antwoord is juist.

*zie volgende pagina voor vervolg van scherm 12*

## vervolg van scherm 12

Vergelijkt de computer het binnenkomende signaal van de lichtbron met een signaal dat de detector eerder of later naar de computer heeft verstuurd?

✓ *Jouw antwoord:* **eerder**

Dit antwoord is juist.

Is het faseverschil dat de computer meet dan te groot of te klein?

✓ *Jouw antwoord:* **te groot**

Dit antwoord is juist. De computer vergelijkt het binnenkomende signaal van de lichtbron met een signaal dat de detector eerder naar de computer heeft gestuurd. De fase van dit signaal is daardoor kleiner, en het faseverschil tussen de twee gelijktijdig binnenkomende signalen is daardoor groter dan het faseverschil tussen de twee gelijktijdig verzonden signalen dat de computer eigenlijk zou moeten meten. Het faseverschil dat de computer meet is dus te groot.

Is de lichtsnelheid die je met dat gemeten faseverschil berekent dan te groot of te klein?

✓ *Jouw antwoord:* **te klein**

Dit antwoord is juist. Het faseverschil  $\Delta\phi$  dat de computer meet is te groot. Invullen van deze te grote waarde van het faseverschil in de formule  $c = (\Delta x / \Delta\phi) f_{\text{mod}}$  levert als resultaat een te kleine waarde van de lichtsnelheid  $c$  op, omdat de te grote waarde van het faseverschil in de noemer van de breuk staat.

Klopt dit met het resultaat van de meting die je eerder hebt uitgevoerd?

*Jouw antwoord:* **ja**

*Controleer zelf je antwoord:* Als het 'goed' is heb je bij opdracht 13 een lichtsnelheid gemeten van ruwweg  $2 \cdot 10^8$  in plaats van  $3 \cdot 10^8$  m/s. Dus dit is inderdaad te klein.

Hoe kun je deze systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$  nu elimineren? De meest eenvoudige oplossing is natuurlijk: maak de twee kabels in de meetopstelling even lang. Maar dat krijg je vanachter je eigen computer in een meetopstelling op afstand niet voor elkaar. Wat je wel kunt doen is gebruik maken van het feit dat een systematische fout in de meting van een bepaalde grootheid altijd even groot is. In dit geval: het lengteverschil tussen de twee coaxkabels is steeds hetzelfde, dus zal de systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$  ook steeds hetzelfde zijn.

verder →

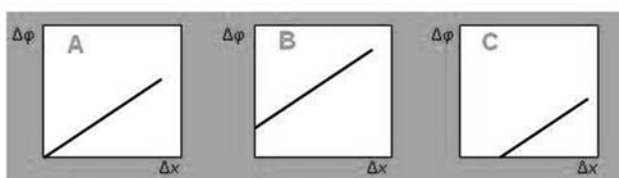
## scherm 13

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 4. Systematische fout elimineren | Meetmethode ontwikkelen

Voor het elimineren van de systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$  gebruik je de tot nu toe nog niet gebruikte eigenschap van de meetopstelling: de verplaatsbaarheid van de lichtbron. Je kunt daardoor het faseverschil meten bij verschillende afstanden tussen lichtbron en detector. En bij elk van die metingen is de systematische fout – het extra faseverschil als gevolg van de verschillen in kabellengte – even groot. Want: bij het verplaatsen van de lichtbron blijven de kabels even lang. In de volgende opdracht zet je ten slotte de laatste stap in het ontwikkelen van een meetmethode voor de lichtsnelheid.

#### Opricht 16

De meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht met de gegeven meetopstelling komt neer op het meten van het faseverschil  $\Delta\phi$  als functie van de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector. Volgens de formule  $c = (\Delta x / \Delta\phi) f_{\text{mod}}$  zal de relatie tussen  $\Delta x$  en  $\Delta\phi$  lineair moeten zijn (want  $c$  en  $f_{\text{mod}}$  zijn constanten). Hieronder zie je nu drie mogelijke uitkomsten van het meten van deze relatie.



zie volgende pagina voor vervolg van scherm 13

## vervolg van scherm 13

- Stel dat de kabels van de lichtbron en de detector naar de computer dezelfde lengte zouden hebben. Welke van de drie relaties zou dan het resultaat van de metingen zijn?

✓ *Jouw antwoord:* **A**

Dit antwoord A is juist. Als de twee coaxkabels even lang zijn, is er geen sprake van een systematische fout in de meting van  $\Delta\phi$ . In dat geval zal bij een afstand  $\Delta x = 0$  een meting van het faseverschil  $\Delta\phi = 0$  opleveren.

- In de meetopstelling is de kabel van de detector naar de computer langer dan de kabel van de lichtbron naar de computer. Welke van de drie relaties zal dan het resultaat van de metingen zijn?

✓ *Jouw antwoord:* **B**

Juist. Als de twee coaxkabels niet even lang zijn, zal een meting bij afstand  $\Delta x = 0$  een faseverschil  $\Delta\phi > 0$  opleveren.

- Hoe kun je uit het diagram van de gekozen relatie nu de grootte van de systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$  bepalen?

*Jouw antwoord:* **asafsnode**

*Controleer zelf je antwoord:* De grootte van de systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$  is in diagram B af te lezen bij het snijpunt van de lijn met de Y-as. Klopt dit met het antwoord wat je zelf gegeven hebt? Zo niet, lees dan verder > [meer informatie](#).

- Hoe kun je uit het diagram van de gekozen relatie nu de grootte van de lichtsnelheid bepalen?

*Jouw antwoord:* **richtingscoëfficiënt**

*Controleer zelf je antwoord:* De grootte van de lichtsnelheid is op twee manieren te bepalen uit een diagram als dat van diagram B:

- door de richtingscoëfficiënt van de lijn in diagram B te bepalen, want deze richtingscoëfficiënt is namelijk gelijk aan  $f_{\text{mod}}/c$ .

- Door een punt te kiezen op de lijn in diagram B, de bijbehorende waarde van  $\Delta\phi$  te corrigeren voor de (nu bekende) waarde van de systematische fout  $\Delta\phi_{\text{st}}$  en dan deze gecorrigeerde waarde te gebruiken in de formule  $c = (\Delta x / \Delta\phi) f_{\text{mod}}$ .

Klopt dit met het antwoord wat je zelf gegeven hebt? Zo niet, lees dan verder > [meer informatie](#).

Met de meetmethode uit opdracht 16 is de lichtsnelheid in lucht te bepalen. Want: je kunt de gemeten waarde van het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen lichtbron en detector nu corrigeren voor de systematische fout in deze meting. De vraag is nu: levert dit de juiste resultaten? Daarmee is het tijd voor de tweede meetsessie...

[verder →](#)

## scherm 14

### 2. Lichtsnelheid in lucht | 4. Systematische fout elimineren | Meetmethode evalueren

In opdracht 16 heb je gezien dat je de systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$  kunt elimineren door dit faseverschil te meten als functie van de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector. Dat doe je in de volgende opdracht.

#### Opdracht 17

Roep hieronder de meetsite op voor het evalueren van de ontwikkelde meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht. Controleer dat er geen medium tussen de lichtbron en detector staat.

- Meet het faseverschil  $\Delta\phi$  als functie van de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector. Bepaal uit het diagram van die metingen de waarde van de lichtsnelheid  $c$ . Vul het resultaat hieronder in.

*Je kunt je meetgegevens bewaren door op de meetsite op het icoontje 'data opslaan' te klikken. Ben je klaar met meten en wil je de meetgegevens gaan verwerken, klik dan in het les-window op 'Data verwerken/downloaden'. Vanaf daar kun je de data downloaden en vind je instructies om de gegevens in te lezen in Excel en te verwerken in Excel.*

*zie volgende pagina voor het vervolg van scherm 14*

## vervolg van scherm 14

Klik [hier](#) om de meetsite op de te roepen [gebruik de username en het wachtwoord die je vanochtend gekregen hebt].

Jouw antwoord:  $3 \cdot 10^8$  m/s

Levert het evalueren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht het resultaat dat je had verwacht? Waarom wel/niet?

Jouw antwoord: **ja want in buurt van literatuurwaarde**

Controleer zelf je antwoord: Als alles goed is, zou je nu op een lichtsnelheid in lucht van zo'n  $3 \cdot 10^8$  m/s moeten uitkomen. Als dit niet zo is: controleer je metingen, het diagram waarin je  $\Delta\phi$  en  $\Delta x$  tegen elkaar hebt uitgezet en/of de manier waarop je uit dat diagram de lichtsnelheid in lucht hebt bepaald.

Het evalueren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in lucht uit opdracht 16 levert het juiste resultaat. Dat betekent: je hebt bij de gegeven meetopstelling nu de juiste meetmethode gevonden. Daarmee is deel 2 van dit experiment bijna afgerond.

**Experimentele Fysica**

Je hebt nu kennis gemaakt met weer een ander aspect van het werk van een experimenteel fysicus: het zoeken naar systematische fouten in de meetgegevens. In dit geval: een systematische fout in de meting van het faseverschil als gevolg van een verschil in lengte van de coaxkabels in de meetopstelling. Bovendien heb je – zij het achteraf – gezien hoe je zo'n systematische fout kunt ontdekken: door de gemeten relatie tussen twee grootheden te vergelijken met de relatie volgens de theorie. In dit geval: de lijn die in het diagram van de meetwaarden het verband tussen afstand en faseverschil weergeeft gaat niet door de oorsprong, terwijl dat volgens de theorie wel zou moeten. En ten slotte heb je gezien hoe je in dat diagram dan voor zo'n systematische fout kunt corrigeren en de waarde van de gezochte grootheid kunt bepalen.

verder →

## scherm 15

## 2. Lichtsnelheid in lucht | 5. Afsluiting

In deel 2 van dit experiment heb je bij de beschikbare meetopstelling een meetmethode ontwikkeld voor de lichtsnelheid in lucht. Voordat je deze meetmethode verder gaat ontwikkelen voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht, is het handig om die meetmethode eerst even samen te vatten. Maar zo'n terugblik op wat je gedaan en geleerd hebt kan ook nuttig zijn voor een ander experimenteel onderzoek.

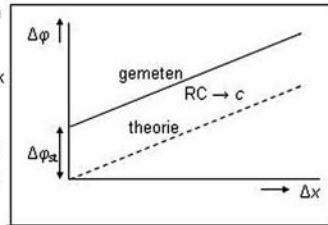
- Je deelt de hoofdvraag van het experiment op in deelvragen. Bij het zoeken naar een antwoord op elk van die deelvragen zet je een stap in de richting van het ontwikkelen en evalueren van een geschikte meetopstelling en meetmethode.
- Je gebruikt in de eerste stap een theorie waarin de lichtsnelheid  $c$  voorkomt: de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven.
- Je gebruikt een meetopstelling waarmee je het gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  tussen de signalen van de lichtbron en de detector kunt meten.
- Je koppelt de theorie over het golfkarakter van licht – met zijn formules  $\lambda = c \times f$  en  $\Delta\phi = \Delta x \lambda$  – aan wat je met de meetopstelling kunt meten:  $c = (\Delta x \Delta\phi) \times f$ . Maar bij de evaluatie van deze eerste stap blijkt dat er een probleem is: het gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  dat de meetopstelling kan meten is niet hetzelfde als het faseverschil  $\Delta\phi$  in de formule omdat de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector groter is dan de golflengte van het licht.
- Je lost dit probleem in de tweede stap op door het lichtsignaal in de meetopstelling te moduleren met een frequentie  $f_{mod}$ , zodat de golflengte in de modulatie van het lichtsignaal groter is dan de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector. Het moduleren van het lichtsignaal is een voorbeeld van het manipuleren van signalen > [andere voorbeelden](#).
- Je laat de meetopstelling meten aan de modulatie van het lichtsignaal, waardoor het gemeten gereduceerd faseverschil  $\Delta\phi_{red}$  gelijk is aan het faseverschil  $\Delta\phi$  in de formule:  $c = (\Delta x \Delta\phi) \times f_{mod}$ . Maar bij de evaluatie van deze tweede stap blijkt dat er een nieuw probleem is: er is sprake van een systematische fout in de meting van het faseverschil  $\Delta\phi$ , veroorzaakt door de bouw van de meetopstelling. In dit geval gaat het om een verschillende lengte van de coaxkabels van de lichtbron en de detector naar de computer > [andere voorbeelden](#)

zie volgende pagina voor het vervolg van scherm 15



## vervolg van scherm 15

- Je elimineert deze systematische fout in de derde stap door  $\Delta\phi$  te meten als functie van de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector.
- Je bepaalt de lichtsnelheid  $c$  uit de richtingscoëfficiënt van de lijn in het  $\Delta x, \Delta\phi$ -diagram. Uit de wiskundige beschrijving van deze lijn volgt namelijk dat die richtingscoëfficiënt gelijk is aan  $f_{mod}/c$ . Of je bepaalt de lichtsnelheid  $c$  door in het  $\Delta x, \Delta\phi$ -diagram te corrigeren voor de systematische fout  $\Delta\phi_{st}$ . Bij de evaluatie van deze derde stap blijkt dat je een geschikte meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid hebt gevonden.



### Oprichting 18

De stappen hierboven gaan over het ontwikkelen van een meetopstelling en meetmethode voor de lichtsnelheid. Misschien heb je vergelijkbare stappen zelf al eens eerder gezet in een ander experimenteel onderzoek. Geef daarvan hieronder een voorbeeld. Maar het mag ook meer dan één voorbeeld zijn.

*Jouw antwoord:* **geluidssnelheidsproef uit bovenbouwpracticum**

Hiermee is deel 2 van dit experiment afgerond. Je kunt nu in het volgende (en laatste) deel van het experiment deze meetmethode verder uitbouwen voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht.

### Experimentele Fysica

De stappen hierboven moet een experimenteel fysisch vaker zetten, ook bij de meting van andere grootheden dan de lichtsnelheid in lucht. Hij of zij gebruikt de theorie achter een fysisch verschijnsel, ontwikkelt een meetopstelling die op die theorie aansluit, manipuleert zo nodig de signalen die de meetopstelling levert, gaat op zoek naar en elimineert eventuele systematische fouten in de metingen en gebruikt de wiskunde om de gezochte waarde van een grootheid te bepalen (of om de relatie tussen twee grootheden te beschrijven).

verder →

## scherm 16

### 3. lichtsnelheid in andere media | | Meetopstelling &

Hoe bouw je nu de meetopstelling en meetmethode uit voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht?

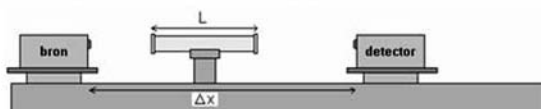


Het zou natuurlijk het makkelijkst zijn als je de hele meetopstelling 'onderdompelt' in het medium waarin je de lichtsnelheid wilt meten.

In dat geval zou je dezelfde meetmethode kunnen gebruiken als die voor het meten van de lichtsnelheid in lucht. Maar dat onderdompelen is in de praktijk niet uitvoerbaar. Het moet dus anders. In de meetopstelling kun je verschillende media – een perspex staaf, een buis met water tussen twee glasplaatjes en een buis met alleen de twee glasplaatjes – tussen de lichtbron en de detector schuiven.

Tussen de lichtbron en de detector zijn verschillende media te schuiven. Het eerste medium is perspex, het tweede water. Dit water zit in een buis, aan beide uiteinden afgesloten door een glasplaatje. In de tweede buis zitten alleen deze twee glasplaatjes, met daartussen lucht.

De lengte  $L$  van de verschillende media is 35,0 cm. Deze media vullen dus slechts een deel van de ruimte tussen de lichtbron en de detector, zoals hieronder te zien is.



Meetopstelling bij het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht.

Wat gebeurt er nu met het gemeten faseverschil  $\Delta\phi$  als je in de meetopstelling een medium als perspex of water tussen de lichtbron en de detector schuift? Dat zoek je uit in de volgende opdracht.

zie volgende pagina voor het vervolg van scherm 16

## vervolg van scherm 16

**Opdracht 19**

Bij de overgang van lucht naar een ander medium verandert wel de snelheid maar niet de frequentie van het licht. Dit geldt niet alleen voor de lichtgolf, maar ook voor de modulatie in de lichtgolf.

Wat gebeurt er met de lichtsnelheid bij een overgang van lucht naar een ander perspex of water?

✓ *Jouw antwoord:* De lichtsnelheid  $c_m$  in perspex of water is **kleiner dan** de lichtsnelheid  $c$  in lucht.

Juist. De lichtsnelheid in media met een dichtheid groter dan lucht is kleiner dan de lichtsnelheid in lucht.

Wat betekent dit voor de golflengte van licht in perspex ten opzichte van de golflengte van licht in lucht?

✓ *Jouw antwoord:* De golflengte  $\lambda_m$  van licht in perspex of water is **daardoor kleiner dan** de golflengte  $\lambda$  van licht in lucht.

Juist. De lichtsnelheid in perspex of water is kleiner dan de lichtsnelheid in lucht, zodat de golflengte in perspex of water kleiner is dan de golflengte in lucht. Want:  $c = \lambda f > \lambda = c/f$ . De frequentie  $f$  is in beide gevallen hetzelfde

Wat betekent dit voor het faseverschil?

✓ *Jouw antwoord:* Het faseverschil  $\Delta\phi_m$  tussen twee punten in een lopende golf in een ander medium dan lucht is **daardoor groter dan** het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen dezelfde twee punten (op dezelfde onderlinge afstand  $\Delta x$ ) van de lopende golf in lucht.

Juist. De golflengte in perspex of water is kleiner dan de golflengte in lucht, zodat het faseverschil tussen twee punten op dezelfde onderlinge afstand groter is. Want:  $\Delta\phi = \Delta x/\lambda$

Als je een ander medium dan lucht tussen de lichtbron en de detector schuift, verandert het gemeten faseverschil. Uit de waarde van deze faseverschil-verandering is de lichtsnelheid  $c_m$  in het medium te bepalen.

**Opdracht 20**

Bedenk nu bij de gegeven meetopstelling een meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht. Beschrijf hieronder deze meetmethode – als het je lukt om iets te bedenken. Als het niet lukt om iets te bedenken. Vul dan 'geen idee' in.

*Jouw antwoord:* **geen idee**

Als je het idee hebt dat deze meetmethode goed is, ga dan hieronder door naar *meetmethode evalueren*. Je kunt je meetmethode daar direct toepassen op de meting van de lichtsnelheid in perspex en eventueel water. En daarmee is het dan tijd voor de derde meetsessie.

Als je twijfelt of deze meetmethode goed is of als je geen meetmethode hebt kunnen bedenken, ga dan hieronder door naar 'meetmethode ontwikkelen'. Daar ontwikkel je eerst in een drietal opdrachten je meetmethode voor de meting van de lichtsnelheid in perspex en eventueel water.

meetmethode evalueren

meetmethode ontwikkelen

## scherm 17

## 3. lichtsnelheid in andere media | | Meetmethode ontwikkelen

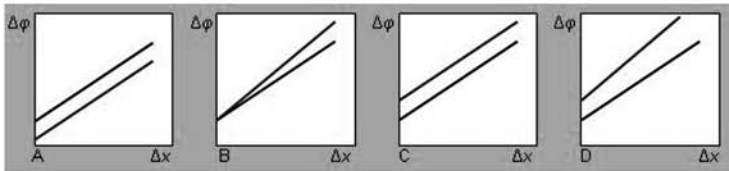
Door een medium als perspex of water tussen de lichtbron en de detector te schuiven, neemt het gemeten faseverschil  $\Delta\phi$  toe. Of, met andere woorden: er is sprake van een extra faseverschil  $\Delta\phi_{\text{extra}}$  ten opzichte van het faseverschil in lucht bij dezelfde afstand  $\Delta x$  tussen de lichtbron en detector. Hoe je daaruit de lichtsnelheid  $c_m$  in het tussengeschoven medium bepaalt, zoek je uit in de volgende drie opdrachten.

**Opdracht 21**

De meetmethode voor het bepalen van de lichtsnelheid in lucht met de gegeven meetopstelling komt neer op het meten van het faseverschil  $\Delta\phi$  als functie van de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector. Het resultaat daarvan is in de vier diagrammen hieronder weergegeven met een zwarte lijn. In die vier diagrammen zie je ook vier blauwe lijnen. Dat zijn vier mogelijke uitkomsten van het meten van de relatie tussen  $\Delta\phi$  en  $\Delta x$  als je perspex of water tussen lichtbron en detector hebt geschoven.

zie volgende pagina voor het vervolg van scherm 17

vervolg van scherm 17



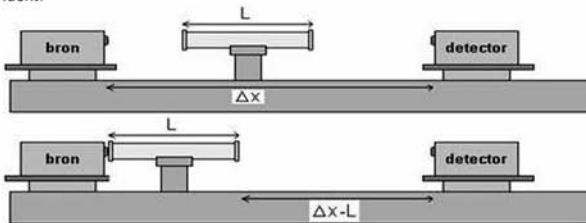
Welke van de vier relaties (A, B, C of D) zal dan het resultaat van de metingen zijn?

✓ *Jouw antwoord:* C

Inderdaad, met een medium als perspex of water tussen lichtbron en detector is het gemeten faseverschil groter dan in lucht (zie opdracht 19). En dit extra faseverschil is steeds even groot, onafhankelijk van de afstand  $\Delta x$  tussen lichtbron en detector. Bij het veranderen van deze afstand verandert de lengte van het tussengeschoven medium namelijk niet.

### Opdracht 22

Hieronder zie je nogmaals de tekening van de meetopstelling met een tussengeschoven medium. Daaronder staat een tekening van dezelfde situatie, maar nu met het medium tegen de lichtbron aangeschoven. Daaruit blijkt duidelijker dat het licht eerst over een afstand  $L$  door het medium beweegt, en daarna over een afstand  $(\Delta x - L)$  door lucht.



Geef eerst een formule voor het faseverschil  $\Delta\phi$ , uitgedrukt in  $\Delta x$ ,  $c$  en  $f_{\text{mod}}$  voor de situatie met alleen lucht tussen lichtbron en detector.

✓ *Jouw antwoord:* 
$$\Delta\phi = f_{\text{mod}} \times \Delta x / c$$

Juist. Voor de situatie met alleen lucht tussen lichtbron en detector vind je de formule voor het faseverschil door de inmiddels bekende formule voor de lichtsnelheid bij dit experiment anders te schrijven:  $c = (\Delta x / \Delta\phi) f_{\text{mod}} \Rightarrow \Delta\phi = (\Delta x / c) f_{\text{mod}}$ .

Geef nu een formule voor het faseverschil  $\Delta\phi_{\text{lm}}$  uitgedrukt in  $\Delta x$ ,  $L$ ,  $c$ ,  $c_m$  en  $f_{\text{mod}}$  voor de situatie met een medium met lengte  $L$  tussen lichtbron en detector.

✓ *Jouw antwoord:* 
$$\Delta\phi_{\text{lm}} = f_{\text{mod}} \times (\Delta x - L) / c + f_{\text{mod}} \times L / c_m$$

Juist. Het stuk lucht tussen lichtbron en detector levert een faseverschil  $\Delta\phi_l = ((\Delta x - L) / c) f_{\text{mod}}$ . Het stuk medium tussen lichtbron en detector levert een faseverschil  $\Delta\phi_m = (L / c_m) f_{\text{mod}}$ . In totaal wordt het faseverschil dus gegeven door:  $\Delta\phi_{\text{lm}} = \Delta\phi_l + \Delta\phi_m = ((\Delta x - L) / c) f_{\text{mod}} + (L / c_m) f_{\text{mod}}$ .

Geef ten slotte een formule voor het extra faseverschil  $\Delta\phi_{\text{extra}}$  dat je meet als gevolg van het tussenschuiven van een medium. Gebruik daarbij de twee formules hierboven.

*Jouw antwoord:* 
$$\Delta\phi_{\text{extra}} = f_{\text{mod}} \times (L / c_m - L / c)$$

*Controleer zelf je antwoord:* Voor het extra faseverschil neem je het verschil tussen je antwoorden op de tweede en de eerste vraag hierboven:  $\Delta\phi_{\text{extra}} = \Delta\phi_{\text{lm}} - \Delta\phi = ((\Delta x - L) / c) f_{\text{mod}} + (L / c_m) f_{\text{mod}} - (\Delta x / c) f_{\text{mod}}$ . Als je dit verder uitwerkt, vind je voor het extra faseverschil:  $\Delta\phi_{\text{extra}} = ((L / c_m) - (L / c)) f_{\text{mod}}$ .

zie volgende pagina voor het vervolg van scherm 17

## vervolg van scherm 17

### Opdracht 23

Beschrijf nu hieronder je meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht met de gegeven meetopstelling.

*Jouw antwoord:* phi extra bepalen door eerst te meten met medium en dan zonder en deze van elkaar af te trekken

Klik hieronder op 'verder -->' om naar *meetmethode evalueren* te gaan en zo te controleren of de door jou voorgestelde meetmethode goed is. Je kunt je meetmethode daar toepassen op de meting van de lichtsnelheid in perspex en eventueel water. En daarmee is het dan tijd voor de derde meet sessie.

verder -->

## scherm 18

### 3. lichtsnelheid in andere media | | Meetmethode evalueren

In opdracht 20 of 23 heb je een meetmethode ontwikkeld voor het meten van de lichtsnelheid in andere media dan lucht met de gegeven meetopstelling. Die meetmethode gebruik je in de volgende opdracht.

#### Opdracht 24

Roep hieronder de meetsite op voor het evalueren van de ontwikkelde meetmethode voor de lichtsnelheid  $c_m$  in andere media dan lucht. Doe dit in elk geval voor het medium perspex, en als je wilt ook voor het medium water. Vul de resultaten hieronder in.

Klik [hier](#) om de meetsite op te roepen [gebruik de username en het wachtwoord die je vanochtend gekregen hebt].

Heb je hiervoor direct gekozen voor meetmethode evalueren, maar wil je bij nader inzien deze toch eerst nog met behulp van de site ontwikkelen, klik dan [hier](#).

*Jouw antwoord:*

Lichtsnelheid: 2.0 m/s in perspex

Lichtsnelheid: 2.3 m/s in water

In BINAS staan geen literatuurwaarde voor de lichtsnelheid in water en perspex. Wel zijn er de literatuurwaarden voor de brekingsindex in water en perspex te vinden. Gebruik het verband tussen brekingsindex en snelheid in een medium om tot een literatuurwaarde voor de lichtsnelheid in de media te komen:  $n = c_{\text{vacuum}}/c_{\text{medium}}$

Levert het evalueren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in perspex en eventueel water het resultaat dat je had verwacht? Hoe groot is de afwijking tussen de gemeten waarde en de literatuurwaarde? Leg uit waarom.

*Jouw antwoord:* gemeten brekingsindex perspex: 1.5, gemeten brekingsindex water: 1.3.  
Literatuurwaarde perspex: 1.5, water: 1.33 dus klopt.

Als het goed is heb je voor perspex en eventueel water een lichtsnelheid gemeten die overeenkomt met de literatuurwaarde in BINAS. Als dit niet zo is, controleer dan je metingen, het diagram waarin je  $\Delta\phi$  en  $\Delta x$  tegen elkaar hebt uitgezet en/of de manier waarop je uit dat diagram de lichtsnelheid in perspex en eventueel water hebt bepaald.

Het evalueren van de meetmethode voor de lichtsnelheid in andere media dan lucht uit opdracht 20 of 23 levert het gewenste resultaat. Dat betekent: je hebt bij de gegeven meetopstelling nu de juiste meetmethode gevonden. Daarmee is ook deel 3 van dit experiment afgerond. Hoewel... misschien nog niet helemaal. Er zit namelijk nog een kleine systematische fout in de meting van de lichtsnelheid in water – als je die meting hebt uitgevoerd. De buis met water is aan beide uiteinden afgesloten met een glasplaatje. De lichtsnelheid in zo'n glasplaatje is anders dan die in lucht en in het water tussen de glasplaatjes. Eigenlijk levert dat nog een (kleine) systematische fout in de gemeten waarden van de lichtsnelheid in water. En ook voor die systematische fout kun je corrigeren. Dat doe je in de volgende (en laatste) opdracht.

zie volgende pagina voor het vervolg van scherm 18

## vervolg van scherm 18

### Opgdracht 25

De gemeten waarde van de lichtsnelheid in water is te corrigeren met behulp van de buis met lucht tussen de twee glasplaatjes.

Beschrijf hieronder je meetmethode voor het corrigeren van de gemeten waarde van de lichtsnelheid in water met de gegeven meetopstelling.

Jouw antwoord: **buis met lucht gebruiken**

Roep de meetsite op voor het evalueren van de ontwikkelde meetmethode voor het corrigeren van de gemeten waarde van de lichtsnelheid in water. Vul het resultaat hieronder in.

Jouw antwoord: *Lichtsnelheid:  $3 \cdot 10^8$  m/s in water, gecorrigeerd voor invloed van de glasplaatjes.*

Levert het uitvoeren van deze correctie een nauwkeuriger waarde voor de lichtsnelheid in water op? Hoe groot is nu de afwijking tussen de gemeten waarde en de literatuurwaarde?

Jouw antwoord: **iets minder**

### Experimentele Fysica

De stap in dit derde deel van het experiment zal een experimenteel fysicus vaker zetten. Hij of zij gebruikt de theorie, de meetopstelling en de ontwikkelde meetmethode voor het meten van de ene grootte ook voor het meten van andere grootheden (voor zover die met hetzelfde fysische verschijnsel te maken hebben) en probeert de nauwkeurigheid van die meting zo groot mogelijk te maken.

verder -->

## scherm 19

Ter afsluiting van het onderzoek krijg je nu nog een aantal vragen voorgelegd die ingaan op hoe je het geheel beleefd hebt. Klik hier om deze vragen in te vullen. Vul deze vragen allebei persoonlijk na elkaar apart in zonder te overleggen.

Rapporteer over dit onderzoek in de vorm van een schriftelijk *verslag*. Zorg ervoor dat in dit verslag de volgende onderdelen duidelijk naar voren komen: de onderzoeksvraag, de meetopstelling, de resultaten van het experimenteel onderzoek samen met het antwoord op de onderzoeksvragen. Houd je hierbij aan de instructies ten aanzien van de omvang zoals hieronder beschreven. Schrijf het verslag in je *eigen woorden*, dus kopieer geen teksten van de site. Besteed hierbij aandacht aan zowel de lichtsnelheid in lucht als ook aan de lichtsnelheid in andere media. Lever het verslag binnen een week in door het te mail naar [M.Engelbarts@phys.uu.nl](mailto:M.Engelbarts@phys.uu.nl).

Onderdelen van verslag (allen geschreven in eigen woorden):

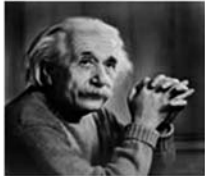
- Onderzoeksvraag + toelichting (dus waarom is deze onderzoeksvraag belangrijk/ waarom zou je de onderzoeksvraag willen beantwoorden, probeer daar iets over te zeggen) → max 0,5 pagina
- Meetopstelling → max 0,5 pagina
- Meetmethode → max 1,5 pagina
- Meetresultaten + verwerking → max 1 pagina
- Conclusie: terugblik op wat je gedaan hebt + antwoord op de onderzoeksvraag → max 0,5 pagina

## Bijlage II: Facultatieve pagina's

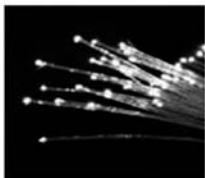
### Facultatieve pagina I (vanaf scherm 01)

#### Een fundamentele natuurconstante: de lichtsnelheid

De lichtsnelheid  $c$  is de snelheid waarmee alle elektromagnetische straling – en dus ook licht – zich verplaatst. Het is een fundamentele natuurconstante die een belangrijke rol speelt in verschillende gebieden van de natuurkunde: bij verschijnselen op heel kleine schaal (de atoom- en kernfysica) en op heel grote schaal (de astronomie), maar ook bij verschijnselen in ons dagelijks leven.



**Deeltjesfysica** In het onderzoek naar de structuur van materie voeren de deeltjesfysici experimenten uit waarbij ze elementaire deeltjes als protonen en elektronen in een deeltjesversneller een grote snelheid geven en daarna op elkaar laten botsen. Bij die botsingen ontstaan nieuwe elementaire deeltjes die inzicht geven in de manier waarop de materie om ons heen is opgebouwd. De deeltjesfysici gebruiken de ideeën van Albert Einstein over de equivalentie van massa en energie – samengevat in de bekende formule  $E = m \cdot c^2$  – om de massa van die nieuwe elementaire deeltjes op te geven in de eenheid  $\text{MeV}/c^2$  – een eenheid waarin de lichtsnelheid  $c$  voorkomt.



**Standaard-meter** – In het dagelijks leven speelt de lichtsnelheid een rol op verschillende gebieden. Zo is bijvoorbeeld de definitie van de lengte van de standaard-meter gebaseerd op de waarde van de lichtsnelheid in vacuüm

**Datatransport** – Om te kunnen berekenen hoe snel gegevens zich bij telecommunicatie door een glasvezelkabel verplaatsen moet je weten hoe de waarde van de lichtsnelheid afhangt van het medium waarin het licht beweegt.



**Astronomie** – In de astronomie is de lichtsnelheid een belangrijke grootte. Het licht van de zon heeft zo'n acht minuten nodig om de aarde te bereiken. Als je 's nachts naar de sterren kijkt, zie je licht dat duizenden jaren geleden door zo'n ster werd uitgezonden. De ster die je ziet zou er dus best niet eens meer kunnen zijn.

Astronomen gebruiken onder andere de eenheid 'lichtjaar' voor het opgeven van de haast onvoorstelbaar grote afstanden in het heelal. Zo'n lichtjaar is de afstand die het licht in een jaar aflegt. Maar om te kunnen berekenen hoe groot die afstand dan is, moet je natuurlijk wel de waarde van de lichtsnelheid weten

De massa van elementaire deeltjes bij botsingsexperimenten in de deeltjesfysica, de snelheid van datatransport in glasvezelkabels, de afstand van sterren en sterrenstelsels in de astronomie – in al deze gevallen is het nodig om te weten welke waarde de lichtsnelheid heeft.

### Facultatieve pagina II (vanaf scherm 02)

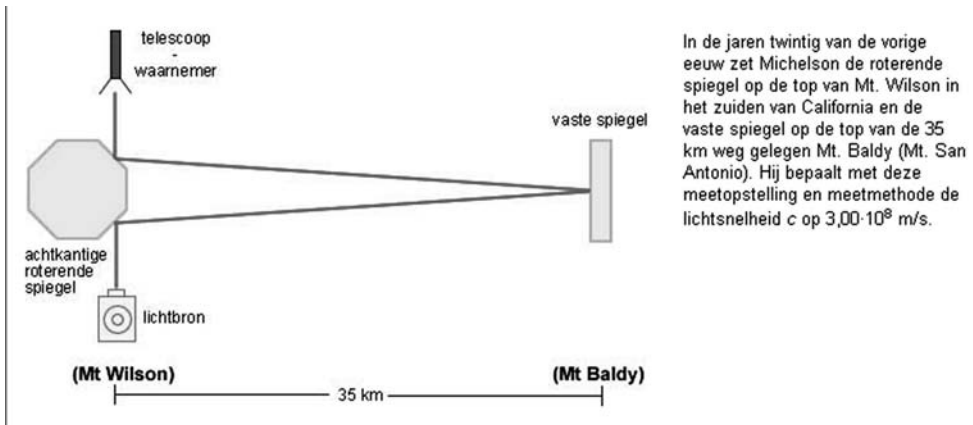
#### Lichtsnelheid meten

De Deense astronoom Ole Rømer (1644-1710) is de eerste die met een redelijke schatting voor de waarde van de lichtsnelheid komt. Hij constateert dat de omlooptijd van Io, één van de manen van de planeet Jupiter, enigszins varieert rond het gemeten gemiddelde van 42,5 uur. Die variatie hangt af van de beweging van de Aarde en Jupiter ten opzichte van elkaar. De gemeten omlooptijd van Io is iets langer dan het gemiddelde als de Aarde van Jupiter af beweegt, en iets korter als de Aarde naar Jupiter toe beweegt. De oorzaak van deze variatie is volgens hem de extra tijd die het licht nodig heeft om de toenemende afstand tussen de twee planeten af te leggen als ze zich van elkaar verwijderen. En omgekeerd: de kortere reistijd van het licht als de twee planeten naar elkaar toe bewegen. Met deze aanname komt hij er op uit dat het licht 22 minuten nodig heeft om een afstand die gelijk is aan de diameter van de baan van de Aarde rond de Zon af te leggen. Met onze huidige kennis van deze afstand ( $0,3 \cdot 10^{12}$  m) levert dat een lichtsnelheid  $c$  van  $2,3 \cdot 10^8$  m/s.

De volgende die een belangrijke stap zet is de Amerikaan Albert A. Michelson (1852-1931). Hij gebruikt de hieronder weergegeven opstelling met een roterende en een vaste spiegel. De lichtbundel valt in op één van de acht spiegelende vlakken van de roterende spiegel. Het gereflecteerde licht gaat naar een vaste spiegel op grote afstand en weer terug via de roterende spiegel naar de waarnemer. Die ziet de lichtbundel in een kleine telescoop. Maar dit gebeurt alleen bij een bepaalde waarde van het aantal omwentelingen per seconde van de roterende spiegel. Als dat toerental ook maar iets afwijkt, zal de lichtbundel naast de telescoop terecht komen en niet in de telescoop worden waargenomen. Uit de juiste waarde van het toerental en de bekende afstand tot de vaste spiegel is de lichtsnelheid te berekenen.

*zie volgende pagina voor het vervolg van facultatieve pagina II*

vervolg van facultatieve pagina II

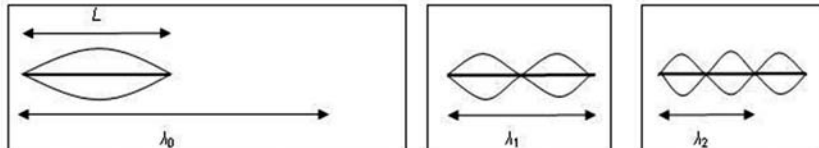


### Facultatieve pagina III (vanaf scherm 03)

#### Golfsnelheid in een snaar

Met gebruik van de theorie over trillingen en golven is de golfsnelheid te bepalen door het meten van de golflengte en de frequentie. Misschien heb je dat in de natuurkundelessen al eens gedaan: het meten van de golfsnelheid in een snaar.

In de snaren van een muziekinstrument ontstaan bij bepaalde frequenties staande golven. Zo'n staande golf ontstaat uit het 'door elkaar heen lopen' (ofwel: door interferentie) van lopende golven in de snaar. Hieronder zie je de eerste drie mogelijke trillingsvormen van steeds dezelfde snaar.



De eerste drie mogelijkheden voor een staande golf in een snaar: een halve golf (links), een hele golf (midden) en anderhalve golf (rechts).

Bij elk van deze trillingsvormen hoort een bepaalde frequentie ( $f_0, f_1, f_2$  enzovoort) en een bepaalde golflengte ( $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  enzovoort). En bij elk van die trillingsvormen geldt volgens de theorie over trillingen en golven:  $v = \lambda \cdot f$ . In deze formule is  $v$  de golfsnelheid van de lopende golven in de snaar.

De golfsnelheid  $v$  is nu te bepalen door meting van de frequentie  $f_n$  en de bijbehorende golflengte  $\lambda_n$  bij elk van de trillingsvormen. Die golflengte  $\lambda_n$  volgt uit de lengte  $L$  van de snaar en de trillingsvorm. Bij de eerste drie mogelijke trillingsvormen hierboven geldt achtereenvolgens:  $\lambda_0 = 2 \cdot L$ ,  $\lambda_1 = L$  en  $\lambda_2 = (2/3) \cdot L$ .

Bij een trillende snaar zijn de frequentie en de golflengte redelijk eenvoudig te meten. Je maakt bijvoorbeeld het geluid van de trillende snaar met behulp van een microfoon zichtbaar op het scherm van een oscilloscoop, je bepaalt daaruit de trillingstijd en je berekent daarmee de frequentie waarmee de snaar trilt. En de golflengte bepaal je door meting van de lengte van de snaar in combinatie met het zichtbare aantal golven. Die golven kun je zo nodig zichtbaar maken door stroboscopische belichting van de snaar. Maar hoe doe je dat dan bij licht? Hoe meet je de frequentie en de golflengte van een lichtgolf?

## facultatieve pagina IV (vanaf scherm 08)

### Moduleren van golven

Het moduleren van golven speelt een belangrijke rol bij het verzenden van radio- en tv-signalen via een zogenaamde draaggolf.

**Draaggolf** – Een radio- of tv-zender stuurt een elektromagnetische golf de lucht in. De frequentie van deze golf ligt tussen 0,1 MHz en 1 GHz, afhankelijk van het zendstation. Deze golf noemen we de *draaggolf*. Deze draaggolf heeft een vaste frequentie en amplitude. Aan deze golf wordt een geluid- of beeldsignaal toegevoegd: het informatiesignaal. Dat kan op twee manieren: door *amplitudemodulatie* (AM) en door *frequentiemodulatie* (FM).

**Amplitudemodulatie** – AM is de oudste vorm van modulatie, en is al meer dan honderd jaar in gebruik. Bij deze techniek wordt het informatiesignaal gebruikt om de *amplitude* van de draaggolf te variëren. Bij een positief informatiesignaal wordt die amplitude iets vergroot, bij een negatief signaal iets verkleind – zoals in de tekening hiernaast. De amplitude van de draaggolf 'volgt' dus het informatiesignaal.

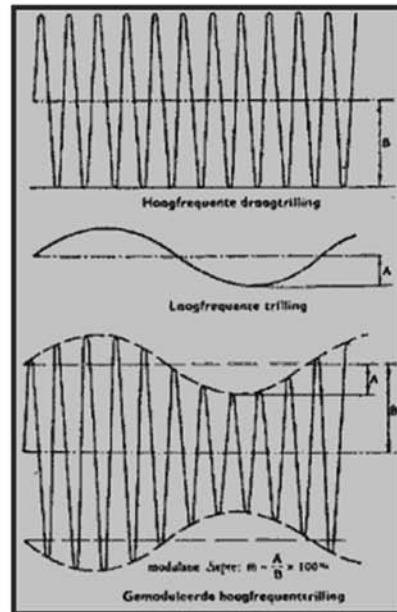
Elke zender heeft zijn eigen draaggolffrequentie. Een instelbaar filter bij de ontvanger laat alleen de draaggolffrequentie van de gewenste zender door. Daarna wordt ook de draaggolf weggefilterd en blijft alleen het informatiesignaal over. Dat signaal wordt uiteindelijk omgezet in geluid of beeld.

AM wordt onder andere toegepast bij radio, tv (voor het beeldsignaal) en in het radioverkeer in de luchtvaart. Deze vorm van modulatie is nogal gevoelig voor stoorsignalen met een pulsform, zoals bijvoorbeeld bliksem. Een bliksemontlading zorgt namelijk voor een korte, sterke toename van de amplitude en daarmee voor een verstoring van het informatiesignaal op de draaggolf. Je hoort dan geknetter in het ontvangen signaal.

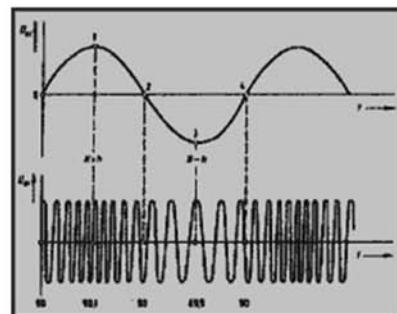
Het moduleren van het lichtsignaal in *Experimenteren op afstand – de lichtsnelheid* is een voorbeeld van amplitudemodulatie.

**Frequentiemodulatie** – FM is een later ontwikkelde vorm van modulatie. Bij deze techniek blijft de amplitude van de draaggolf constant. Het informatiesignaal wordt gebruikt om de *frequentie* van de draaggolf te variëren. Bij een positief informatiesignaal wordt die frequentie iets vergroot, bij een negatief signaal iets verkleind – zoals in de tekening hiernaast. In zo'n FM-golf is het informatiesignaal moeilijker te 'zien' dan in een AM-golf.

FM heeft het voordeel dat deze vorm van modulatie veel minder storingsgevoelig is. Een bliksemontlading heeft namelijk alleen invloed op de amplitude en niet op de frequentie van de draaggolf.



Amplitudemodulatie (AM)



Frequentiemodulatie (FM)



## facultatieve pagina V (vanaf scherm 08)

### Faseverschil meten

Het meten van het faseverschil tussen twee signalen is voor de experimenteel fysicus een standaardtechniek. De elektronische schakeling voor het meten van dat faseverschil bestaat uit bekende standaardbouwstenen als de comparator, XOF-poort, pulsgenerator en teller.

**Registratie** – Het verwerkingsprogramma in de computer registreert de twee signaalspanningen (van de lichtbron en de detector) als functie van de tijd  $t$ . Figuur 1 hiernaast geeft een voorbeeld van zo'n registratie: twee onderling in de tijd verschoven sinusvormige signalen.

**Faseverschil** – Voor het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen deze twee signalen geldt:  $\Delta\phi = \Delta t/T$ . Hierin is  $\Delta t$  de tijdsduur die verloopt tussen de zogenaamde nuldoorgangen en  $T$  de periode (of trillingstijd) van de twee signalen. Die nuldoorgangen zijn in figuur 1 gemarkeerd met een zwarte stip. Deze formule voor het faseverschil is niets anders dan de fase van het eerste signaal (van de lichtbron) op het moment dat de fase van het tweede signaal (van de detector) nul is.

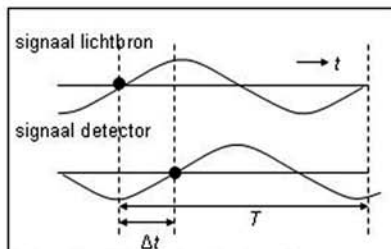
Het meten van het faseverschil  $\Delta\phi$  komt dus neer op het meten van de tijdsduur  $\Delta t$  tussen de nuldoorgangen van de twee signalen – ervan uitgaande dat de periode  $T$  bekend is.

**Tijdsduur meten** – De elektronische schakeling voor het meten van de tijdsduur  $\Delta t$  tussen de nuldoorgangen van de twee signalen is weergegeven in figuur 3. Elk van de twee signalen (van de lichtbron en de detector) vormt het ingangssignaal voor een comparator: het signaal van de lichtbron gaat naar comparator\_1, het signaal van de detector naar comparator\_2. De referentiespanning van deze comparators is ingesteld op 0 V. Bij een nuldoorgang van het signaal verandert de uitgangsspanning van de comparator dus van laag naar hoog, en die uitgangsspanning blijft hoog gedurende een halve periode van het sinusvormige ingangssignaal. Figuur 2 geeft de uitgangssignalen van de twee comparators. Deze uitgangssignalen gaan naar een *exclusieve OF-poort* (afgekort: XOF-poort). Bij zo'n poort is het uitgangssignaal alleen hoog als één van beide ingangssignalen hoog is. De XOF-poort geeft dus alleen een hoog uitgangssignaal gedurende de tijdsduur  $\Delta t$  die verloopt tussen de nuldoorgangen van de twee signalen (van de lichtbron en de detector) zoals weergegeven in figuur 2. Het uitgangssignaal van de XOF-poort gaat naar een pulsgenerator/teller-combinatie – een combinatie die werkt als klok voor het meten van deze tijdsduur  $\Delta t$ .

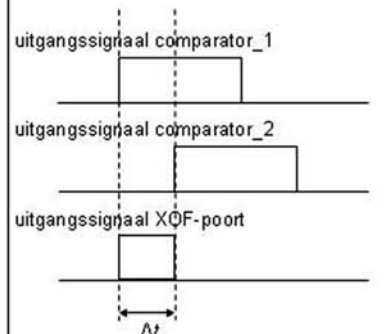
Voor een zo nauwkeurig mogelijk resultaat wordt deze tijdsduur honderd keer gemeten.

**Faseverschil berekenen** – Het verwerkingsprogramma in de computer berekent nu eerst uit de honderd metingen de gemiddelde waarde van de tijdsduur  $\Delta t$ , en daarmee het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee signalen:  $\Delta\phi = \Delta t/T$ . Hierin is  $T$  de periode van de sinusvormige signalen (van de lichtbron en de detector). Deze periode volgt uit de (bekende) frequentie  $f$  van de signalen:  $T = 1/f$ .

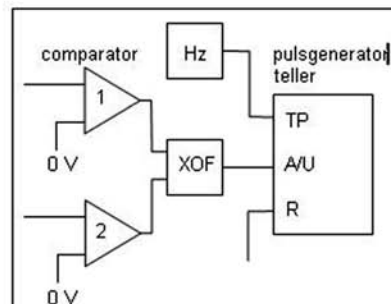
**Tijdmeting** – Eerder is geconstateerd dat het bepalen van de lichtsnelheid uit een rechtstreekse meting van de tijdsduur die het licht nodig heeft voor het afleggen van een bepaalde afstand een probleem is: die tijdsduur is namelijk heel klein en daardoor moeilijk nauwkeurig te meten. Dat probleem is opgelost door het golfkarakter van licht te gebruiken en de lichtsnelheid te bepalen uit een meting van het faseverschil tussen twee punten in een lopende golf. Nu heb je gezien dat die meting van het faseverschil toch weer neerkomt op het meten van een tijdsduur. Maar dan wel een andere tijdsduur dan bij een rechtstreekse meting van de tijdsduur die het licht nodig heeft voor het afleggen van een bepaalde afstand.



Figuur 1 – Geregistreeerde signalen



Figuur 2 – Verwerking van de geregistreeerde signalen in de elektronische schakeling



Figuur 3 – Elektronische schakeling voor het meten van  $\Delta t$

zie volgende pagina voor het vervolg van facultatieve pagina V

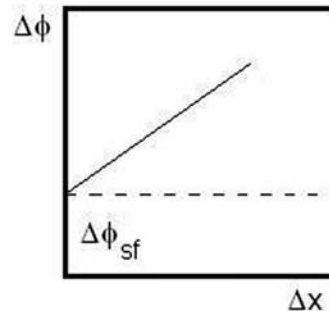
## vervolg van facultatieve pagina V

**Signalen manipuleren** – Er is echter nog wel een probleem. De opstelling moet de tijdsduur  $\Delta t$  tussen de nuldoorgangen van de twee signalen meten. Maar deze tijdsduur is natuurlijk even groot als de tijd die het licht nodig heeft om de afstand van ruwweg 1 m tussen de lichtbron en de detector af te leggen: zo'n  $3 \cdot 10^{-9}$  s. Een meting van zo'n korte tijdsduur is niet mogelijk. De oplossing voor dit probleem is het eerst nog verder manipuleren van de signalen van de lichtbron en de detector voordat ze de elektronische schakeling van figuur 3 in gaan. Heel in het kort komt dat 'verder manipuleren' op het volgende neer.

De frequentie van de twee signalen is 50 MHz (de modulatiefrequentie). Of eigenlijk, wat nauwkeuriger: 50,05 MHz. Bij beide signalen wordt nu eerst een signaal met een frequentie van 50,10 MHz opgeteld (dus: 50 kHz meer dan de modulatiefrequentie). Het resultaat daarvan is een nieuw sinusvormig signaal: een zogenaamde *zweving* met een frequentie  $f_z$  van 50 kHz – het frequentieverschil tussen de twee bij elkaar opgetelde signalen. De periode  $T_z$  van deze zweving is dus een factor  $10^3$  groter dan de periode  $T$  van de gemoduleerde signalen van de lichtbron en de detector. En ook de tijdsduur  $\Delta t_z$  tussen de nuldoorgangen van deze zwevingen is een factor  $10^3$  groter dan de tijdsduur  $\Delta t$  tussen de nuldoorgangen van de gemoduleerde signalen. De elektronische schakeling meet dan de tijdsduur  $\Delta t_z$ , met een grootte-orde van  $3 \cdot 10^{-6}$  s of 3  $\mu$ s. En dat is een tijdsduur die voldoende nauwkeurig te meten valt. Het verwerkingsprogramma in de computer berekent daarmee het faseverschil  $\Delta\phi$  tussen de twee signalen:  $\Delta\phi = \Delta t_z / T_z$ . Hierin is  $T_z$  de (bekende) periode van de zwevingen:  $T_z = 1/f_z = 1/50 \cdot 10^3 = 20 \cdot 10^{-6}$  s. Omdat zowel  $\Delta t_z$  als  $T_z$  een factor  $10^3$  groter zijn dan de oorspronkelijke signalen, is het aan deze signalen gemeten faseverschil gelijk aan het faseverschil tussen de oorspronkelijke signalen.

## facultatieve pagina VI (vanaf scherm 12)

De formule  $c = (\Delta x / \Delta\phi) f_{\text{mod}}$  is op de volgende manier te schrijven als een relatie tussen  $\Delta\phi$  en  $\Delta x$ :  $\Delta\phi = (f_{\text{mod}}/c)\Delta x$ . Maar je weet nu dat er in de meting van  $\Delta\phi$  een systematische fout zit: de gemeten waarde  $\Delta\phi$  is systematisch te groot. En die systematische fout  $\Delta\phi_{\text{sf}}$  moet je dus van de meetwaarde  $\Delta\phi$  aftrekken:  $\Delta\phi - \Delta\phi_{\text{sf}} = (f_{\text{mod}}/c)\Delta x > \Delta\phi = (f_{\text{mod}}/c)\Delta x + \Delta\phi_{\text{sf}}$ . Dit klopt met de wiskundige beschrijving van de lijn in diagram B:  $y = ax + b$ . Hierin komt  $y$  overeen met het faseverschil  $\Delta\phi$ , komt  $x$  overeen met de afstand  $\Delta x$  en komt  $b$  overeen met de systematische fout  $\Delta\phi_{\text{sf}}$ . In de wiskunde geeft  $b$  de afsnede met de  $y$ -as in diagram B. Dit is dus de systematische fout in de meting van het faseverschil.



## facultatieve pagina VII (vanaf scherm 14)

### Signalen manipuleren

Het moduleren van het lichtsignaal in de meetopstelling is een voorbeeld van het manipuleren van signalen. Andere voorbeelden zijn:

- een zwak elektrisch signaal versterken met een (meet)versterker om het signaal meetbaar te maken
- een analogo elektrisch signaal omzetten in een digitaal signaal met een AD-omzetter om het door een computer te laten verwerken
- een elektrisch signaal filteren met een elektronisch filter om bijvoorbeeld de 'brom' met een frequentie van 50 Hz (de frequentie van de netspanning) er uit te halen
- een signaal omzetten in een andere vorm, bijvoorbeeld een elektrisch signaal omzetten in een optisch signaal om het door een glasvezel te transporteren, een elektrisch signaal omzetten in een geluidssignaal met een luidspreker of een geluidssignaal omzetten in een elektrisch signaal met een microfoon.

## facultatieve pagina VIII (vanaf scherm 14)

### Systematische fouten

De verschillende lengte van de coaxkabels van de lichtbron en de detector naar de computer in de meetopstelling veroorzaakt een systematische fout. Andere voorbeelden van het optreden van systematische fouten zijn:

- het meten van een grootte met een meetinstrument en/of een (meet)versterker waarvan de nulinstelling niet goed is afgeregeld
- het meten van een grootte met een niet of niet goed gekalibreerd meetinstrument, zoals een temperatuursensor of een plaatssensor (gatenwiel)
- het meten van een grootte zonder rekening te houden met versturende meetomstandigheden, zoals het meten van de luchtwrijvingskracht op een modelvoertuig door het aan een krachtmeter voort te slepen (waarbij ook rekening moet worden gehouden met de rolwrijvingskracht op het modelvoertuig) of het meten van de inductiespanning over een spoel in een veranderend magnetisch veld (waarbij ook rekening moet worden gehouden met een inductiespanning als gevolg van de wisselstroomvoorziening van de gebruikte apparatuur).

## Bijlage III: Onderbrekingen

	Wanneer	Onderbreking
01	Na scherm 04	<p>1. Lijkt het je wel of niet leuk of interessant om met dit experiment door te gaan? Zo ja, waarom. Zo nee, waarom niet?</p> <p>2. In de rest van dit experiment ga je gebruik maken van theorie uit de natuurkunde. Welke theorie is dat? Waarom nou juist deze theorie?</p> <p>3. Heb je op dit moment een globaal idee van wat je bij dit experiment nu verder gaat doen? Zo ja, wat ga je dan doen? Zo nee, wat is er dan onduidelijk?</p>
02	Na scherm 07	<p>Je hebt nu bij het werken aan de laatste drie schermen de eerste van de drie stappen gezet voor het ontwikkelen van de meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid: het gebruiken van het golfkarakter van licht.</p> <p>1. Wat heb je bij deze stap gedaan? Probeer dat zo volledig mogelijk onder woorden te brengen.</p> <p>2. Waarom heb je dat gedaan? Of, meer specifiek als doorvragen nodig is: hoe draagt deze stap bij aan het beantwoorden van de hoofdvraag? Of nog specifieker: welk probleem moest bij deze stap worden opgelost, en waarom was dat een probleem?</p> <p>3. Wat wordt nu de volgende stap? Welk probleem?</p> <p>4. Wat heb je tot nu toe geleerd over het werk van een experimenteel fysicus?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Waarom doet een experimenteel fysicus experimenten?</li> <li>- Waar bestaat zijn werk uit?</li> <li>- Waarom is het nuttig hier iets van te leren?</li> </ul>
03	Na scherm 10	<p>Je hebt nu bij het werken aan de laatste drie schermen de tweede van de drie stappen gezet voor het ontwikkelen van de meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid: lichtsignaal moduleren.</p> <p>1. Wat heb je bij deze stap gedaan? Probeer dat zo volledig mogelijk onder woorden te brengen.</p> <p>2. Waarom heb je dat gedaan? Of, meer specifiek als doorvragen nodig is: hoe draagt deze stap bij aan het beantwoorden van de hoofdvraag? Of nog specifieker: welk probleem moest bij deze stap worden opgelost, en waarom was dat een probleem?</p> <p>3. Wat wordt nu de volgende stap?</p> <p>Heb je enig idee hoe dit (het volgende probleem dus) komt?</p> <p>Wat is het op te lossen probleem? Enig idee van de oorzaak van dat probleem?</p>
04	Na scherm 13	<p>Je hebt nu bij het werken aan de laatste drie schermen de laatste van de drie stappen gezet voor het ontwikkelen van de meetmethode voor het meten van de lichtsnelheid: het elimineren van de systematische fout.</p> <p>1. Wat heb je bij deze stap gedaan? Probeer dat zo volledig mogelijk onder woorden te brengen.</p> <p>2. Waarom heb je dat gedaan? Of, meer specifiek als doorvragen nodig is: hoe draagt deze stap bij aan het beantwoorden van de hoofdvraag? Of nog specifieker: welk probleem moest bij deze stap worden opgelost, en waarom was dat een probleem?</p> <p>3. Wat wordt nu de volgende stap?</p> <p>4. Wat heb je tot nu toe geleerd over het werk van een experimenteel fysicus?</p>

## Bijlage IV: Belevingsenquête

B1	Wat vond je moeilijk. Waarom? Wat vond je makkelijk. Waarom?
B2	Wat vond je leuk? Waarom? Wat vond je minder leuk? Waarom? Wat vond je interessant/leerzaam? Waarom? Wat vond je minder interessant? Waarom?
B3	Je hebt het experiment nu uitgevoerd in een bijzondere situatie waarin je test-leerling bent en een vergoeding krijgt en daarom vond je het misschien leuker of juist minder interessant dan wanneer je het als opdracht op school moeten doen. Wat zou je van dit experiment vinden als je het op school als praktische opdracht had moeten uitvoeren?
B4	Op welke momenten liep je vast of bijna vast? Hoe kwam je hier weer uit?

## Bijlage V: Interview

Inhoud	
I1	Wat was de hoofdvraag bij dit experiment?
I2	Hoe leuk/interessant vond je die hoofdvraag bij het begin van het experiment?
I3	Hoe leuk/interessant vond je die hoofdvraag aan het einde van het experiment?
I4	<p>Wat heb je in grote lijnen gedaan om die hoofdvraag te beantwoorden? Of, met andere woorden: waarover gingen de (drie) deelvragen?</p> <p>Als te beperkt antwoord:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- welke theorie heb je gebruikt en waarom die? Evt doorvragen</li> <li>- Dus je hebt de golflengte van rood licht gebruikt? Evt doorvragen</li> <li>- Leverde de eerste meting direct het gewenste resultaat? Evt Doorvragen</li> </ul>
I5	Hoe heb je in grote lijnen naar een antwoord op elk van de (drie) deelvragen gezocht? Bij geen antwoord: hoe ben je tot de juiste meetmethode gekomen?
I6	Waarom heb je de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en lopende golven gebruikt?
I7	Hoe heb je in deel 2 van het experiment (in de eerste stap) de theorie over het golfkarakter van licht en over trillingen en golven gebruikt?
I8	Welk probleem leverde dat op?
I9	Hoe heb je (in de tweede stap) dat probleem opgelost?
I10	Welk probleem leverde dat op? (Ga in op de oorsprong van de systematische fout, gebruik eventueel de animatie om het duidelijk te maken)
I11	Hoe heb je (in de derde stap) dat probleem opgelost?
I12	Hoe heb je in deel 3 van het experiment de ontwikkelde meetopstelling en meetmethode aangepast voor het meten van c in andere media dan lucht?
I13	Hoe heb je het proces van ontwikkelen en evalueren van de meetmethode ervaren? Had je er in deel 3 profijt van dat je in deel 2 geoefend had met ontwikkelen en evalueren van de meetmethode?
I14	<p>Tussen deel 2 en 3 is de meetmethode op een rij gezet (scherm erbij nemen). Was dat nuttig. Waarom wel/niet?</p> <p>Waarvoor was dat nuttig?</p> <p>Als leerlingen zeggen: heb ik niet echt gelezen: waarom heb je het niet gelezen. Zou je het, achteraf gezien, wel hebben moeten lezen. Waarom/waarom niet? Wat had je er dan aan gehad?</p>
Experimenteel fysisch	
E1	Wat heb je bij dit experiment geleerd over het werk van een experimenteel fysisch? Probeer dat zo volledig mogelijk onder woorden te brengen. Eventueel terugkomen nav observaties: het leek erop dat je de stukjes over experimenteel fysisch niet las. Klopt dat?
E2	Wat heb je daaraan, denk je?
Beleving	
	Opvallende antwoorden in enquête
Site	
S1	Welke facultatieve pagina's heb je gelezen, Waren ze leuk/verhelderend/saai/inhoudelijk waardevol of niet? Vind je het nuttig dat dit soort pagina's erbij zitten?

S2	Kies uit de lijst van facultatieve pagina's de beste en de slechtste en leg uit hoe je tot dit oordeel kwam en vertel waar de pagina over ging 1. Belang van $c$ in de natuurkunde 2. Methoden van Romer en Michaelson om de lichtsnelheid te meten 3. Golfsnelheid in een snaar 4. Moduleren van een radiogolf 5. meten van faseverschil 6. Manipuleren van signalen 7. Systematische fouten
S3	Wat vond je van de animaties in de site? Waren ze leuk/ verhelderend/saai/onduidelijk. Waarom wel/niet.
S4	Kies uit de lijst van animaties hieronder de beste en de slechtste, leg uit waar de animatie over ging en leg uit hoe je tot dit oordeel kwam 1.(2.2. lichtsnelheid in lucht, golfkarakter gebruiken, meetmethode ontwikkelen): lopende golf 2.(2.2. lichtsnelheid in lucht, golfkarakter gebruiken, meetmethode evalueren): lopende golf 3.(2.3. lichtsnelheid in lucht, lichtsignaal moduleren, meetopstelling): moduleren 4.(2.3. lichtsnelheid in lucht, lichtsignaal moduleren, meetmethode ontwikkelen): moduleren 5.(2.4 lichtsnelheid in lucht, systematische fout elimineren, meetopstelling): faseverschilmeting: moment binnenkomen van signalen van detector en bron bij computer
S5	Heb je gemerkt dat je tussentijds kon stoppen en daarna verder gaan op dezelfde plek. Wat vond je daarvan?
S6	Wat vond je van het uiterlijk van de site
S7	Wat vond je van het waar ben ik window
S8	Heb je het terugbladeren gebruikt en zo ja waarvoor?
S9	Heb je het vooruitbladeren gebruikt en zo ja waarvoor?
S10	Heb je het bestuderen van de stof door middel van vragen beantwoorden als prettig ervaren? Eventueel naar aanleiding van observatie: heb je veel gegokt?
S11	Had je genoeg aan de feedback op de site? Maw hielp de feedback je een vraag te begrijpen als je deze in eerste instantie niet begreep?
S12	Wat vond je van de vragen waarbij je zelf het antwoord dat je gegeven had moest controleren? Eventueel naar aanleiding van observatie: had je de vragen meestal goed?/ Controleerde je je eigen antwoord?
S13	Heb je het per se moeten beantwoorden van de vragen als hinderlijk ervaren?
S14	Heb je de webcam bestuurd? En zo ja, wat heb je bekeken. Wat vond je hiervan?
S15	Wat vond je van de opbouw van bijvoorbeeld dit scherm (zo niet, dan scherm (lichtsignaal moduleren   meetmethode evalueren) erbij nemen en vragen dit nog eens te lezen om te zien of ze het nu herkennen). Heb je dat ook bij de andere schermen gezien? Wat vond je van het terugblikken, nieuw stuk, vooruitblikken-opbouw? Was dat nuttig, of was de herhaling vervelend?
Uitvoering	
U1	Voelde het alsof je echt met een opstelling bezig was?
U2	Wist je steeds waar je mee bezig was en waarom je daarmee bezig was?
U3	Waren er momenten waarop je graag hulp zou hebben gehad? Op welke momenten was dat en waarom had je hulp nodig?
Terugblikken	
T1	Waren er onderdelen waar je graag meer tijd aan besteed had gezien?
T2	Waren er onderdelen waar minder tijd aan besteed had kunnen worden?
T3	Als je de tijd terug kon draaien en je zou mogen kiezen tussen het experiment op afstand uitvoeren of het aan de tafel doen, welke zou je dan kiezen en waarom?
T4	Wil je verder nog iets kwijt?

## Bijlage VI Instructies voor het verslag

Ter afsluiting van het onderzoek krijg je nu nog een aantal vragen voorgelegd die ingaan op hoe je het geheel beleefd hebt. Klik hier om deze vragen in te vullen. Vul deze vragen allebei persoonlijk na elkaar apart in zonder te overleggen.

Rapporteer over dit onderzoek in de vorm van een schriftelijk verslag. Zorg ervoor dat in dit verslag de volgende onderdelen duidelijk naar voren komen: de onderzoeksvraag, de meetopstelling, de resultaten van het experimenteel onderzoek samen met het antwoord op de onderzoeksvragen. Houd je hierbij aan de instructies ten aanzien van de omvang zoals hieronder beschreven. Schrijf het verslag in je eigen woorden, dus kopieer geen teksten van de site. Besteed hierbij aandacht aan zowel de lichtsnelheid in lucht als ook aan de lichtsnelheid in andere media. Lever het verslag binnen een week in door het te mail naar M.Engelbarts@phys.uu.nl.

Onderdelen van verslag (allen geschreven in eigen woorden):

- Onderzoeksvraag + toelichting (dus waarom is deze onderzoeksvraag belangrijk/ waarom zou je de onderzoeksvraag willen beantwoorden, probeer daar iets over te zeggen): max 0,5 pagina
- Meetopstelling: max 0,5 pagina
- Meetmethode: max 1,5 pagina
- Meetresultaten + verwerking: max 1 pagina
- Conclusie: terugblik op wat je gedaan hebt + antwoord op de onderzoeksvraag: max 0,5 pagina





## Dankwoord

Met het afronden van het proefschrift sluit ik een boeiende, soms ook moeilijke, maar vooral zeer leerzame periode in mijn leven af. Graag wil ik iedereen bedanken die mij in deze periode op uiteenlopende wijzen heeft bijgestaan. Enkelen wil ik speciaal noemen.

Ten eerste mijn (co)promotoren Harrie Eijkelhof en Koos Kortland. Vooral op momenten dat ik het zelf erg lastig vond te geloven dat het onderzoek tot een zinvol resultaat zou leiden wisten jullie me opnieuw te motiveren. Harrie, het heeft me meerdere keren verbaasd (en geïnspireerd) te constateren hoe je mijn warrige gedachten beter kon verwoorden dan ik dat zelf kon. Koos, ik durf met zekerheid te beweren dat ik het zonder jou niet gered zou hebben. In de normale omgang bleek het bijna niet mogelijk je te bedanken omdat je alles wat ik in die richting probeerde wegwuifde omdat je het gewoon je taak als begeleider vond. Je hebt echter veel meer gedaan: je hebt me veel geleerd, gaf me altijd het gevoel voor me klaar te staan, kreeg me weer vooruit als ik vastzat en begreep mijn dipjes (wat vaak de grootste stap in het overwinnen ervan betekende).

Ten tweede mijn paranimfen: Els Wolfs en Gert Engelbarts. Al heel lang wist ik dat ik jullie als mijn paranimfen wilde. Gert, omdat ik me op geen enkele manier (nou ok, hooguit qua haar) een betere broer zou kunnen wensen. Elsje, omdat je gelukskastanjes voor me meebrengt, omdat het altijd fijn is je te zien en spreken en omdat je steeds maar weer de energie kon opbrengen mee te lezen en corrigeren en lezen en weer corrigeren zonder mij ooit het gevoel te geven dat ik wel erg veel van je vroeg (wat ik wel deed).

Dan natuurlijk ook alle collega's bij didactiek. In het bijzonder Tine, voor regelen van de formele zaken rond de promotie, Piet en Kees voor de inhoudelijke richting, Bart voor de prettige zelfde-schuitje-gesprekken en je prikkelende vragen die me dwongen preciezer te formuleren (of op zijn minst over na te denken) wat ik nou eigenlijk bedoelde, Katrina, voor het corrigeren van de Engelse samenvatting, Elwin, Peter en Ad voor prikkelende en motiverende discussies tijdens de werkbesprekingen. Ati, voor je warmte, Gjalt voor alles (echt te veel om op te noemen). Ik hoop dat we elkaar veel blijven zien en ook in onze nieuwe banen wegen vinden om samen te blijven werken, Rupert, voor vrolijk makende ik-kom-eigenlijk-voor-Ati-gesprekken, Dick voor de gezellige appel-pauzes, Arend-Jan, Dieuwke, Hannah, Marie-Christine, Ria, René, Marijn, Roald, Sonja en alle anderen: bedankt voor een fijne tijd en inspirerende en leerzame omgeving.

Verder wil ik alle collega's van het Julius instituut en het toenmalige bureau onderwijszaken bedanken. Het voelde als een warm nest om in jullie midden te zijn. In het bijzonder wil ik Jenny, Joost, Thierry en Rudi noemen. Jenny, skatje, voor je humor en het regelen van allerlei zaken meestal lang voordat ik zelf doorhad dat er iets moest gebeuren. Joost, omdat je me altijd vrolijk maakt, Thierry voor alle Labview-inspanningen en Rudi voor coördineren van werk aan de opstelling en voor alle gezellige kopjes koffie waar er hopelijk nog heel veel van zullen volgen.

Natuurlijk moeten ook mijn afstudeerstudenten genoemd worden: Pim van Yperen, Eline Verwer en René Sens. Bedankt voor de prettige samenwerking en het werk wat jullie verrichtten waar ik op kon voort bouwen.

Ook de leerlingen die zo spontaan en enthousiast en vol energie meededen en dachten aan het onderzoek wil ik nogmaals hartelijk danken voor hun inzet.

En dan nog Wim Lourens, omdat je me alle vrijheid gaf mezelf te ontwikkelen, altijd de tijd nam met me te brainstormen, maar vooral ook voor het vertrouwen dat je altijd in me had. Lo Cohen, die me, als mijn natuurkundeleraar op de middelbare school, aan den lijve liet ervaren wat inhoudelijk motiveren is en me zo nieuwsgierig maakte naar de wereld om me heen dat ik natuurkunde wilde gaan studeren. Henk Mos voor de ruimte die je me gaf voor het afronden van de promotie binnen mijn nieuwe aanstelling bij ICT-beta en Roelof Ruules, voor het altijd met raad en daad paraat staan voor eerste hulp bij plaatjes-en-software -problemen.

Ten slotte nog dank voor degenen die buiten het werk altijd voor me klaar stonden. In het bijzonder Aukje, Mabelle, Marlies en Nynke omdat, al waren het er veel te weinig, de avondjes en lunches met jullie hielpen me de nodige afstand van het onderzoek te nemen, en ik hoop dat de frequentie nu een beetje omhoog kan. Tanja, bedankt voor het opdringen van alle muziek en het luisteren naar mijn gezeurpiepzeur. Pleuni, bedankt voor de gezellige weekendjes waar ik weer energie uithaalde om er weer tegen te kunnen (nooit meer: ja het is nu echt bijna af, zucht). Nu het af is kan ik me vol op het wii-koppen storten en je wat tegenstand gaan bieden. Papa en mama, dank voor alles: jullie onvoorwaardelijke liefde die ik altijd voel, de lieve kaartjes, de gezellige logeerweekenden, de relativerende telefoongesprekjes en de steun die jullie me altijd in alles geven.

En als laatste, en belangrijkste Jacques, mijn lief. Met jou is alles fijn, zelfs het stressen had samen met jou iets gezelligs, maar ik kijk toch heel erg uit naar weekenden die geheel promotie-vrij zijn (al kan het eigenlijk niet nog fijner worden dan het al is).

## Curriculum vitae

Marjon Engelbarts werd op 28 april 1974 geboren in Doetinchem. In 1992 behaalde zij haar VWO diploma aan het Sint Ludgercollege te Doetinchem en ging daarna natuurkunde studeren aan de Universiteit Utrecht. In januari 1998 studeerde zij af in de richting experimentele natuurkunde binnen de onderzoeksgroep Fysica van de mens. Na haar afstuderen kwam ze in dienst als junior onderzoeker/docent bij de werkgroep Fysische informatica aan de universiteit Utrecht en werkte hier aan het inzetten van ICT-middelen binnen het onderwijs. Vanuit deze functie begeleidde zij onder andere het afstudeeronderzoek van Pim van Yperen die de eerste versie van het lichtsnelheidsexperiment ontwikkelde. Voor deze website ontvingen Engelbarts en van Yperen eind 2000 de 'Thinkquest voor de klas'-prijs. Op grond van de positieve ervaringen met deze website werd toen besloten het onderzoek voort te zetten en uit te breiden. Omdat het vervolgonderzoek zich concentreerde op de didactische aspecten van het experimenteren op afstand werd het voortgezet binnen de afdeling Natuurkunde-didactiek van het Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen (CD- $\beta$ ) te Utrecht. Het promotieonderzoek werd in deeltijd uitgevoerd omdat Marjon gedurende het promotieonderzoek was aangesteld als assistent onderwijsmanager en coördinator ICT- en onderwijs van het departement Natuur- en sterrenkunde van de bètafaculteit. Binnen die functie leidde zij het door de stichting SURF gesubsidieerde en in samenwerking met de Universiteit van Amsterdam uitgevoerde onderwijsvernieuwingproject 'Interactieve Beta-leeromgeving (IBL)', was ze onder andere verantwoordelijk voor de bemensing van het departementale onderwijs en werkte ze aan het coördineren en ondersteunen van de inzet van ICT-middelen binnen het onderwijs van het departement. Sinds september 2008 is ze werkzaam als coördinator ICT & onderwijs van de gehele Bètafaculteit.



## FISME Serie, voortzetting van de CD- $\beta$ Wetenschappelijke Bibliotheek

*Onder redactie van:*

*K.P.E. Gravemeijer*

*A. Pilot*

*A.J. Waarlo*

1. Didactiek in Perspectief - P.L. Lijnse, W. de Vos, eds.
2. Radiation and Risk in Physics Education - H.M.C. Eijkelhof
3. Natuurkunde-onderwijs tussen Leefwereld en Vakstructuur - R.F.A. Wierstra
4. Een Onverdeelbare Eenheid - M.J. Vogelesang
5. Betrokken bij Evenwicht - J.H. van Driel
6. Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic particles: A Central Problem in Secondary Science Education - P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos, A.J. Waarlo, eds.
7. Kwaliteit van Kwantiteit - H.E. Elzenga
8. Interactieve Video in de Nascholing Reken-wiskunde - F. van Galen, M. Dolk, E. Feijs, V. Jonker, N. Ruesink, W. Uittenbogaard
9. Realistic Mathematics Education in Primary Schools - L. Streefland, ed.
10. Ontwikkeling in Energieonderwijs - A.E. van der Valk
11. Methoden in het Reken-wiskundeonderwijs - K. Gravemeijer, M. van den Heuvel-Panhuizen, G. van Donselaar, N. Reusink, L. Streefland, W. Vermeulen, E. te Woerd, D. van de Ploeg
12. De Volgende Opgave van de Computer - J. Zuidema en L. van der Gaag
13. European Research in Science Education - P.L. Lijnse, ed.
14. Realistic Mathematics Education - K. Gravemeijer
15. De Grafische Rekenmachine in het Wiskundeonderwijs - L.M. Doorman, P. Drijvers, M. Kindt
16. Making sense - Simulation-of-Research in Organic Chemistry Education - H. van Keulen
17. Perspectives on Research in Chemical Education - O. de Jong, P.H. van Roon, W. de Vos, eds.
18. A Problem-Posing Approach to Teaching the Topic of Radioactivity - C. W.J.M. Klaassen
19. Assessment and Realistic Mathematics Education - M. van den Heuvel-Panhuizen
20. Teaching structures in chemistry - An Educational Structure for Chemical Bonding - G.M. van Hoeve-Brouwer
21. Regulatie en homeostase als onderwijsthema: een biologie-didactisch onderzoek - J. Buddingh'
22. Over Natuurkundedidactiek, Curriculumontwikkeling en Lerarenopleiding - P.L. Lijnse en T. Wubbels
23. Integratie en Toepassing van Biologische Kennis - Ontwikkeling en Onderzoek van een Curriculum rond het thema 'Lichaamsprocessen en Vergift' - H. Roebertsen
24. Het thema 'reproductie' in het schoolvak biologie - P.C.F. Reygel
25. Teaching Electrochemical Cells - A study on Teachers Conceptions and Teaching Problems in Secondary Education - J.J.C. Acampo
26. The role of Context and Models in the Development of Mathematical Strategies and Procedures - K. Gravemeijer
27. Thermodynamica leren onderwijzen - W.H. Kaper
28. Interessegeoriënteerd Natuur- en Scheikundeonderwijs - Een studie naar onderwijsontwikkeling op de Open Schoolgemeenschap Bijlmer - R. Genseberger
29. Flexibilization of mental arithmetics strategies on a different knowledge base - The empty number line in a realistic versus gradual program design - A.S. Klein
30. A Problem Posing Approach to Teaching an Initial Particle Model - M.J. Vollebregt
31. Met het oog op integratie - Een studie over integratie van leerstof uit de natuurwetenschappelijke vakken in de tweede fase van het voortgezet onderwijs - C. Beefink

32. Verschillen tussen meisjes en jongens bij het vak rekenen-wiskunde op de basisschool – Eindrapport MOOJ-onderzoek – M. van den Heuvel-Panhuizen en H.J. Vermeer
33. Van vormleer naar realistische meetkunde – Een historisch-didactisch onderzoek van het meetkundeonderwijs aan kinderen van vier tot veertien jaar in Nederland gedurende de negentiende en twintigste eeuw – E.W.A. de Moor
34. Ontwerpend leren in het biologieonderwijs. Uitgewerkt en beproefd voor immunologie in het voortgezet onderwijs – F.J.J.M. Janssen
35. Natuur in pluralistisch perspectief; Theoretisch kader en voorbeeldlesmateriaal voor het omgaan met een veelheid aan natuurbeelden – M. Margadant-van Arcken en C.S. van den Berg
36. Duurzaamheid als leergebied; Conceptuele analyse en educatieve uitwerking – S. Lijmbach, M. Broens en D. Hovinga i.s.m. M. Margadant-van Arcken
37. A problem-posing approach to teaching decision making about the waste issue – J. Kortland
38. Teaching for Scientific Literacy: Context, Competency, and Curriculum – O. de Jong, E.R. Savelsbergh en A.H. Alblas
39. Met sprongen vooruit. Een productief oefenprogramma voor zwakke rekenaars in het getallen gebied tot 100 – een onderwijsexperiment – J.J.M. Menne
40. A gateway to numeracy. A study of numeracy in adult basic education – M. van Groenestijn
41. Reinvention of early algebra. Developmental research on the transition from arithmetic to algebra – B.A. van Amerom
42. Education in Israel on collaborative management of shared water resources – M. Dressler
43. Coping with the abstract and complex nature of genetics in biology education The yo-yo learning and teaching strategy – M.C.P.J. Knippels
44. Werken aan kwaliteitsverbetering van leerlingonderzoek. Een studie naar de ontwikkeling en het resultaat van een scholing voor docenten – Th.J.M. Smits
45. Teaching formal mathematics in primary education. Fraction learning as mathematising process – R. Keijzer
46. Leren kijken door de ontwerpersbril. Het vorm-functieperspectief als leerdoel van natuurkundeonderwijs – D.J. Boerwinkel
47. Als je begrijpt wat ik bedoel. Een zoektocht naar verklaringen voor achterblijvende prestaties van allochtone leerlingen in het wiskundeonderwijs – C. van den Boer
48. Learning algebra in a computer algebra environment. Design research on the understanding of the concept of parameter – P. Drijvers
49. Towards systems thinking in cell biology education – R.P. Verhoeff
50. Design research in statistics education. On symbolizing and computer tools – A. Bakker
51. Modelling motion: from trace graphs to instantaneous change – L.M. Doorman
52. Characteristics of meaningful chemistry education. The case of water quality – H.B. Westbroek
53. The structure of current school chemistry. A quest for conditions for escape – B. van Berkel
54. A new approach to teaching and learning mechanics – A.S. Westra
55. Ont-dekken en toe-dekken: leren over de veelvormige relatie van mensen met natuur in NME-leertrajecten duurzame ontwikkeling – D. Hovinga
56. Learning and teaching ecosystem behaviour in secondary education. Systems thinking and modelling in authentic practices. R.H.V. Westra
57. Leren vermenigvuldigen met meercijferige getallen – C. Buijs
58. Op weg naar een didactiek voor natuurkunde-experimenten op afstand. Ontwerp en evaluatie van een via internet uitvoerbaar experiment voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs – M. Engelbarts