

**ONTWERP VAN EEN LESSENSERIE OVER  
ELEKTROMAGNETISME MET EDUCATIONAL  
DESIGN RESEARCH DIE BINNEN EEN VERSNELD  
EXAMENJAAR TE REALISEREN IS  
ONDERZOEK VAN ONDERWIJS, NATUURKUNDE**

JUNI 2024

MIKE WASSENAAR (S8305552)

BEGELEIDERS: HENK POL, KIRSTEN STADERMANN

**UNIVERSITY OF TWENTE.**



# 1. SAMENVATTING

Deze ontwerpstudie beschrijft het ontwerp van een lessenserie van vier lessen over het onderwerp elektromagnetisme als onderdeel van het natuurkunde examenprogramma in het voortgezet wetenschappelijk onderwijs (vwo), die binnen de context van een versneld examenjaar uitvoerbaar is. Voor veel leerlingen is elektromagnetisme een conceptueel lastig onderwerp dat ook nog eens een aantal specifieke wiskundige vaardigheden vraagt die niet iedere leerling al beheerst.

De context in het voortgezet algemeen volwassenen onderwijs (vavo) zorgt voor uitdagingen die in het reguliere onderwijs zo niet voorkomen: De leerlingen volgen een traject van een versneld examenjaar waarin de vwo-natuurkunde examenstof uit leerjaren 4, 5 en 6 in ongeveer 100 klokuren vakles gegeven wordt hoewel er in het reguliere onderwijs 480 studielasturen voor staan.

Mijn werkgever Luzac biedt binnen deze context particulier onderwijs aan in kleine lesgroepen (tot 18 leerlingen) met een intensieve persoonlijke begeleiding. Naast de beperkte les- en contacttijd zijn er beperkt practicummaterialen en ontbreekt de ondersteuning van een technisch onderwijsassistent (TOA) Het instroomniveau in de vwo-natuurkunde examenklassen is erg divers. Zo zijn er leerlingen die, zonder voorkennis van natuurkunde uit de 'tweede fase', van profiel wisselen naar Natuur en Techniek (NT) of Natuur en Gezondheid (NG). Tot slot zijn er leerlingen die na een onvoldoende voor natuurkunde in het hoger algemeen voortgezet onderwijs (havo) toch het versnelde jaar bij vwo gaan doen, met natuurkunde in hun vakkenpakket.

Bovengenoemde uitdagingen zijn voor mij aanleiding om deze ontwerpstudie uit te voeren. Voor het ontwerpen van een lessenserie over elektromagnetisme voor het vwo maak ik gebruik van *Educational Design Research* (EDR). EDR combineert onderzoek en ontwerp om effectieve onderwijsoplossingen te ontwikkelen en te evalueren. Een literatuurstudie biedt daarbij inzicht in de beste praktijken en leertheorieën. Door iteratieve ontwikkeling en evaluatie kan de lessenserie worden aangepast op basis van feedback en resultaten, resulterend in een onderbouwde en effectieve lessenserie.

Uit de literatuurstudie volgen twee hoofdonderwerpen die mogelijk kunnen helpen bij het conceptueel leren van elektromagnetisme. Dat zijn het leren door middel van ervaren van natuurkundige concepten en het verbeteren van de bij elektromagnetisme benodigde wiskundige vaardigheden en ruimtelijk inzicht.

In mijn ontwerpstudie doorloop ik twee keer een ontwerpcyclus. De eerste keer met een lessenserie van vijf lessen, ontworpen op basis van mijn praktijkervaring in het geven van lessen over elektromagnetisme tot aan het begin van dit Onderzoek van Onderwijs (OVO). De tweede keer met een lessenserie van vier lessen waarin ik, na evaluatie van de eerste lessenserie, adviezen uit de literatuur geïmplementeerd heb die mogelijk tot verbetering kunnen leiden. Van die tweede lessenserie heb ik deze verbeteringen geëvalueerd.

Uit de evaluatie van een video-analyse van de eerste lessenserie, gegeven aan één 5 vwo leerling, volgt een lijst van dertig aandachtspunten. Binnen de context van dit onderzoek zijn daarvan twee hoofdonderwerpen gekozen met daarin zestien van de dertig gevonden aandachtspunten.

Deze zestien aandachtspunten zijn gekoppeld aan literatuur en met de adviezen daaruit is een tweede, verbeterde lessenserie ontworpen. Deze lessenserie is gegeven aan een groep van negen 6 vwo leerlingen in het versnelde examenjaar. Middels video-opnames is de uitwerking ervan op die zestien aandachtspunten geanalyseerd en geëvalueerd.

Uit de resultaten blijkt dat kleine 'broekzakexperimenten', korte video's van lastiger uit te voeren experimenten en applets bij kunnen dragen aan het conceptueel leren van natuurkundige concepten en fenomenen door deze zelf te ervaren. Het lukt niet om alle geplande experimenten binnen de boven besproken randvoorwaarden uit te voeren, met name omdat practicummaterialen niet beschikbaar waren of de voorbereiding ervan teveel tijd vroeg. Uit de resultaten volgt ook dat het zinvol is om eerst aandacht te besteden aan de benodigde wiskundige vaardigheden en ruimtelijk inzicht. Dit leidt tot een betere transfer naar de natuurkundige context van elektromagnetisme.

Praktische resultaten: Mijn onderzoek heeft er mede toe bijgedragen dat het Programma van Toetsing en Afsluiting (PTA) bij Luzac werd aangepast.

Verder zijn in het onderzoek een aantal eenvoudige demoproeven ontwikkeld voor gebruik bij elektromagnetisme die in de lessen in een versneld examenjaar gebruikt kunnen worden.

Maar het mooiste resultaat is dat in vergelijking met eerdere schooljaren de meeste leerlingen elektromagnetisme met de door mij ontwikkelde lessenserie nu makkelijker begrijpen.

## 2. INHOUDSOPGAVE

1.	Samenvatting.....	1
2.	Inhoudsopgave .....	3
3.	Inleiding .....	4
3.1	Persoonlijke aanleiding .....	4
3.2	Analyse van de bestaande situatie: context van Luzac .....	5
3.3	Analyse van het vakdidactische probleem: elektromagnetisme in het vwo .....	7
3.4	Onderzoeksdoel en ontwerpeisen .....	9
4.	Ontwerp en onderzoek eerste lessenserie .....	10
4.1	Onderzoeksonwerp .....	10
4.2	Implementatie.....	11
4.3	Resultaten eerste ontwerpcyclus .....	12
4.4	Resultaten versus ontwerpeisen .....	15
5.	Ontwerp en onderzoek tweede lessenserie .....	18
5.1	Verbeteringen bij ontwerpeis D (conceptueel begrip) .....	18
5.2	Verbeteringen bij ontwerpeis E (wiskundige vaardigheden) .....	20
5.3	Resultaten tweede ontwerpcyclus .....	22
6.	Conclusie en discussie .....	26
6.1	Samenvatting en resultaten .....	26
6.2	Persoonlijke resultaten na deze ontwerpstudie .....	27
6.3	Discussie.....	27
6.4	Beperkingen ontwerp en onderzoek .....	28
6.5	Aanbevelingen.....	29
7.	Bibliografie .....	30
8.	Bijlagen .....	32
8.1	Lesplannen en analyse van eerste lessenserie .....	32
8.2	Aandachtspunten uit analyse eerste lessenserie.....	58
8.3	Aandachtspunten uit eerste lessenserie per ontwerpeis .....	61
8.4	Lesplannen en analyse van tweede lessenserie .....	63

## 3. INLEIDING

### 3.1 PERSOONLIJKE AANLEIDING

Met veel plezier en over het algemeen goede resultaten gaf ik voor het begin van deze ontwerpstudie al vier schooljaren natuurkundelessen aan eindexamenklassen bij Luzac Opleidingen.

Luzac biedt particulier voortgezet onderwijs voor alle leerjaren in kleine lesgroepen (tot 16 leerlingen) met daarbij intensieve begeleiding door mentoren. De eindexamenklassen volgen het vavo-programma (voortgezet algemeen volwassenenonderwijs) in een versneld examenjaar. Daarin zijn er meer leerdoelen per les en een hoger lestempo in vergelijking met het reguliere vo (voortgezet onderwijs). Als gevolg daarvan is er minder tijd beschikbaar per onderwerp. Bij Luzac is het instroomniveau van leerlingen in het eindexamenjaar sterk gedifferentieerd. Sommige leerlingen komen, net als in het reguliere vo, met goede resultaten uit 5 vwo. Echter is de meerderheid gezakt voor het vwo op onder andere natuurkunde, stromen in 1 jaar op van havo (soms met een onvoldoende voor natuurkunde) of wisselen zelfs van profiel, dus zonder dat ze natuurkundelessen in de bovenbouw hebben gehad. Bij Luzac zijn beperkt practicumhulpmiddelen beschikbaar en ontbreekt TOA-ondersteuning (Inspectie van het Onderwijs, 2012). De hier in het kort geschetste context van Luzac wordt in paragraaf 3.2 verder uitgewerkt.

Over het algemeen is mijn ervaring dat het binnen de context van Luzac bij de meeste onderwerpen van natuurkunde prima lukt om de benodigde kennis over te brengen op leerlingen en ze voldoende vaardigheden bij te brengen om succesvol te zijn bij hun examens.

Echter, bij een conceptueel onderwerp als elektromagnetisme merk ik ieder schooljaar weer dat leerlingen zich de benodigde vaardigheden moeilijk eigen maken. Dat leid ik af aan reacties en vragen van leerlingen bij het onderwerp elektromagnetisme. Wat me daarbij ieder schooljaar opnieuw opvalt, is dat:

- leerlingen het vaak moeilijk vinden om zich voor te stellen hoe elektromagnetisme nou eigenlijk werkt
- een deel van de leerlingen de voor het aanleren van elektromagnetisme benodigde wiskundevaardigheden en ruimtelijk inzicht ontbeert

Uit vakliteratuur is bekend dat:

- zelf praktisch ervaren van natuurkundige concepten goed kan werken bij het aanleren ervan (Arons, 1997; Millar, 2010)
- leerlingen natuurkunde beter kunnen leren wanneer ze modelleren als wiskundige vaardigheid beheersen (Hestenes, 1987; Etkina et al., 2006)
- dat voor het aanleren van driedimensionale contexten zoals bij elektromagnetisme ruimtelijk inzicht nodig is (Michelini et al., 2007)

Bovenstaande problemen zijn voor mij aanleiding om middels een ontwerpstudie te onderzoeken welke oplossingen uit de literatuur zouden kunnen werken binnen de context van Luzac.

## 3.2 ANALYSE VAN DE BESTAANDE SITUATIE: CONTEXT VAN LUZAC

Willen we een verbetering realiseren van het conceptuele begrip bij elektromagnetisme van leerlingen binnen de context van Luzac, dan moeten we eerst een goede beschrijving van die context geven.

Met 19 vestigingen is Luzac de grootste particuliere onderwijsinstelling van Nederland voor het vo. Luzac biedt vo van brugklas tot en met diploma op mavo-, havo- en vwo-niveau. De examenklassen volgen een versneld examenjaar zoals bij het vavo. Voor mavo en havo komt dat neer op twee-leerjaren-in-één en voor vwo zelfs op drie-leerjaren-in-één. In de praktijk komt dat er voor vwo-natuurkunde op neer dat de stof van leerjaren 4, 5 en 6 wordt behandeld in één examenjaar.

### Tijdsindeling

Een leerjaar bestaat bij Luzac uit drie periodes van ieder acht lesweken, elk afgesloten met een schoolexamenweek. Na die drie perioden is er nog een herkansingsweek en zijn er vier lesweken examentraining om de leerlingen optimaal op het eindexamen voor te bereiden. Bij elkaar zijn er ongeveer 100 contacturen beschikbaar voor vaklessen. Daarnaast besteden leerlingen een vergelijkbaar aantal uren aan natuurkunde in de studiezaal. Voor het vak natuurkunde op vwo-niveau is een studielast van 480 uren gedefinieerd (SLO, 2019). Bij een versneld examenjaar zoals bij Luzac is minder dan de helft van die tijd beschikbaar.

Voordelen van een versneld examenjaar waarin alle vwo-natuurkundestof behandeld wordt zijn dat:

- alle eindexamenstof inclusief de benodigde basisvaardigheden relatief kort voor het eindexamen aan bod komt
- bij gezakte vwo-leerlingen alle gaten aan ontbrekende voorkennis en vaardigheden gedicht kunnen worden
- havo-leerlingen na hun natuurkunde-eindexamen het vwo-examen veelal in 1 jaar kunnen doen
- leerlingen die van profiel wisselen, dus zelfs helemaal zonder natuurkundelessen in de bovenbouw vooraf, het in 1 jaar kunnen halen

Het gevolg is wel dat iedere vakles onder tijdsdruk staat om meerdere leerdoelen in één les te bereiken. Dat is een flinke uitdaging, helemaal bij een onderwerp als elektromagnetisme dat een sterk conceptueel begrip en ruimtelijk inzicht vraagt. We verwachten naar aanleiding van deze ontwerpstudie geen veranderingen in het aantal beschikbare lessen, omdat bij alle vakken dezelfde tijdsdruk speelt. Het natuurkunde-examenprogramma zal naar verwachting niet significant veranderen en er is dan ook geen wijziging in de omvang van het PTA te verwachten. Hieruit volgt dan ook de eerste eis aan het ontwerpen van de lessenserie.

### Ontwerpeis A

*Voor het onderwerp elektromagnetisme zijn slechts vier vaklessen van een uur beschikbaar en de leerlingen moeten zich in elke les derhalve meerdere leerdoelen eigen maken.*

### Leerlingenpopulatie

Bij Luzac kunnen examenleerlingen ook vakken op een hoger niveau volgen, bijvoorbeeld een leerling die havo-eindexamen doet mee met natuurkunde op vwo-niveau. Ook zijn er leerlingen die maar in enkele vakken examen doen en zo deelcertificaten behalen. Denk bijvoorbeeld aan leerlingen die gezakt zijn op vwo of nog maar enkele deelcertificaten nodig hebben om hun diploma te completeren. Bij Luzac komen ook leerlingen die veranderen van profiel, bijvoorbeeld om alsnog geneeskunde te kunnen gaan studeren en dan een deelcertificaat voor vwo-natuurkunde nodig

hebben. Het komt ook wel eens voor dat leerlingen met een havodiploma het versnelde vwo-examenjaar doen én daarbij tegelijk van profiel wisselen.

In elke versnelde examengroep bij vwo-natuurkunde heb ik één of meer leerlingen die voor het laatst natuurkunde in de derde klas kregen. Bij een enkeling, die via mavo en havo opstroomt naar het vwo en daarbij ook nog herprofileert, kan het zelfs voorkomen dat deze leerling in klas twee voor het laatst natuurkunde heeft gehad. Meestal lukt het me om deze veelal sterk intrinsiek gemotiveerde leerlingen naar een voldoende of zelfs hoger eindcijfer te leiden. In het instroomniveau zitten grote verschillen, want er kunnen ook leerlingen met een 8 of 9 voor natuurkunde uit vwo 5 instromen. Ondanks deze verschillen werken alle leerlingen naar het eindexamen als gemeenschappelijk einddoel toe.

Een veelgebruikte lesopbouw bij Luzac is:

- voorkennis activeren over de stof van de vorige les en terugkomen op vragen die uit het maken van huiswerk volgen
- gemeenschappelijke instructie over de nieuwe leerdoelen van de huidige les volgens de studewijzer
- onder individuele begeleiding verwerkingsopdrachten maken. Al naar gelang het niveau van de leerlingen werken ze meer of minder zelfstandig. De sterkste leerlingen werken al vrij snel aan opgaven op examenniveau.

In vakliteratuur wordt deze aanpak waarbij leerlingen binnen een lesgroep op eigen niveau naar gemeenschappelijke leerdoelen toewerken ook wel convergente differentiatie genoemd (Blok, 2004; Deunk et al., 2015). Deze ontwerpstudie gaat niet verder in op de vraag hoe optimaal om te gaan met sterk gedifferentieerde lesgroepen zoals in de context van Luzac. De reden daarvoor is dat deze lesgroepen voor mij persoonlijk niet het grootste probleem in de lessen over elektromagnetisme zijn.

Voor Luzac is het van strategisch belang dat leerlingen van zeer divers instroomniveau succesvol kunnen zijn met hun schoolresultaten en daarmee is geschiktheid voor sterk gedifferentieerd lesgroepen een tweede eis.

Ontwerpeis B

*De lessenserie moet geschikt zijn voor qua niveau sterk gedifferentieerde lesgroepen.*

### **(Beperkte) practicum faciliteiten**

In vergelijking met reguliere vo-scholen zijn Luzac-vestigingen klein met niet meer dan 50 tot 200 leerlingen. Op de meeste vestigingen, waaronder die van Zwolle waar ik werk, zijn practicumvoorzieningen beperkt aanwezig (Inspectie van het Onderwijs, 2012). Er is wel enig eenvoudig practicummateriaal aanwezig en een klein budget voor aanschaf van nieuw materiaal. Bij Luzac wordt geen verdere TOA-ondersteuning geboden en docenten zijn er, in vergelijking met het reguliere vo, meer lesuren ingeroosterd. Voor voorbereiding en opruimen is dan ook weinig tijd beschikbaar. Daaruit volgt de derde ontwerpeis aan de lessenserie.

Ontwerpeis C

*Bij het inzetten van practicum voor conceptueel begrip moet rekening gehouden worden met de beperkte practicumfaciliteiten bij Luzac, zowel qua middelen, ondersteuning als voorbereidingstijd.*

### 3.3 ANALYSE VAN HET VAKDIDACTISCHE PROBLEEM: ELEKTROMAGNETISME IN HET VWO

Sinds het eindexamen van 2018 kunnen bij vwo-natuurkunde weer vragen gesteld worden over subdomein D2 Elektrische en magnetische velden. De tijdelijke afwijking die sinds de introductie van het nieuwe natuurkundeprogramma in 2016 van toepassing was, is hiermee opgeheven (College voor Toetsen en Examens, 2016).

#### Vakdidactische problemen

Uit mijn persoonlijke ervaringen blijkt dat in de context van Luzac leerlingen vaak moeite hebben met de volgende aspecten van elektromagnetisme:

- Het concept van veldlijnen is nieuw.
- Het aanvaarden dat de magnetische zuidpool zich op de geografische noordpool bevindt.
- Het concept van een magnetisch veld rondom een stroomvoerende draad en het bepalen van de richting van dat veld met de rechterhandregel.
- Bij een elektromagneet bepalen van de stroomrichting in de spoel ten opzichte van de as van diezelfde spoel. Leerlingen vinden het ook lastig om te doorzien of de windingen linksom of rechtsom draaien. Pas met dat inzicht kan de rechterhandregel worden toegepast om de richting van het magnetische veld bij een elektromagneet te bepalen.
- Het bepalen van de richting van de lorentzkracht bij een gegeven magnetisch veld en een gegeven stroomrichting met de linkerhandregel. Daarbij wordt ruimtelijk inzicht gevraagd voor het doorzien van verschillende 3D-representaties. Dat zijn bijvoorbeeld in perspectief met evenwijdige lijnen of in perspectief met verdwijnpunten. Verder wordt de representatie, waarbij de x- en y-richting in het vlak van het papier liggen en de z-richting daar loodrecht op vaak gebruikt. De z-richting wordt dan aangegeven met deze twee symbolen voor het papier in respectievelijk het papier:  $\otimes$   $\odot$
- Leerlingen herkennen vaak niet dat ze het bepalen van de richting van stroomsterkte bij bewegende geladen deeltjes al eerder hebben geleerd in de lessen over elektriciteit.
- De cirkelbeweging, met baansnelheid en middelpuntzoekende kracht, zijn bij Luzac nog niet behandeld wanneer elektromagnetisme aan bod komt. Voor de baan van geladen deeltjes moet dus eerst de cirkelbeweging worden behandeld.
- Magnetische flux vinden leerlingen een lastig, concept. Erbij komt dat bij berekeningen de loodrechte component van de magnetische veldsterkte op de winding genomen moet worden. Hoewel de leerlingen het ontbinden van krachten als vector al hebben gehad, is mijn ervaring dat ze dat de magnetische veldsterkte als vector niet gelijk herkennen.
- Bij het verband tussen inductiespanning en fluxverandering (afgeleide) herkennen leerlingen niet dat dit, wiskundig gezien, precies hetzelfde is (afgeleide) als het bepalen van de snelheidsgrafiek uit een plaatsgrafiek,.

De literatuur bevestigt het moeilijke karakter van elektromagnetisme in het algemeen. Met name het ontwikkelen van conceptueel begrip van elektromagnetisme is voor leerlingen lastig. Zo zijn elektromagnetische golven niet zichtbaar, waardoor leerlingen moeite hebben om concepten bij elektromagnetisme aan te leren. Bij het ontwikkelen van begrip van natuurkundige concepten kan het zelf praktisch ervaren daarvan door leerlingen helpen (Arons, 1997; Millar, 2010).

Zoals genoemd in paragraaf 3.2 en terugkomt in ontwerp C zijn er binnen de context van Luzac beperkte practicumfaciliteiten (Inspectie van het Onderwijs, 2012). Een mogelijke oplossing daarvoor kan zijn het gebruik van kleine demo-experimenten voor het ontwikkelen van conceptueel begrip (Berg et al., 2015). De vraag is of het ook mogelijk is om dit soort experimenten effectief binnen de context van Luzac in te zetten voor het onderwerp elektromagnetisme.



Uit bovenstaande volgt de vierde eis voor het ontwerpen van de lessenserie:

#### Ontwerpeis D

*De lessenserie moet adresseren dat het zelf ervaren door leerlingen van natuurkundige concepten een belangrijk aspect is bij het verkrijgen van conceptueel begrip over elektromagnetisme.*

#### **Voorwaarden voor leren**

Daarnaast vinden leerlingen elektromagnetisme vaak lastig, omdat er meer wiskundige aspecten bij voorkomen dan bij de meeste andere natuurkunde-onderwerpen uit het vwo-examenprogramma. Leerlingen die deze wiskundevaardigheden onvoldoende beheersen, kunnen deze aspecten niet juist combineren en tot een goed begrip van natuurkundeconcepten te komen. Leerlingen kunnen natuurkunde beter leren wanneer ze modelleren als wiskundige vaardigheid beheersen (Hestenes, 1987; Etkina et al., 2006).

Een ander probleem wat bij elektromagnetisme naar voren komt, is dat voor het leren begrijpen van driedimensionale contexten zoals bij elektromagnetisme een goed ruimtelijk inzicht nodig is (Michelini et al., 2007).

Uit mijn persoonlijke ervaringen bij Luzac met een sterk gedifferentieerd instroomniveau, weet ik dat lang niet alle instromende leerlingen deze wiskundige vaardigheden al voldoende beheersen. Uit bovenstaande twee wiskunde-aspecten volgt dan ook de vijfde eis

#### Ontwerpeis E

*Voor het leren begrijpen van de concepten bij elektromagnetisme moet de lessenserie de wiskundige vaardigheden en het ruimtelijk inzicht die daarvoor nodig zijn, overbrengen.*

### 3.4 ONDERZOEKSDOEL EN ONTWERPEISEN

Het doel van deze ontwerpstudie is het ontwikkelen en verbeteren van een lessenserie over elektromagnetisme voor een versnelde vwo-opleiding.

In deze paragraaf worden de ontwerpeisen die volgen uit paragrafen 3.2 en 3.3 bij elkaar gezet. Als eerste volgen uit de 3.2 *De context van Luzac* drie formele ontwerpeisen aan de lessenserie:

- A. Voor het onderwerp elektromagnetisme zijn slechts vier vaklessen van een uur beschikbaar en de leerlingen moeten zich in elke les derhalve meerdere leerdoelen eigen maken.
- B. De lessenserie moet geschikt zijn voor qua niveau sterk gedifferentieerde lesgroepen.
- C. Bij het inzetten van practicum voor conceptueel begrip moet rekening gehouden worden met de beperkte practicumfaciliteiten bij Luzac, zowel qua middelen, ondersteuning als voorbereidingstijd.

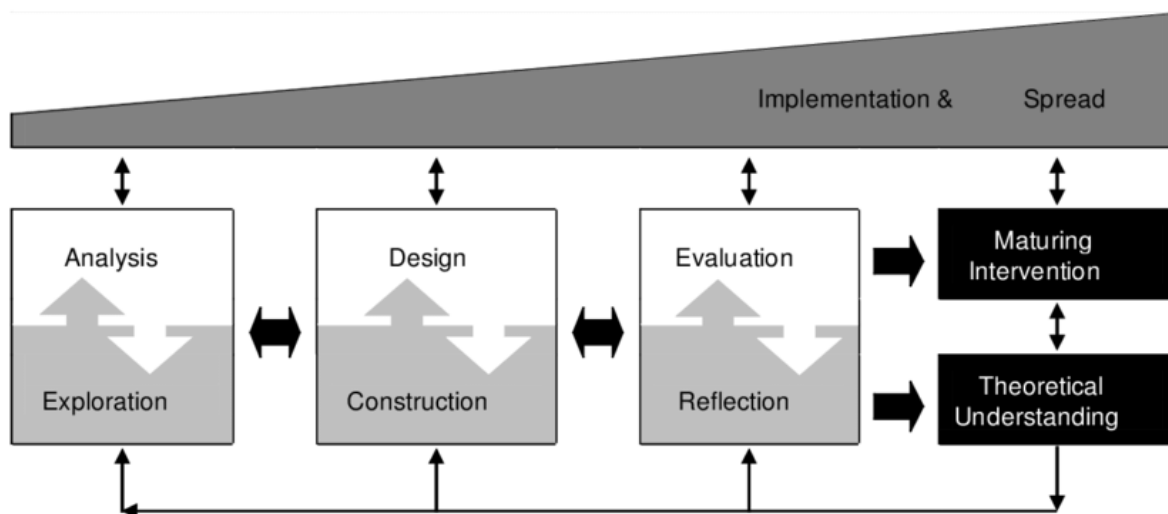
Uit 3.3 *Elektromagnetisme in het voortgezet wetenschappelijk onderwijs* volgen nog eens twee vakdidactische ontwerpeisen:

- D. De lessenserie moet adresseren dat het zelf ervaren door leerlingen van natuurkundige concepten een belangrijk aspect is bij het verkrijgen van conceptueel begrip over elektromagnetisme.
- E. Voor het leren begrijpen van de concepten bij elektromagnetisme moet de lessenserie de wiskundige vaardigheden en het ruimtelijk inzicht die daarvoor nodig zijn, overbrengen.

## 4. ONTWERP EN ONDERZOEK EERSTE LESSENSERIE

### 4.1 ONDERZOEKSONTWERP

Voor het ontwerpen van een lessenserie over elektromagnetisme voor vwo-natuurkunde maak ik gebruik van *Educational Design Research* (EDR). EDR combineert onderzoek en ontwerp om effectieve onderwijsoplossingen te ontwikkelen en te evalueren. Belangrijk daarbij is dat het om een realistisch probleem uit de onderwijspraktijk gaat dat ook in deze context onderzocht wordt. Een literatuurstudie biedt daarbij inzicht in de beste praktijken en leertheorieën. Door iteratieve ontwikkeling kan een lessenserie worden aangepast op basis van feedback en resultaten naar een onderbouwde en effectieve lessenserie (McKenney & Reeves, 2019; Plomp & Nieveen, 2013).



Figuur 1 Generic model for conducting educational design (McKenney & Reeves, 2019)

In Figuur 1 is de algemene structuur van EDR weergegeven. Dit onderzoek begint met een theoretische analyse (Theoretical Understanding, rechtsonder in Figuur 1) van de vakdidactische problemen in 3.3 en de analyse en exploratie (Analysis & Exploration, 1e blok vanaf links in Figuur 1) binnen de context van een versneld examenjaar in 3.2. Samen levert dit de ontwerpisen A t/m E op zoals weergegeven in 3.4.

De vijf ontwerpisen zijn geïmplementeerd (Implementatie, driehoek boven in Figuur 1) in het ontwerp en de constructie van (Design & Construction, 2e blok vanaf links in Figuur 1) de eerste lessenserie. Na evaluatie van en reflectie op (Evaluation & Reflection, 2e blok vanaf links in Figuur 1) de video-opnames van die eerste lessenserie is een eerste iteratie uitgevoerd. Uit die iteratie volgden ontwerp en constructie (Design & Construction, 2e blok vanaf links in Figuur 1) van de tweede lessenserie. De daarin doorgevoerde verbeteringen zijn geëvalueerd (Evaluation & Reflection, 2e blok vanaf links in Figuur 1). Deze ontwerpstudie eindigt met aanbevelingen voor een tweede implementatie van de lessenserie in 5.3.

Deze tweede iteratie heeft intussen wel plaatsgevonden en wordt ook daadwerkelijk gebruikt, maar vormt geen onderdeel meer van deze ontwerpstudie.

## 4.2 IMPLEMENTATIE

De eerste lessenserie (bijlage 8.1) werd uitgeprobeerd met één leerling uit 5 vwo. De lesgroepen in het versnelde examenjaar zijn vaak groter, maar bij het starten van deze ontwerpstudie was er slechts één leerling in 5 vwo met het vak natuurkunde in het pakket. Dat lijkt op het eerste gezicht nadelig. Het gaf echter ruimte voor kwalitatieve diepgang bij de evaluatie ervan.

In deze lessenserie worden applets gebruikt om natuurkundeconcepten bij elektromagnetisme te simuleren. Ook worden er enkele video's van experimenten ingezet om te laten zien hoe die concepten zich in de praktijk gedragen.

De opzet van de lessenserie volgt globaal de indeling van lessen zoals ik die bij Luzac al gebruikte. In de eerste lesfase is dat terugkomen op het huiswerk en de leerdoelen van de stof uit de vorige les.

In het tweede deel van de lessen volgt de leskern met uitleg over nieuwe leerdoelen met gebruik van applets en of video's. De resterende tijd van de les is beschikbaar voor het zelfstandig maken van verwerkingsopdrachten. Bij klassen met meer leerlingen kan dan gedifferentieerd worden in de mate van begeleiding al naar gelang het niveau en zelfvertrouwen van de leerling met het onderwerp elektromagnetisme.

Leerlingen werken als huiswerk tussen de vaklessen zelfstandig verder met verwerkingsopdrachten. Uit vragen die ik door de jaren heen aan leerlingen stel, weet ik dat ze daar gemiddeld ongeveer een uur per vakles aan besteden.

In bijlage 8.1 *Lesplannen en videoanalyse eerste lessenserie* staan zowel de lesplannen als de uitgeschreven videoanalyses van elke les.

### 4.3 RESULTATEN EERSTE ONTWERPCYCLUS

Van de eerste lessenserie zijn video-opnames gemaakt en de waarnemingen daarvan zijn uitgeschreven en na elk lesplan in bijlage 8.1 weergegeven. De evaluatie van de waarnemingen uit de lessen levert een lijst van 30 aandachtspunten die in mijn optiek mogelijk voor verbetering vatbaar zijn. Deze aandachtspunten uit de eerste lessenserie zijn weergegeven in tabel 1. Een uitgebreidere beschrijving bevindt zich in bijlage 8.2.

Alle gevonden aandachtspunten zijn weergegeven in de tabel aan het einde van deze paragraaf. Aandachtspunten 1 t/m 16 worden verder onderzocht. In de volgende kolommen is te zien in welke les elk aandachtspunt gevonden is. De kolommen Practicum en Wiskunde geven aan onder welk aandachtsgebied de 16 uitgewerkte aandachtspunten vallen. In de laatste twee kolommen is voor de niet verder onderzochte aandachtspunten een korte toelichting gegeven waarom die niet verder onderzocht zijn (N1 t/m N14).

Tien van de gevonden aandachtspunten (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13) volgen uit problemen bij het begrip van algemene natuurkundige concepten. Leerlingen hebben hier niet alleen moeite mee alleen op bij elektromagnetisme, maar ook bij onderwerpen als kracht en beweging en stromende elektriciteit. Binnen de context van Luzac gebruik ik hulpmiddelen als video's van korte, relevante experimenten en applets om simulaties van practica en fenomenen te kunnen laten zien en ervaren. Deze tien aandachtspunten staan in verband met ontwerpeis D:

*De lessenserie moet adresseren dat het zelf ervaren door leerlingen van natuurkundige concepten een belangrijk aspect is bij het verkrijgen van conceptueel begrip over elektromagnetisme*

Bij elektromagnetisme zijn veel contexten driedimensionaal en het daarvoor benodigde ruimtelijk inzicht was bij de proefleerling nog onvoldoende ontwikkeld. Dat levert nog eens zes aandachtspunten (10, 11, 12, 14, 15, 16) op voor het ontwikkelen van de voor elektromagnetisme benodigde vaardigheden met wiskundige modellen en ruimtelijk inzicht. Deze zes aandachtspunten staan in verband met ontwerpeis E:

*Voor het leren begrijpen van de concepten bij elektromagnetisme moet de lessenserie de wiskundige vaardigheden en het ruimtelijk inzicht die daarvoor nodig zijn, overbrengen.*

In paragrafen 5.2 en 5.3 zijn deze 16 aandachtspunten verder uitgewerkt en gekoppeld aan vakliteratuur. In het ontwerp van de tweede lessenserie zijn mogelijke verbeteringen daarvoor geïmplementeerd.

De overige aandachtspunten (N1 t/m N14) worden in deze ontwerpstudie niet verder uitgewerkt. Daarvan hebben vijf aandachtspunten betrekking op de didactiek van de docent in het algemeen. Nog eens vier aandachtspunten volgen uit de context bij Luzac in een versneld examenjaar en beperkte practicummiddelen. De overige vijf aandachtspunten zijn losstaande zaken, als het opnemen van de zelfwerkfase voor de videoanalyse, over de gebruikte lesmethode (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014) en het gebruik van applets en video's.

Tabel 1 - Aandachtspunten uit eerste lessenserie

Aandachtspunten uit videoanalyse eerste lessenserie.	Ontwerpeis D	Ontwerpeis E	Niet verder meegenomen	Toelichting op niet verder meenemen in deze ontwerpstudie.
<b>Les 1 - Magneetvelden</b>				
1. Permanente magneet laten ervaren	X			
2. Bordenwisper op whiteboard	X			
3. Voorkennis activeren van andere krachten op afstand	X			
4. Inclinatiernaald gebruiken	X			
5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes	X			
N1. Vaker een zelfwerkfase inbouwen			X	Luzac specifieke uitdaging met weinig vaklessen. Dit gebeurt ook in de studie-uren.
<b>Les 2 - Elektromagneten</b>				
N2. Bondiger formuleren bij uitleggen			X	Algemene didactiekverbetering
N3. Zelfwerkfase ook opnemen			X	Techniek video-opnames
6. Magneetveld rond draad demonstreren met video	X			
7. Spoel als magneet gebruiken	X			
N4. Stel vragen aan leerlingen			X	Algemene didactiekverbetering
N5. Antwoord hypothese bevestigen bij één specifieke vraag			X	Algemene didactiekverbetering
8. Relais demonstreren met video	X			
<b>Les 3 - Lorentzkracht op draad</b>				
N6. Vraag 24a staat onjuist geformuleerd in het boek			X	Heeft betrekking op lesmethode
N7. Leerling eerst vragen om zelf uit te leggen, dan pas zelf aanvullen			X	Algemene didactiekverbetering
9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video	X			
N8. Het gebruik van applets of video's i.p.v. demoproeven			X	Te algemeen geformuleerd. Enkele contexten komen terug bij andere aandachtspunten.
10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)		X		
11. Verschillende driedimensionale representaties benoemen		X		
<b>Les 4 - Lorentzkracht op deeltje</b>				
12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?		X		
N9. Wiskundig gebruik van formules			X	Hoewel vaak nodig in lesgroepen, hier niet specifiek verder onderzocht.

	Ontwerpis D	Ontwerpis E	Niet verder meegenomen	
<b>Aandachtspunten uit videoanalyse eerste lessenserie.</b>				<b>Toelichting op niet verder meenemen in deze ontwerpstudie.</b>
N10. Leerling trainen op inzicht en minder twijfelen			X	Algemene didactiekverbetering
13. Cirkelbaan behandelen bij lorentzkracht op geladen deeltje	X			
<b>Les 5 - Inductie</b>				
N11. Omgaan met uitdagingen in het versnelde examenjaar			X	Luzac specifieke uitdaging, komt soms terug bij lesplannen en -observaties
<b>14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg</b>		X		
N12. Les waar mogelijk interactief aanpassen op aanwezig voorkennis			X	Luzac specifieke mogelijkheid, komt wel terug bij lesplannen en -observaties
N13. Het gebruik van applets			X	Dit zou een onderzoek op zich zijn
N14. Leerlingen mogen direct hun vraag stellen tijdens uitleg			X	Luzac specifieke mogelijkheid, komt soms wel terug bij lesplannen en -observaties
15. Zelf vectoren ontbinden met de formule $\Phi = B_{\perp} \cdot A$ in plaats van met de formule in BINAS		X		
16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning		X		

## 4.4 RESULTATEN VERSUS ONTWERPEISEN

In deze paragraaf volgt een opsomming van gevonden aandachtspunten uit de eerste lessenserie en worden deze gekoppeld aan de ontwerpeisen.

Tabel 2 - Ontwerpeisen

A	Voor het onderwerp elektromagnetisme zijn slechts vier vaklessen van een uur beschikbaar en de leerlingen moeten zich in elke les derhalve meerdere leerdoelen eigen maken.
B	De lessenserie moet geschikt zijn voor qua niveau sterk gedifferentieerde lesgroepen.
C	Bij het inzetten van practicum voor conceptueel begrip moet rekening gehouden worden met de beperkte practicumfaciliteiten bij Luzac, zowel qua middelen, ondersteuning als voorbereidingstijd.
D	De lessenserie moet adresseren dat het zelf ervaren door leerlingen van natuurkundige concepten een belangrijk aspect is bij het verkrijgen van conceptueel begrip over elektromagnetisme.
E	Voor het leren begrijpen van de concepten bij elektromagnetisme moet de lessenserie de wiskundige vaardigheden en het ruimtelijk inzicht die daarvoor nodig zijn, overbrengen.

### 1. Permanente magneet laten ervaren

Leerlingen kennen het verschijnsel magnetisme op zich wel, maar weten niet hoe het precies werkt. Verder is magnetisme is niet gelijk zichtbaar. Koppeling met ontwerpeis D (conceptueel begrip).

### 2. Bordenwisser op whiteboard

Leerlingen snappen weliswaar dat een bordenwisser aan het whiteboard plakt door magnetisme, maar weten niet hoe dat nou precies werkt. Koppeling met ontwerpeis D (conceptueel begrip).

### 3. Voorkennis activeren van andere krachten op afstand

Krachten die op afstand werken zijn voor leerlingen niet zo vanzelfsprekend om aan te leren als concrete contactkrachten zoals duwkracht, spankracht, veerkracht en weerstandskrachten. Koppeling met ontwerpeis D (conceptueel begrip).

### 4. Inclinatiemaat gebruiken

Leerlingen vinden het lastig om voor te stellen of aan te nemen dat het aardmagnetische veld niet evenwijdig aan het aardoppervlak naar het noorden gericht is. Bij onze breedtegraad maakte dit magnetisch veld daar een hoek van ongeveer 65 graden met het aardoppervlak. Koppeling met ontwerpeis D (conceptueel begrip).

### 5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes

Nietjes zijn weliswaar van ijzer maar erg klein en ze haken gemakkelijk in elkaar. Zo is voor leerlingen in de klas nauwelijks te zien dat ze aan elkaar hangen en ook om zelf mee te experimenteren zijn nietjes lastig. Koppeling met ontwerpeis D (conceptueel begrip).



## 6. Magneetveld rond draad demonstreren met video

Om het magneetveld rond een draad te demonstreren is aardig wat voorbereidingstijd en opruimtijd nodig en die is in de context van Luzac eigenlijk niet echt beschikbaar. Daarnaast zo'n experiment niet zomaar spontaan te demonstreren. Koppeling met ontwerp D (conceptueel begrip).

## 7. Spoel als magneet gebruiken

Een deel van de leerlingen heeft moeite om de rechterhandregel bij een elektromagneet toe te passen. Dat komt vooral omdat ze zich de bedoelde 3D weergave niet goed kunnen voorstellen op het platte tekening en sommigen denken dat de richting van de stroomsterkte door de as van de spoel gaat. Koppeling met ontwerp D (conceptueel begrip).

## 8. Relais demonstreren met video

De werking van een relais is voor leerlingen moeilijk voor te stellen. Koppeling met ontwerp D (conceptueel begrip).

## 9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video

Lorentzkracht is voor leerlingen over het algemeen een compleet nieuwe kracht en ze hebben moeite een voorstelling van de natuurkundige context te maken. Koppeling met ontwerp D (conceptueel begrip).

## 10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)

Veel leerlingen hebben moeite met driedimensionale contexten bij opgaven over de richting van de Lorentzkracht. Ze beheersen de benodigde voorkennis en vaardigheid uit de wiskunde onvoldoende of herkennen die niet bij natuurkundige contexten. Koppeling met ontwerp E (wiskundige vaardigheden).

## 11. Verschillende driedimensionale representaties benoemen

Net als bij het vorige aandachtspunt aan bod kwam, hebben veel leerlingen moeite met driedimensionale contexten bij natuurkunde opgaven, omdat hun vaardigheid daarmee nog onvoldoende is of omdat zij deze niet uit de wiskunde herkennen. Koppeling met ontwerp E (wiskundige vaardigheden).

## 12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?

Bij elektromagnetisme herkennen leerling vaak niet dat de richting van de Lorentzkracht bij een deel van de opgaven uit de context van de vraag te herleiden is. Zonder dat inzicht kunnen ze de vraag niet doorgronden, laat staan oplossen. Koppeling met ontwerp E (wiskundige vaardigheden).

### 13. Cirkelbaan behandelen bij lorentzkracht op geladen deeltje

In het Programma van Toetsing en Afsluiting bij Luzac is de cirkelbaan nog niet aan bod geweest wanneer elektromagnetisme wordt behandeld. De cirkelbaan komt bij Luzac pas in periode drie bij gravitatie aan bod, terwijl elektromagnetisme al in periode twee zit. Vanwege de diverse instroomprofielen bij Luzac heeft een deel van de leerlingen nog niet eerder de cirkelbaan gehad in 5 havo of 5 vwo. Koppeling met ontwerp 4 (conceptueel begrip).

### 14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg

Veel leerlingen kunnen een uitleg in alleen woorden lang niet altijd goed volgen of daarmee de context voldoende goed leren doorgronden. Koppeling met ontwerp 5 (wiskundige vaardigheden).

### 15. Zelf vectoren ontbinden met de formule $\Phi = B_{\perp} \cdot A$ in plaats van met de formule in BINAS

Voor veel leerlingen blijkt het lastig om te herkennen dat bij het bepalen van de grootte van de flux door een winding of spoel het ontbinden van het B-veld in een component loodrecht op de spoel dezelfde vaardigheid betreft als het ontbinden van krachtvectoren. Daardoor is bijvoorbeeld de uitleg niet te volgen over van welke hoek BINAS uit gaat in de formule. Koppeling met ontwerp 5 (wiskundige vaardigheden).

### 16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning

Magnetische flux en inductiespanning zijn voor leerlingen bij leren van elektromagnetisme nog weer twee voor hen abstracte grootheden. Mede daardoor zien ze niet in dat de inductiespanning niets meer of minder is dan de afgeleide van de magnetische flux, ofwel evenredig met de fluxverandering. Koppeling met ontwerp 5 (wiskundige vaardigheden).

## 5. ONTWERP EN ONDERZOEK TWEEDE LESSENSERIE

In dit hoofdstuk zijn in de eerste twee paragrafen de verbeteringen op de gevonden aandachtspunten uit de eerste lessen serie weergegeven. Deze aandachtspunten zijn daarbij gegroepeerd naar ontwerpeis D (conceptueel begrip) in de eerste paragraaf en ontwerpeis E (wiskundige vaardigheden) in de tweede paragraaf. In de derde paragraaf volgen de resultaten van de verbeteringen in de tweede lessenserie.

De eerste lessenserie bestond uit vijf lessen zoals gegeven in klas vwo 5. Vanwege de tijdsdruk in het versnelde examenjaar (ontwerpeis A) is de tweede lessenserie ingekort naar vier klokuren vakles.

### 5.1 VERBETERINGEN BIJ ONTWERPEIS D (CONCEPTUEEL BEGRIP)

#### 1. Permanente magneet laten ervaren

Leerlingen gaan in tweetallen zelf experimenteren met magneten uit de magneetkoffer. Laat ze zelf ervaren wanneer ze elkaar aantrekken en afstoten en of dat sterker of zwakker wordt met de afstand. Eén magneet is draaibaar op tafel en te richten met een andere magneet.

Geef ze vervolgens per tweetal twee grote paperclips om ook het concept van magnetische influentie te kunnen onderzoeken.

Teken tot slot op het whiteboard het magnetische veld bij een permanente magneet en benoem daarbij dat het veld buiten de magneet van de Z- naar de N-pool gaat. Een kompasnaald wijst met z'n noordpool in de richting van dit veld. Teken nu aan beide kanten een stuk ijzer en beredeneer met de leerlingen hoe dat gemagnetiseerd wordt. Als het goed is, is de conclusie dat het ijzer daarna door beide magnetische polen aangetrokken wordt. Een magneet trekt ijzer dus altijd aan.

#### 2. Bordenwisser op whiteboard

Demonstreer dat de bordenwisser op het whiteboard blijft plakken en vraag de leerlingen om dat te verklaren. Benoem als dat nodig is dat er ijzer achter het bord zit en vraag nogmaals waarom er een aantrekkende kracht is terwijl er maar één magneet is. Leg vervolgens het begrip magnetische influentie uit met behulp van illustraties uit (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014) en benoem dat met name nikkel en ijzer goed te magnetiseren metalen zijn (Berg & Bruning, 1994).

#### 3. Voorkennis activeren van andere krachten op afstand

Een algemeen verhaal over krachten, en dan met name krachten die op afstand werken, is nodig voor het begrip van magnetische kracht en het daaruit volgende magnetische veld. Daarmee wordt gelijk de aanwezige voorkennis over magnetisme in het algemeen geactiveerd.

Vraag leerlingen naar wat ze al weten over magnetisme en magneten. Meestal komt er wel iets van tegengestelde polen die elkaar afstoten (soms met plus en min) en andersom. Laat vervolgens met twee magneten uit de magneetkoffer zien dat tegengestelde polen elkaar aantrekken en dat gelijke polen elkaar afstoten.

Vraag leerlingen of ze andere krachten dan magnetische kracht kennen die op afstand werken en of ze daar voorbeelden bij weten. Meestal komen ze met zwaartekracht en/of elektrische kracht. Bevestig de juiste elementen daaruit en benoem daarbij dat deze krachten over het algemeen kleiner worden naarmate de afstand groter wordt.

#### 4. Inclinatiennaald gebruiken

Bij het aanschaffen van kompasjes zag ik dat er ook betaalbare inclinatiennaalden zijn en heb ik daarvoor gekozen, omdat die meer mogelijkheden biedt. Dit is een extra element om het concept magnetische velden verder uit te bouwen en de verbinding te leggen met de exacte richting het aardmagnetisch veld. Draai de inclinatiennaald eerst in horizontale positie om deze als kompas te gebruiken. Vraag waarom de naald een vaste kant op wijst. Bepaal vervolgens samen met de leerlingen of deze richting inderdaad met het noorden overeenkomt. Gebruik hierbij bijvoorbeeld Google Maps om de ligging van het gebouw en lokaal te bepalen. Loop er vervolgens mee langs bij de leerlingen en laat ze met hun magneten de richting ervan beïnvloeden. Varieer hierbij de afstand en laat zien dat de inclinatiennaald de richting van het veld van de aarde en dat van hun magneet samen weergeeft.

Teken nu op het whiteboard de aarde met daarbij het magnetische veld. Beredeneer vervolgens samen met de leerlingen wat de richting van het aardmagnetisch veld moet zijn en laat ze als het even kan zelf ontdekken dat de magnetische zuidpool zich op de geografische noordpool bevindt (en omgekeerd).

Laat met de inclinatiennaald zien dat de magnetische veldlijnen op onze breedtegraad een flinke hoek (ca. 65 graden) met het aardoppervlak maken. Vind eerst het noorden met de inclinatiennaald in het horizontale vlak. Draai vervolgens de inclinatiennaald 90 graden om z'n as en houdt hem op het op het noorden gericht. Als het goed is, wijst de inclinatiennaald nu de echte richting van het aardmagnetische veld aan en is een hoek van ongeveer 65 graden waar te nemen. Benadruk dat een kompas alleen de horizontale component van het aardmagnetisch veld gebruikt (Millar, 2010).

#### 5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes

Demonstreer met een bordenwisser en twee paperclips dat het inderdaad mogelijk is om ijzer zelf ook magnetisch te maken. Laat ook zien dat ijzer weer demagnetiseert door de bordenwisser van de bovenste paperclip te halen. Met grote paperclips is dat veel eenvoudiger om duidelijk te demonstreren dan met nietjes (Berg & Bruning, 1994).

#### 6. Magneetveld rond draad demonstreren met video

Gebruik om tijd te winnen afbeeldingen 10.18 en 10.19 uit de methode (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014) en een video waarin het bestaan van een magneetveld rond een stroomvoerende draad te zien is (Magnetic Field of a Wire, 2018). Introduceer hierbij de rechterhandregel voor het verband tussen de richting van de stroomsterkte door de draad en het circulaire magneetveld dat daaromheen ontstaat (Kortland et al., 2017).

#### 7. Spoel als magneet gebruiken

Beredeneer middels een schets op het whiteboard samen met de leerlingen wat de richting van het B-veld bij een enkele winding zal zijn. Breidt vervolgens die redeneringen uit naar een spoel bestaande uit meerdere windingen. Docent legt uit hoe de rechterhandregel in deze context te gebruiken is voor het verband tussen richting B-veld en richting stroomsterkte door de windingen van de spoel. Docent legt uit dat bij aandachtspunten 6 en 7 de duim van de rechterhand de richting aangeeft van de vector die rechtuit gaat (stroomsterkte respectievelijk magnetische veldsterkte) en

de gekromde vingers van de rechterhand de circulaire vector (magnetische veldsterkte respectievelijk stroomsterkte) (Arons, 1997).

#### 8. Relais demonstreren met video

Om praktische redenen en met het oog op weinig beschikbare tijd, is het handig om volgende video te gebruiken (Chris Gozzard, 2005) om kort de werking van een relais te laten zien en te laten doorgronden.

#### 9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video

Om praktische redenen en met het oog op weinig beschikbare tijd, is het handig om volgende video te gebruiken om de lorentzkracht tussen stroomvoerende draden te laten zien (MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire, 2008) en te doorgronden middels uitleg op het whiteboard.

## 5.2 VERBETERINGEN BIJ ONTWERPEIS E (WISKUNDIGE VAARDIGHEDEN)

#### 10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)

Bij het doorgronden van driedimensionale tekeningen en schetsen, helpt het om expliciet te benoemen dat dat niet zo eenvoudig te doorzien en om voorbeelden te geven van methoden van 3D representatie. Wanneer leerlingen eenmaal de richtingen van twee van de drie vectoren helder hebben in het 3D perspectief, zou het toepassen van de linkerhandregel om de richting van de derde vector te vinden eenvoudiger moeten worden (Michellini et al., 2007).

#### 11. Verschillende driedimensionale representaties benoemen

Er zijn meerdere manieren voor representatie in 3D, zoals een schets met een verdwijnpunt zoals bij tekenen gebruikt wordt, een opengewerkte foto en de weergave waarbij de x- en y-as in het vlak van tekening liggen en met een symbool wordt aangegeven of de vector in de richting van de z-as loodrecht daarop het bord in (x) of uit (•) gaat (Kirschner et al., 2018).



Figuur 2 – Notatie van vectoren in of uit een vlak (Notation for vectors in or out of a plane, 2024)

#### 12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?

Bij een deel van de vragen over lorentzkracht is de lorentzkracht zelf niet gegeven, maar wel nodig om de richting van I of B te bepalen. Indien een massa versneld wordt met de lorentzkracht, dan is de richting van de versnelling dezelfde als die van de lorentzkracht. Indien een geladen deeltje een cirkelbeweging maakt, dan zorgt de lorentzkracht voor de middelpuntzoekende kracht en is daarmee naar het midden van de cirkel gericht.

#### 13. Cirkelbaan behandelen bij lorentzkracht op geladen deeltje

Leerlingen uit 5 VWO en voor wie natuurkunde een nieuw vak is (herprofileerders) hebben de cirkelbeweging nog niet gehad. Leerlingen die van HAVO komen of gezakt zijn op VWO kennen die als

het goed is al wel. Daarom is het wenselijk om bij de lorentzkracht op een geladen deeltje ook de cirkelbeweging aan bod te laten komen om het verband te leggen tussen een kracht loodrecht op de beweging (zoals de lorentzkracht) en de daaruit volgende cirkelbeweging. Datzelfde gebeurt ook bij gravitatiekracht of een cirkelbeweging door spankracht of normaalkracht (achtbaan) (Kortland et al., 2017).

#### 14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg

In woorden of met uitbeelding uitleg geven over de context van een opgave werkt alleen bij leerlingen die daar met hun volledige aandacht bij zijn én auditief zijn ingesteld. Door een schets te laten ontstaan op het whiteboard, of nog beter, een schets over een opgave uit het boek weergegeven op het touchscreen gaat de opgave veel meer 'leven' en is het toepassen van handregels niet meer zo moeilijk.

#### 15. Zelf vectoren ontbinden met de formule $\Phi = B_{\perp} \cdot A$ in plaats van met de formule in BINAS

In BINAS Tabel 35D3, Kolom Overige, staat de formule  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos\alpha$ .

Bij deze formule wordt impliciet uitgegaan van de hoek tussen de normaal van winding (met oppervlakte A) en de richting van het magnetisch veld B. Wanneer in een opgave de hoek tussen de winding zelf en de richting van het magnetisch veld gegeven is, dan moet van die hoek de sinus gebruikt worden en niet de cosinus (Etkina et al., 2006) en (Bransford et al., 2000).

#### 16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning

##### *Probleem*

De inductiespanning is evenredig met de verandering van de flux in de tijd en daarmee wiskundig gezien niets anders dan de afgeleide van de flux. Als analoge context kan het verband tussen plaats en snelheid gebruikt worden. De snelheid is tenslotte afgeleide van de plaats in de tijd. In een grafiek is de afgeleide de steilheid van de lijn van de grafiek en die kan op een tijdstip bepaald worden met de raaklijnmethode (Arons, 1997).

### 5.3 RESULTATEN TWEEDE ONTWERPCYCLUS

De 16 geselecteerde aandachtspunten die volgden uit de analyse van de eerste versie lessenserie zijn met behulp van literatuur nader onderzocht op mogelijke verbeteringen.

Aan de hand van bevindingen uit de literatuur is een tweede lessenserie te ontworpen. Vanwege de beperkte tijd in het versnelde examenjaar bij Luzac is de tweede lessenserie in 4 lessen ontworpen en gegeven. De klas waaraan de tweede lessenserie is gegeven bestond uit 9 leerlingen.

Deze tweede lessenserie is na afloop geëvalueerd en de resultaten daarvan zijn in onderstaand overzicht voor de 16 aandachtspunten weergegeven, gegroepeerd naar ontwerpisen D (conceptueel begrip) en E (wiskundige vaardigheden) waaraan ze gekoppeld zijn.

Een aantal experimenten was niet goed te realiseren binnen de randvoorwaarden van ontwerp is C (beperkte practicumfaciliteiten).

#### **Resultaten van verbeteringen bij conceptueel begrip (ontwerpeis D).**

##### 1. Permanente magneet laten ervaren

Leerlingen gaan enthousiast aan de slag met de magneten uit de koffer. Weliswaar volgen ze de opdrachten niet precies op, maar ze proberen wel van alles uit. Bijvoorbeeld door twee magneten met gelijke polen tegen elkaar aan te duwen op tafel en er eentje proberen 'weg te schieten' en de draaibare magneet met een staafmagneet zo snel mogelijk rondjes te laten draaien. Ook hebben leerlingen met ijzer uitgevonden dat ijzer door beide kanten van de magneet wordt aangetrokken. Praktische vaardigheden opdoen middels kwalitatief onderzoek leidt in dit geval inderdaad tot meer conceptueel begrip (Millar, 2010).

##### 2. Bordenwisser op whiteboard

Leerlingen denken hardop mee met dit een eenvoudig en snel uit te voeren experiment. De materialen zijn in vrijwel leslokaal beschikbaar: een bordenwisser, paperclip en whiteboard en het "broekzakexperiment" leidt inderdaad tot meer conceptueel begrip (Berg & Bruning, 1994).

##### 3. Voorkennis activeren andere krachten op afstand

Zwaartekracht wordt inderdaad direct herkend als een andere kracht die op afstand werkt. Magnetische kracht werkt merkbaar sterker bij kortere afstanden. Deze voorkennis kon in enkele woorden geactiveerd worden. Ook de elektrische aantrekking tussen een geweven (en dus geladen) ballon en lange haren werd vrijwel direct herkend (Kirschner et al., 2018).

#### 4. Inclinatiernaald gebruiken

Door de inclinatiernaald als kompas te gebruiken om het noorden te vinden en dit de koppelen aan de richting ten opzichte van het schoolgebouw met Google Maps ervaren leerlingen hoe een kompas gebruikt wordt. Leerlingen doorzien daarna ook beter het verband met de aarde als magneet en het concept van de magnetische zuidpool op de noordpool (en omgekeerd). Ze maken nu ook de koppeling met de veldlijnen die buiten een magneet van de noordpool naar de zuidpool wijzen en een kompasnaald die met z'n noordpool in de richting van de veldlijnen gaat staan.

Door de inclinatiernaald 90 graden te draaien en naar het gevonden noorden te wijzen is eenvoudig te demonstreren dat het aardmagnetisch veld een sterke inclinatie heeft. Die ervaring helpt leerlingen bij het maken van opgaven over deze specifieke context.

Praktische ervaringen door leerlingen blijken een effectieve bijdrage te leveren aan het leerproces van leerlingen (Millar, 2010).

#### 5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes

Leerlingen kunnen snel en eenvoudig met een magneet en enkele grote paperclips zelf experimenteren met magnetische influentie. Zo ervaren ze met dit "broekzakexperiment" zelf wat de docent bij de uitleg al demonstreerde (Berg & Bruning, 1994).

#### 6. Magneetveld rond draad demonstreren met video

Leerlingen zien in enkele minuten dat het ijzervijzel op de perspex plaat inderdaad cirkels rond de stroomvoerende draad vormen. Vervolgens stellen ze er vragen over en kunnen ze de uitleg volgen dat het ijzervijzel gemagnetiseerd wordt middels influentie en zien in dat deze zich als kompasnaaldjes richten naar de richting van magnetische veldlijnen. De video van het experiment is snel op te starten en helpt de leerlingen bij begripsvorming van de context van het magnetisch veld rondom een stroomvoerende draad met de daarbij horende rechterhandregel voor het vinden van de juiste richting. (Clark, 1983) zoals aangehaald in (Kirschner et al., 2018).

#### 7. Spoel als magneet gebruiken

Het blijkt dat leerlingen ten eerste moeite hebben om de 3D-weergaven te doorgronden. Door eerst specifiek aan die ontbrekende vaardigheid aandacht te besteden, wordt het toepassen van de rechterhandregel bij een elektromagneet (spoel) ineens veel eenvoudiger voor de leerlingen. Bij dit aandachtspunt blijkt er eerst een wiskundige oplossing (Michelini et al., 2007) nodig te zijn om de transfer ermee te maken naar de context van een elektromagneet.

#### 8. Relais demonstreren met video

De video van een experiment om de werking van een relais te laten zien (Chris Gozzard, 2005) is zonder voorbereiding in enkele minuten te laten zien en toe te lichten. De vraag die volgt van leerlingen is met name waar relais zoal voor gebruikt worden en niet meer zozeer over de conceptuele werking van een relais (Arons, 1997).



## 9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video

De combinatie van een video van een experiment dat de Lorentzkracht tussen stroomvoerende draden demonstreert (MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire, 2008) met een verklaring daarvan op het whiteboard doet de meeste leerlingen gelijk meedoen met de rechterhandregel (voor de richting B-veld om één van de stroomvoerende draden) én de linkerhandregel (voor het bepalen van de bijbehorende Lorentzkracht op de andere stroomvoerende draad) (Arons, 1997).

## 13. Cirkelbaan behandelen bij Lorentzkracht op geladen deeltje

Door leerlingen eerst met de formule voor baansnelheid te laten berekenen wat bijvoorbeeld de snelheid van de aarde om de zon is, wordt zowel voorkennis geactiveerd en tegelijk instructie gegeven aan leerlingen voor wie dit nog nieuw is. Dat vraagt wel meer tijd dan gepland, maar alle leerlingen komen er uiteindelijk wel uit. De uitleg van het concept van middelpuntzoekende kracht als nettokracht loodrecht op de bewegingsrichting die nodig is om te zorgen voor afbuiging zoals bijvoorbeeld bij kogelslingeren roept niet echt vragen op.

Wanneer vervolgens bij een proton dat loodrecht op de richting van een magnetisch veld beweegt naar de richting van de stroomsterkte gevraagd wordt, valt het even stil. Dan vraagt een leerling voorzichtig of dat inderdaad in dezelfde richting is als waarin het proton beweegt en zien anderen dit natuurkundig concept ook in (Arons, 1997). Daarna is het niet meer zo moeilijk voor de leerlingen om de linkerhandregel op de context van een geladen deeltje dat loodrecht op een permanent magnetisch veld beweegt, toe te passen. Ze herkennen dan zelf dat in dit geval de Lorentzkracht voor de middelpuntzoekende kracht van de cirkelbeweging zorgt.

## **Resultaten van verbeteringen bij wiskundige vaardigheden (ontwerpis E).**

### 10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)

Door aandacht en tijd besteden aan verschillende 3D representaties op een plat vlak (perspectief met en zonder verdwijnpunt of met de z-as loodrecht op het platte vlak) ontstaat steeds meer herkenning bij leerlingen. Het blijkt dat leerlingen ook moeite te hebben bij het natuurkunde aspect van opgaven, zoals het herleiden van de richting van de Lorentzkracht uit de beweging. Bij een cirkelbeweging is de Lorentzkracht de middelpuntzoekende kracht en dus naar het midden van de cirkel gericht. Bij het lanceren van het projectiel werkt de Lorentzkracht in de richting van de versnelling. Ook het herleiden van de richting van de stroomsterkte uit de aansluiting van de spanningsbron of van bewegende geladen deeltjes, is een separate denkstap die in de context van elektromagnetisme niet altijd gelijk herkend wordt (Arons, 1997). Wanneer leerlingen eenmaal de richtingen van twee van de drie vectoren in het 3D perspectief helder hebben, blijkt het toepassen van de linkerhandregel om de richting van de derde vector te vinden inderdaad eenvoudig voor de leerlingen (Michelini et al., 2007).

#### 11. Verschillende driedimensionale weergaves benoemen

Bij het bespreken van verwerkingsopgaven uit het gemaakte huiswerk blijkt dat de meeste leerlingen er de 3D contexten niet of niet goed in herkennen. Herhalen van de verschillende mogelijkheden van 3D weergave in een plat vlak en die samen met de leerlingen toepassen kost tijd. Daarna doorgronden al veel meer leerlingen wel de context van de opgaven en is het toepassen van handregels zelf niet meer zo moeilijk (Kirschner et al., 2018).

#### 12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?

Bij deze opgave herkenden de meeste leerlingen naast de 3D-weergave ook de natuurkundige context niet. Daarvoor bleek ten eerste het inzicht dat de lorentzkracht hier voor lineaire versnelling zorgt essentieel. Ten tweede was het inzicht dat de richting van de stroomsterkte door het projectiel volgt uit hoe de stroomkring op de spanningsbron is aangesloten (Arons, 1997). Met een goede schets van de vectoren voor  $F$  en  $I$  was het bepalen van de richting van  $B$  met de linkerhandregel in deze 3D-weergave ineens niet meer zo moeilijk (Kortland et al., 2017).

#### 14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg

De bevindingen bij aandachtspunten 11 en 12 ondersteunen dat zonder het maken van schetsen de combinatie van 3D-representaties én natuurkundige contexten enorm lastig te doorgronden zijn voor leerlingen. Met de schetsen op het whiteboard of nog beter, op het touchscreen over de opgave van de methode heen, kunnen veel meer leerlingen om die 3D contexten te doorzien. Wat nog wel lastig voor ze is, is om dat zelf uit te voeren en toe te passen op nieuwe opgaven.

#### 15. Zelf vectoren ontbinden met de formule $\Phi = B_{\perp} \cdot A$ in plaats van met de formule in BINAS

Het eerste probleem dat leerlingen hiermee hebben, is dat ze zich de context driedimensionaal niet goed voor kunnen stellen. Hiervoor zijn bij meerdere aandachtspunten al werkende oplossingen aangedragen en die blijken ook in deze context te werken. Wanneer het driedimensionale inzicht er eenmaal is, kan de stap gezet worden naar het construeren van  $B$ -vector en de ontbinding daarvan naar  $B_{\perp}$ . Wanneer dat eenmaal gelukt is, is het toepassen van goniometrie om de grootte van  $B_{\perp}$  te berekenen een kleine stap en kan de koppeling naar de formule in BINAS gemaakt worden (Etkina et al., 2006) en (Bransford et al., 2000).

#### 16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning

Wanneer leerlingen in een andere natuurkundige context het wiskundig verband tussen een grootte en de afgeleide daarvan herkennen, zoals tussen plaats en snelheid bij trillingen, dan kunnen ze zien in dat het verband tussen flux en inductiespanning wiskundig gezien hetzelfde is. Met dat inzicht zijn de opgaven om bijvoorbeeld het verloop inductiespanning tegen de tijd uit een (flux, tijd)-diagram te schetsen ineens niet meer zo moeilijk (Arons, 1997).

## 6. CONCLUSIE EN DISCUSSIE

### 6.1 SAMENVATTING EN RESULTATEN

Van de formele ontwerpeisen A t/m C die volgen uit de context van een versneld examenjaar bij vavo spelen met name ontwerpeisen A (beperkte contacttijd) en C (beperkte practicumfaciliteiten) regelmatig op als beperkende randvoorwaarden voor een lessenserie over elektromagnetisme.

- A. Voor het onderwerp elektromagnetisme zijn slechts vier vaklessen van een uur beschikbaar en de leerlingen moeten zich in elke les derhalve meerdere leerdoelen eigen maken.
- B. De lessenserie moet geschikt zijn voor qua niveau sterk gedifferentieerde lesgroepen.
- C. Bij het inzetten van practicum voor conceptueel begrip moet rekening gehouden worden met de beperkte practicumfaciliteiten bij Luzac, zowel qua middelen, ondersteuning als voorbereidingstijd.

De eerste lessenserie van vijf vaklessen zoals gegeven in klas 5 vwo werd in het versnelde examenjaar (ontwerpeis A) nog verder ingekort naar een tweede lessenserie van slechts vier klokuren vakles. Door beperkte practicumhulpmiddelen (ontwerpeis C) lukt het niet om alle gewenste demonstratieën proeven ter plekke uit te voeren. Wel blijkt dat video's en applets van deze experimenten kunnen bijdragen aan meer conceptueel begrip (ontwerpeis D).

Ten aanzien van ontwerpeis D zijn in de tweede lessenserie op tien aandachtspunten verbeteringen aangebracht ten opzichte van de eerste lessenserie.

- D. De lessenserie moet adresseren dat het zelf ervaren door leerlingen van natuurkundige concepten een belangrijk aspect is bij het verkrijgen van conceptueel begrip over elektromagnetisme.

Bij de aandachtspunten over conceptueel natuurkundig begrip (ontwerpeis D) valt als gemene deler op dat het in enigerlei vorm ervaren van natuurkundige verschijnselen leidt tot een sneller en beter begrip bij leerlingen in een versneld examenjaar. Daarbij werkt het zelf uitvoeren en ervaren van experimenten beter dan demonstraties door de docent. Leerlingen stellen veel meer vragen en proberen dingen uit die de docent niet zou demonstreren. Het gebruik van korte video's van experimenten en natuurkundige applets draagt ook bij aan het leren doorgronden van natuurkundige contexten. Leerlingen zien in ieder geval het natuurkundig concept gebeuren en de docent kan het verband met de geleerde theorie leggen. Binnen de context van een versneld examenjaar, met weinig lestijd in het versnelde examenjaar (ontwerpeis A) met beperkte practicum mogelijkheden en zonder technisch onderwijs assistent (ontwerpeis C), zijn de onderzochte hulpmiddelen als broekzakexperimenten, het gebruik van video's en applets een effectieve ondersteuning in het leerproces gebleken.

Niet alle experimenten zijn geslaagd, vooral omdat de benodigde materialen er niet zijn of de voorbereidingstijd voor de docent te lang is. Persoonlijk heb ik meestal ruim 30 klokuren per week in m'n rooster staan en heb de pauzes zelf echt wel nodig als rustmoment op die volle lesdagen.

Een voorbeeld van een experiment dat niet lukte is de lorentzkracht tussen twee stroomvoerende draden met als hoofdreden dat de benodigde stroomsterkte met de beschikbare voeding niet gehaald werd. Andere experimenten zoals het magneetveld rond een stroomvoerende draad demonstreren en de werking van een relais en kosten teveel voorbereidingstijd om op te bouwen of de materialen ervoor zijn niet voor beschikbaar.

Ten aanzien van ontwerp E zijn in de tweede lessenserie op zes aandachtspunten verbeteringen aangebracht ten opzichte van de eerste lessenserie.

- A. Voor het leren begrijpen van de concepten bij elektromagnetisme moet de lessenserie de wiskundige vaardigheden en het ruimtelijk inzicht die daarvoor nodig zijn, overbrengen.

Bij de aandachtspunten over wiskundige vaardigheden (ontwerp E) valt op dat bij veel leerlingen bij Luzac de benodigde wiskundige vaardigheden ontbreken of niet herkend worden in een natuurkundige context. Dat geldt zowel voor het ontbinden van vectoren als het doorgronden van driedimensionale weergaven en contexten en voor het verband tussen een variabele of grootte en z'n afgeleide in de tijd. Het is gebleken dat eerst aandacht besteden aan de wiskundige vaardigheden zelf en daarna pas de transfer te maken naar de natuurkundige context bij leerlingen tot een sneller en beter begrip leidt. Dan doorgronden leerlingen de natuurkundige context eerder en kunnen ze beter het wiskundige probleem dat er uit volgt oplossen. Deze aanpak werkt ook goed bij ontwerp B (sterk gedifferentieerd niveau van leerlingen) voor leerlingen die nog geen natuurkunde in bovenbouw hadden voordat ze aan het versnelde examenjaar startten.

## 6.2 PERSOONLIJKE RESULTATEN NA DEZE ONTWERPSTUDIE

De leerling die zowel de eerste lessenserie in 5 vwo volgde als de tweede lessenserie in het versneld examenjaar was vooraf enorm onzeker over haar eigen vaardigheden bij het vak natuurkunde. Ze sloot het volgende schooljaar haar examenjaar wel af met als eindcijfer een 9 voor natuurkunde.

Persoonlijk merk ik dat door het gebruiken van resultaten uit deze ontwerpstudie in mijn lessen de leerlingen over het algemeen elektromagnetisme minder vaak als een moeilijk onderwerp ervaren.

Naar aanleiding van het belang van de benodigde wiskundige vaardigheden dat uit deze ontwerpstudie bleek, besteed ik juist bij elektromagnetisme tekens heel bewust eerst aandacht aan de benodigde wiskundige vaardigheden en het driedimensionale inzicht.

De aanpak die ik voor deze ontwerpstudie al had ontwikkeld om selectief video's en/of applets te kunnen gebruiken heb ik verder verfijnd en uitgebreid. Het geeft me vertrouwen dat deze ontwerpstudie onderbouwt video's en applets prima werken als aanvulling op de eenvoudige "broekzakexperimenten" (Berg et al., 2015) binnen de context van een versneld examenjaar zoals bij Luzac.

## 6.3 DISCUSSIE

(Arons, 1997) en (Millar, 2010) geven aan dat practica bij kunnen dragen aan conceptueel begrip bij natuurkunde. Niet alleen bleek dat binnen de context van Luzac met de beperkte contacturen en practicum faciliteiten goed toe te passen, het leidde inderdaad tot verbetering van het conceptueel begrip bij elektromagnetisme.

Mede dankzij de suggesties in (Berg & Bruning, 1994) heb ik eenvoudige practica kunnen ontwerpen en onderzoeken zodat die als "broekzakexperimenten" van uit m'n schooltas te geven zijn. Die blijken heel krachtig te werken met eenvoudige practicummiddelen. Voorbeelden daarvan zijn het gebruik van een kleine, permanente magneet met grote paperclips om het concept van magnetische influentie te demonstreren en de aanvulling daarop met een bordenwisser die aan het ijzer van het whiteboard blijft hangen. Leerlingen doen hierdoor actiever mee in de les, stellen meer vragen en komen daarna ook beter uit de opgaven.

Complexere practica zijn binnen de context van Luzac niet altijd te realiseren vanwege ontbrekende practicum materialen en de beperkte tijd voor het voorbereiden en opruimen van experimenten

door tijdsdruk op de docent wegens andere lesverplichtingen (ontwerpis C). Voorbeeld van experimenten die niet lukten, zijn het demonstreren van het magneetveld rond een draad wegens te lage stroomsterkte uit de aanwezige voeding en de lorentzkracht tussen parallelle stroomvoerende draden.

(Bransford, Brown, & Cocking, 2000) geven aan dat het ontbreken van de benodigde wiskundige vaardigheden het natuurkundig begrip tegenwerkt. Uit deze ontwerpstudie blijkt inderdaad dat dit voorkomen kan worden door eerst aandacht besteden aan die wiskundige vaardigheden. Dat leidt vervolgens tot meer zelfvertrouwen én beter begrip van de natuurkundige concepten bij leerlingen van Luzac.

In (Hestenes, 1987) staat dat vaardigheden van modelleren helpen bij begrip van natuurkunde. (Etkina, Warren, & Gentile, 2006) voegen daaraan toe dat het toepassen van modelmatige aspecten in de natuurkundige context nodig is. Uit dit onderzoek bij Luzac blijkt dat koppeling van reeds aanwezige wiskundige kennis aan natuurkundige contexten middels transfer leidt tot beter conceptueel begrip van het onderwerp elektromagnetisme.

(Michellini, et al., 2007) beschrijft dat ruimtelijk inzicht bijdraagt aan beter conceptueel begrip van natuurkundige contexten. Het is uit dit onderzoek gebleken dat gericht tijd besteden aan vaardigheden met betrekking tot ruimtelijk inzicht een positieve uitwerking heeft op het conceptueel begrip van elektromagnetisme binnen de context van deze ontwerpstudie.

## 6.4 BEPERKINGEN ONTWERP EN ONDERZOEK

Deze ontwerpstudie was een kwalitatieve studie naar het ontwerpen en verbeteren van een lessenserie over elektromagnetisme die bruikbaar zijn binnen de context van een versneld examenjaar zoals bij vavo. De hier ontworpen tweede lessenserie is uitgetoetst op een relatief kleine lesgroep van negen leerlingen. Hoewel dit voor een 6 VWO klas in het reguliere voortgezet onderwijs een klein aantal is, is de lesgroep in de context van Luzac wel degelijk van representatieve grootte.

In het regulier voortgezet onderwijs zijn de resultaten uit deze ontwerpstudie slechts beperkt bruikbaar. De lesgroepen zijn er homogener, er is veel meer contacttijd beschikbaar dan in een versneld examenjaar en er zijn uitgebreide practicumfaciliteiten beschikbaar inclusief ondersteuning door technisch onderwijsassistenten.

Wel kunnen docenten in het reguliere voortgezet onderwijs soms vergelijkbare omstandigheden tegenkomen. Bijvoorbeeld een afwezige technisch onderwijsassistent of tijdelijk niet-beschikbare practicumruimte. Dan kunnen de resultaten van deze ontwerpstudie ook voor hen waardevol kunnen zijn. De wiskundige suggesties voor verbetering zijn voor alle natuurkunde docenten bruikbaar bij het onderwerp elektromagnetisme.

Voor lerarenopleiders bij eerstegraads natuurkunde opleidingen kan het interessant zijn om te ervaren hoe binnen de beperkende randvoorwaarden van het lesgeven in een versneld examenjaar zoals bij vavo toch een goed resultaat bereikt kan worden bij conceptuele onderwerpen als elektromagnetisme.

Met dit kleinschalig kwalitatief onderzoek heb ik voor mezelf eenvoudige verbeteringen in m'n lessen en didactiek verankerd. Ik ben me veel bewuster van wat precies werkt en nodig is, zowel qua wiskunde als het eenvoudig kunnen toevoegen van praktische ervaringen middels schooltasexperimenten, video's en applets.

Zo heb ik een verzameling goed werkende video's van experimenten opgedeeld in afspeellijsten en aangelegd op m'n YouTube kanaal (Natuurkunde Coaching, 2023) en goed werkende applets verzameld die op elke school-pc direct beschikbaar zijn middels het synchroniseren van bookmarks in Google Chrome.

In de schooljaren waarin ik vóór dit onderzoek les gaf, zette ik al enkele van de onderzochte oplossingen in. In het lopende schooljaar van het onderzoek heb ik meer van die oplossingen toegevoegd aan m'n lessen. Het onderwerp gravitatie met daarin de cirkelbaan en middelpuntzoekende kracht is inmiddels bij Luzac in het programma van toetsing en afsluiting naar de eerste periode verplaatst. In de tweede periode bij het onderwerp lorentzkracht op een geladen deeltje dat loodrecht op een homogeen magnetisch veld beweegt, doorzagen leerlingen direct dat bij deze cirkelbeweging de lorentzkracht voor de middelpuntzoekende kracht zorgt.

Ook voor de wiskundige vaardigheden geldt dat ik dit onbewust al ten dele toepaste in de schooljaren voor dit onderzoek. In het schooljaar van dit onderzoek activeer ik veel vaker en bewuster eerst de wiskundige vaardigheid en leg die waar nodig ook eerst verder uit. Pas daarna maak ik de transfer naar de natuurkundige context waarvoor die wiskundige vaardigheid bij is.

In de schooljaren na het onderzoek durf ik wel te stellen dat ik van grotendeels onbewust bekwaam naar veel bewuster bekwaam ben gegroeid.

## 6.5 AANBEVELINGEN

Docenten die te maken hebben met tijdsdruk bij het versnelde examenjaar, zoals bijvoorbeeld bij het vavo, kunnen de ontworpen lessenserie inzetten bij elektromagnetisme en op een vergelijkbare manier ook bij andere onderwerpen verbeteringen doorvoeren met eenvoudige proefjes, demo-video's en applets.

## 7. BIBLIOGRAFIE

- Arons, A. B. (1997). *Teaching Introductory Physics*. Michigan: Wiley.
- Berg, E. v., & Bruning, J. (1994, juli). Practicum: leren ze er wat? *NVOX*, pp. 245-249.
- Berg, E. v., Brinke, L., Dekkers, P., Sonneveld, W., Spaan, W., & Woerkom, M. v. (2015). *ShowdeFysica*. Utrecht: NVON.
- Blok, H. (2004). Adaptief onderwijs: Betekenis en effectiviteit. *Pedagogische studiën*, 81/1, 5-27.
- Bransford, J., Brown, A., & Cocking, R. (2000). *How People Learn Brain, Mind, Experience, and School*. Washington: NATIONAL ACADEMY PRESS.
- Chris Gozzard. (2005). Relay demonstration - IGCSE Physics.  
<https://youtu.be/McxFQw66BQE>
- Clark, R. (1983). Reconsidering research on learning from media. *Review of Educational Research*, 445-459.
- College voor Toetsen en Examens. (2016, april). *natuurkunde vwo | syllabus centraal examen 2018*. examenblad.nl. [https://www.examenblad.nl/examenstof/syllabus-2018-natuurkunde-vwo/2018/vwo/f=/natuurkunde\\_2\\_versie\\_vwo\\_2018.pdf](https://www.examenblad.nl/examenstof/syllabus-2018-natuurkunde-vwo/2018/vwo/f=/natuurkunde_2_versie_vwo_2018.pdf)
- Deflecting a Beam of Electrons with Helmholtz Coils*. (2011, 01 26). YouTube.  
<https://youtu.be/bEvLK11jdJ8>
- Deunk, M., Doolaard, S., Smale-Jacobsen, A., & Bosker, R. (2015). *Differentiation within and across: A systematic review of studies into the cognitive effects of differentiation practices*. Groningen: RUG/GION.
- Etkina, E., Warren, A., & Gentile, M. (2006). The Role of Models in Physics Instruction. *The Physics Teacher*, 34.
- Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen. (2022, 05 26). *SAmenhangend Leren Voortgezet Onderwijs (SaLVO)*. Collectie Salvo.  
[www.fi.uu.nl/publicaties/subsets/salvo/about.php](http://www.fi.uu.nl/publicaties/subsets/salvo/about.php)
- Hestenes, D. (1987). Towards a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*.
- Inspectie van het Onderwijs. (2012). *KWALITEITSONDERZOEK EDUCATIE - Luzac College Zwolle*. Zwolle: Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap.  
<https://www.onderwijsinspectie.nl/binaries/onderwijsinspectie/documenten/publicaties/2013/05/13/kwaliteitsonderzoek-particuliere-vavo-instelling-luzac-college-zwolle/30df-kwaliteitsonderzoek-luzac-college-vavo-zwolle-13-mei-2013.pdf>
- Kirschner, P. A., Claessens, L., & Raaijmakers, S. (2018). *Op schouders van reuzen*. Meppel: Ten Brink Uitgevers.
- Kortland, K., Mooldijk, A., & Poorthuis, H. (2017). *Handboek natuurkundendidactiek*. Amsterdam: Epsilon Uitgaven.
- Magnetic Field of a Wire*. (2018, 05 29). YouTube. <https://youtu.be/caHXwJbkbQU>
- McKenney, S., & Reeves, T. (2019). *Conducting Educational Design Research, 2nd Edition*. Abingdon, United Kingdom: Routledge.
- Michelini, M., Guisasola, J., Mossenta, A., Testa, I., Viola, R., & Testa, A. (2007). TEACHING ELECTROMAGNETISM: ISSUES AND CHANGES. *GIREP EPEC Conference Frontiers of Physics Education*. Opatija.
- Millar, R. (2010). Analysing Practical Science Activities to assess and improve their effectiveness. *The Association for Science Education*.
- MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire*. (2008, 08 08). YouTube.  
<https://youtu.be/43AeuDvWc0k>
- Natuurkunde Coaching*. (2023). Retrieved 1 8, 2023, from YouTube.  
<https://www.youtube.com/natuurkundecoachingnl>
- Notation for vectors in or out of a plane*. (2024, 06 25). Wikipedia.  
[https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Notation\\_for\\_vectors\\_in\\_or\\_out\\_of\\_a\\_plane.svg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Notation_for_vectors_in_or_out_of_a_plane.svg)
- NVON-commissie. (2013). *BINAS zesde editie*. Groningen: Noordhoff.
- Plomp, T., & Nieveen, N. (2013). *Educational Design Research*. Enschede: SLO.
- Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5*. (2014). Groningen: Noordhoff.

- SLO. (2019, december 18). *Studielasttabellen*. SLO. <https://www.slo.nl/handreikingen/havo-vwo/handreiking-se-natkunde-hv/algemene-informatie/studielasttabellen/#:~:text=De%20totale%20studielast%20van%20het,gedeelte%20bedraagt%20circa%2040%20procent>.
- University of Colorado, Boulder. (2022, 07 13). *Faraday's Law*. PhET Interactive Simulations. [https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_en.html)
- Ustun, A., & Tracey, M. (2020, May). An effective way of designing blended learning: A three phase design-based research approach. *Education and Information Technologies*.



## 8. BIJLAGEN

### 8.1 LESPLANNEN EN ANALYSE VAN EERSTE LESSENSERIE

Deze lessenserie is gegeven aan één leerling van 5 VWO aan het einde van het schooljaar. De leerling deed dat schooljaar eindexamen in een aantal vakken en vanwege te hoge studiebelasting vervielen de natuurkundelessen al vrij vroeg in het schooljaar. Na de centrale examens zijn nog wel een aantal natuurkunde lessen gegeven en dan met name over elektromagnetisme.

Aandachtspunten uit de videoanalyse van de eerste lessenserie zijn opgenomen in Bijlage 8.2.

#### Lesplan lessenserie 1 - les 1

Docent: Mike Wassenaar vrijdag 7 juni 2019 10:00 – 11:00 Luzac Zwolle

Methode: Pulsar natuurkunde 5 VWO, Hoofdstuk 10 Elektromagnetisme

Beginsituatie: Leerling heeft geen natuurkunde gehad dit schooljaar i.v.m. eindexamens in andere vakken

Onderwerp: 10.1 Magneetvelden

Doelstelling: Leerlingen hebben inzicht in de werking van permanente magneten, influentie en magnetische veldlijnen, inclusief het aardmagnetisch veld

Hulpmiddelen: Magneetkoffer

Onderwijsfuncties	Docent	Leerlingen	Tijd
<b>Leerdoelen en motivatie</b>	Voorkennis activeren en leerlingen vertrouwd maken met magneten en magnetische velden Planning en doel hele hoofdstuk	Zie Doelstelling.	5
<b>Peilen beginsituatie/ activeren voorkennis</b>	Beginnen met vragen stellen over wat leerlingen al weten van magneten en magnetisme.	Vragen beantwoorden en hopelijk ook nieuwe vragen stellen	5
<b>Presenteren kennis</b>	Gelijk beginnen met magneetkoffer, leerlingen laten ervaren hoe magneten werken, inclusief draaien van een kompasnaald, influentie en een 'gebroken magneet'. Aardmagnetisch veld onderzoeken en verklaren.	Leerlingen onderzoeken de werking van magneten, proberen uit en stellen veel vragen Aardmagnetisch veld onderzoeken met kompasnaald en mobiel	15
<b>Presenteren werkwijzen</b>	Met ondersteuning van het digitale boek de kennis presenteren en daarbij telkens koppelen naar hetgeen eerder ervaren is. Vragen stellen over kompas op mobiel (gps of magnetisch) en dat onderzoeken.	Actief luisteren, aantekeningen maken en kompas mobiel onderzoeken	15
<b>Oefenen en feedback krijgen</b>	Aanbieden van verwerkingsopgaven, rondlopen en persoonlijke aandacht geven.	Maken verwerkingsopgaven, eventueel beginnen met huiswerkopgaven	15
<b>Nabespreken/ samenvatten</b>	Samenvatten stof.	Actief luisteren	5
<b>Evalueren of beoordelen</b>	Middels videoanalyse	N.v.t.	

## Videoanalyse les 1

Voordat de video gestart wordt, maakt de docent even hernieuwd kennis met de leerling. Leerling ziet nogal op tegen natuurkunde en helemaal tegen natuurkunde in het examenjaar. Het belangrijkste is dat ze vertrouwen opdoet uit deze lessenserie en alvast begrip opdoet van elektromagnetisme voor het versnelde examenjaar. Docent vraagt schriftelijk toestemming voor het maken van lesopnames waarbij zij buiten beeld blijft en alleen haar stem opgenomen wordt. Wel opgenomen worden de docent, het whiteboard en de smart-tv. Docent gebruikt voor de opnames alleen lokalen waarin whiteboard en smart-tv naast elkaar hangen en doet dat indien mogelijk altijd bij z'n lessen. De smart-tv maakt het mogelijk om alles wat online beschikbaar is het lokaal binnen te kunnen halen, zoals de lesmethode (digitaal) en video's van demoproeven, video's van uitleg met een animatie en het gebruik van natuurkunde applets). De docent doet z'n uitleg vrijwel altijd met behulp van het whiteboard omdat wat op het bord komt te staan dan ontstaat tijdens de les en de leerlingen de opbouw daarvan meekrijgen. De docent gebruikt vrijwel nooit kant-en-klare presentatie omdat dan in 1x de hele inhoud er komt te staan. Met heel veel werk is het mogelijk animaties in te bouwen voor volgorde van verschijnen met als grote nadeel dat daar geen enkele flexibiliteit meer zit of ruimte voor aansluiten op vragen van leerlingen. De docent heeft een sterke voorkeur voor veel interactie met leerlingen en met dat gegeven te kunnen improviseren in de exacte volgorde van uitleg en op het bord laten ontstaan van de natuurkundige concepten. Uiteindelijk laat de docent alle informatie toch wel in de instructie terugkomen. Deze voorbereidingsfase duurde ongeveer 15 minuten. Daarna is een opname gestart van 30 minuten, de maximum opnametijd van de gebruikte camera (Panasonic Lumix DMC-FZ200).

Voorkennis activeren middels open vragen:

Docent vraag wat leerling al weet je van magnetisme? **Leerling zegt dat tegenpolen elkaar aantrekken.**

Docent vraagt door naar toepassingen van magnetisme? **Leerling kent er verder geen, maar herkent wel gelijk dat dit een rol speelt bij de bordenwisser op het whiteboard (aandachtspunt 2).**

Docent geeft leerling een aantal magneten uit de magneetkoffer. **Leerling begint gelijk uit te proberen wanneer magneten elkaar aantrekken en wanneer ze elkaar afstoten (aandachtspunt 1.).**

Docent noemt dat magnetisme een kracht is die op afstand werkt en vraagt of leerling nog een andere kracht kent die op afstand die op afstand werkt. **Leerling noemt gelijk met zwaartekracht (aandachtspunt 3).**

Docent benoemt het concept van velden om de werking van krachten op afstand weer te geven. **Leerling blijft stil.**

Docent probeert een draaibare magneet te gebruiken als kompasnaald. Deze draait vrij stroef op de tafel, maar met tikken op de tafel richt de magneet zich wel telkens in ongeveer dezelfde richting. Die richting blijkt vrij goed met het noorden overeen te komen.

Docent laat de werking van magnetische kracht op afstand zien door een andere magneet in de buurt te houden en de draaibare magneet daarmee te draaien. Docent haalt de andere magneet weer weg en door tikken draait de draaibare magneet weer ongeveer terug naar het noorden. **Leerling kijkt toe en luistert.**

Docent legt uit dat in de kompasnaald in een kompas een magneetje is. Deze kompasnaald richt zich naar het magneetveld van de aarde.

Docent en leerling proberen samen het noorden te bepalen op basis van de stand van de zon. Tijdens zomertijd staat rond half twee staat de zon pal in het zuiden. Precies daar tegenover ligt het noorden. De draaibare magneet richt zich op een graad of 30 inderdaad in de verwachte richting. Een kompasje zou veel gevoeliger reageren en preciezer de richting van het noorden aangeven, iets voor een volgende lessenserie. (aandachtspunt 4)

Docent legt uit dat de richting waarin de kompasnaald wijst ook de richting van het magnetisch veld is en de afspraak dat de kant van de kompasnaald die naar het noorden wijst de magnetische noordpool is. Houd je er een andere magneet bij, dan wijst de noordpool van de draaibare magneet altijd naar de zuidpool van de andere magneet. Magnetische veldlijnen lopen buiten de magneet van de noordpool naar de zuidpool. Wanneer je dat concept vertaalt naar de aarde als magneet, dan wijst een kompas weliswaar met z'n magnetische noordpool naar de geografische noordpool. Magnetisch gezien moet daar dan de magnetische zuidpool zijn. **Leerling luistert aandacht en lijkt wat in verwarring te zijn.**

Docent benoemt de verwarring over de magnetische zuidpool die zich bij de geografische noordpool bevindt en geeft de tip dat te aanvaarden en te onthouden als afspraak en er niet telkens opnieuw over na te denken. **Leerling zucht en knikt**

Docent laat een vergelijkbare situatie zien van verwarrende afspraken namelijk de tegengestelde richting van beweging van elektronen en de richting van de stroomsterkte. Er is afgesproken dat de lading van elektronen negatief is en dat stroomsterkte van plus naar min gaat. Omdat (een deel van de) elektronen vrij kunnen bewegen in geleiders moet die wel van min naar plus bewegen en daarmee tegen de richting van de stroomsterkte. Ook dat is een kwestie van aanvaarden. **Leerling herkent deze situatie en lijkt het voor magnetische polen ook te aanvaarden.**

Docent demonstreert vervolgens het verschijnsel magnetische influentie zien aan de hand van ijzeren nietjes en een magneet. Dat werkte op zich redelijk, maar met grotere objecten als paperclips zouden duidelijker overkomen (aandachtspunt 5). Docent laat daarmee zien dat je sommigen stoffen (ijzer, nikkel) met een permanente magneet zelf ook magnetisch kunt maken en dat dat magnetisme weer verdwijnt als de magneet weggehaald wordt. **Leerling kijkt toe en vraagt of dit met alle metalen werkt.** Docent geeft aan dat dit alleen voor bepaalde metalen geldt en dan met name ijzer en nikkel.

Docent legt uit dat magneten hebben altijd een noord- en een zuidpool hebben en laat zien met behulp van een gebroken dunne staafmagneet dat de magnetische richting hetzelfde blijft binnen beide magneten. In de oude richting trekken ze elkaar dan ook aan, wanneer je er 1 draait, dan stoten ze elkaar altijd af (noord-noord of zuid-zuid) en wanneer je beiden draait trekken ze elkaar aan. Docent geeft de beide stukken van de gebroken magneet aan leerling. **Leerling experimenteert met aantrekken en afstoten en richting en benoemt dat inderdaad beiden brokstukken dezelfde richting hebben.**

Docent benoemt nog dat magnetische influentie ook speelt bij het magneetje van de bordenwisser en het ijzer aan de achterkant van het whiteboard. **Leerling knikt en lijkt dit te begrijpen.**

Deze fase van demonstratie en zelf experimenteren duurt 15 minuten.

Docent start de digitale methode op de smart-tv om de koppeling van praktijk naar theorie te maken. **Tijdens het opzoeken vraagt leerling van welk materiaal een magneet eigenlijk gemaakt is.**

Docent realiseert zich dat niet vertelt te hebben. In de methode staat wel uitleg over elementaire magneetjes en dat die bij sommige stoffen allemaal het zelfde gericht blijken, maar niet de namen van die stoffen. Docent zoekt namen van magnetische materialen op Wikipedia op en daarin komen

met name ijzer en nikkel in voor. **Leerling geeft aan wat in verwarring te raken omdat juist die stoffen eerder genoemd werden als magnetiseerbaar.** Docent zoekt verder en vindt dat zuiver ijzer (weekijzer) prima magnetiseerbaar is, maar ook demagnetiseert. Bepaalde Fe-Ni legeringen blijven wel magnetisch.

Docent benoemt aan de hand paragraaf 10.1 van het boek wat we in deze les al met de magneten ervaren hebben. Docent tekent op het whiteboard een permanente magneet met daarbij de magnetische veldlijnen. Reden om dat zo te doen is dat het plaatje dan ontstaat in plaats van in 1x het hele plaatje te laten zien zoals in een boek of bijvoorbeeld met een presentatie. Docent legt uit dat veldlijnen elkaar niet kunnen snijden omdat anders de magnetische kracht in twee richting tegelijk zou werken en dat kan niet omdat veldlijnen de resultante magnetische kracht aangeven. Docent legt ook uit dat hoe dichter de veldlijnen bij elkaar liggen hoe groter de veldsterkte is. Beide aspecten van veldlijnen worden helaas niet genoemd in Pulsar. **Leerling luistert aandachtig.**

Docent laat bij de getekende magneet ook laten zien dat de veldlijnen binnen de magneet van zuid naar noord lopen, vooruitlopend op wat bij elektromagneten relevant wordt.

Docent tekent tot slot van de uitlegfase de aarde als magneet. Te beginnen met een bol en vervolgens een kompasnaald die naar het (geografische noorden) wijst. Daarna veldlijnen in de richting van de kompasnaald, dus van zuid naar noord. Ter referentie geeft de docent onze locatie (Zwolle) met een Z aan op de aardbol. **Leerling geeft op in verwarring te raken door die Z omdat die ook gebruikt wordt voor de zuidpool van magneten.**

Docent verandert de Z in Zwolle en laat zien dat de getekende veldlijnen buiten de magneet (aarde) lopen en dus van de magnetische noordpool naar de magnetische zuidpool lopen. **Leerling benoemt dat de veldlijnen naar de noordpool wijzen en dat naar de zuidpool zou moeten zijn.**

Docent geeft aan dat de leerling dat goed gezien heeft en dat de veldlijnen inderdaad naar de geografische noordpool wijzen en dat magnetisch gezien zich daar dus een zuidpool moet bevinden. Docent benoemt dat dit aansluit bij de eerdere uitleg tijdens de praktijkfase. **Leerling knikt en gaat akkoord.**

Deze uitlegfase duurde 11 minuten.

Docent geef leerling opdracht te beginnen met opgaven volgens studiewijzer om het geleerde te verwerken. De video bereikt de maximale duur en de docent start geen nieuwe video-opname.

Leerling stelt tot verbazing van de docenten enkele interessante vragen die helaas niet op video opgenomen zijn (aandachtspunt N1):

- Hoe kun je, wanneer je een magneet en een even groot stuk weekijzer hebt, weten welke is?
- Waarom verliest een magneet z'n kracht bij verhitten?
- En waarom kunnen magnetische veldlijnen elkaar niet snijden?

Docent en leerlingen kijken samen naar de eerste vraag. Docent legt uit dat een magneet een andere magneet nooit in het midden kan aantrekken omdat daar nog een zuidpool noch een noordpool is. Het weekijzer daarentegen kun je in alle richtingen en op alle plekken magnetiseren en daardoor ook overal aantrekken. Dus het weekijzer is het stuk waar het andere object in het midden aan gekoppeld kan worden. **Leerling geeft aan dit nooit zelf bedacht te hebben, maar het nu wel te snappen.**

Docent legt bij vraag twee uit dan bij het verhitten van een magneet de elementaire magneetjes steeds minder vast aan elkaar komen te zitten en zich dan willekeurig gaan richten. Dat komt ook

omdat atomen en moleculen bij steeds meer gaan bewegen bij toename van de temperatuur. **Leerling geeft aan zich dit wel voor te kunnen stellen, maar ook dit nooit zelf zou kunnen bedenken.**

Docent herhaalt bij vraag drie de eerdere uitleg en realiseert zich maar weer eens dat niet alle gepresenteerde kennis ook in één keer overkomt. **Leerling geeft aan zich de uitleg te herinneren en nu te snappen.**

## Lesplan lessenserie 1 - les 2

Docent: Mike Wassenaar vrijdag 7 juni 2019 12:15 – 13:15 Luzac Zwolle

Methode: Pulsar natuurkunde 5 VWO, Hoofdstuk 10 Elektromagnetisme

Beginsituatie: Leerlingen hebben zojuist de eerste les over 10.1 Magneetvelden gehad

Onderwerp: 10.2 Elektromagnetisme

Doelstelling: Leerlingen hebben inzicht in de oorzaak-gevolg relatie van stroom voerende draden en spoelen met magnetische velden

Hulpmiddelen: Magneetkoffer, voeding, draad, weerstand, weekijzer

Onderwijsfuncties	Docent	Leerlingen	Tijd
<b>Leerdoelen en motivatie</b>	Verder bouwen op begrip van magneten en magneetveld in de context van elektromagnetisme	Zie Doelstelling.	0
<b>Peilen beginsituatie/ activeren voorkennis</b>	Terugkoppelen naar eerste les op deze dag, over magneetvelden.	Vragen beantwoorden en hopelijk ook nieuwe vragen stellen	5
<b>Presenteren kennis</b>	Laten zien dat rond een stroom voerende draad een magneet veld ontstaat. Stroom ook omkeren.	Magnetisch veld onderzoeken met kompasnaald	10
<b>Presenteren werkwijzen</b>	Met ondersteuning van digitale boek de rechterhand regel voor draad introduceren en nogmaals onderzoeken. Vervolgens van de draad een spoel maken en daarvan het magneetveld onderzoeken. Koppeling met rechterhandregel spoel maken.	Onderzoeken of de rechterhand regel voor een stroom voerende draad klopt. Stroomrichting ook omdraaien.  Onderzoeken of de rechterhand regel voor een spoel klopt. Stroomrichting ook omdraaien en stroomsterkte variëren en sterkte magneet onderzoeken.	20
<b>Oefenen en feedback krijgen</b>	Aanbieden van verwerkingsopgaven, rondlopen en persoonlijke aandacht geven.	Maken verwerkingsopgaven, eventueel beginnen met huiswerkopgaven	25
<b>Nabespreken/ samenvatten</b>	Samenvatten stof.	Actief luisteren	5
<b>Evalueren of beoordelen</b>	Middels videoanalyse	N.v.t.	

## Videoanalyse les 2

Deze tweede les is op dezelfde dag als de eerste les, met daartussen een lesuur en een kleine pauze.

Docent heeft in de middagpauze een meetopstelling voorbereid uit beschikbare practicummiddelen om een magnetisch veld rondom een stroomvoerende draad te laten zien. Het blijkt echter dat met de beschikbare magnetische sensor (draaibare magneet) het niet lukt om het magneetveld op te pikken bij een stroomsterkte van 5 A. Docent zoekt als alternatief voor de les een demonstratieproef op (Magnetic Field of a Wire, 2018). Daarin wordt een stroomsterkte van 10 A gebruikt en ijzervijzel om de magnetische veldlijnen zichtbaar te maken (aandachtspunt 6).

Docent begint met voorkennis activeren uit de eerdere les met twee permanente magneten en een tekening van aarde met magnetisch veld die nog op het whiteboard stond. Docent benoemt dat magnetische ook heel veel met elektriciteit te maken heeft. Docent licht kort de gemaakte meetopstelling toe en dat deze helaas niet sterk genoeg is om een magneetveld te laten zien.

Leerling luistert aandachtig, maar stelt geen vragen (aandachtspunt N2).

Docent laat de video van de demoproef zien en licht toe waarin deze proef verschilt van de gemaakte meetopstelling: 2x zoveel stroomsterkte en een gevoeliger manier om het magneetveld in kaart te brengen met ijzervijzel. Ook in de demofilm wordt getikt om het ijzervijzel zich te laten richten.

Leerling vraagt of er nu stroom door de draad gaat (in de video).

Docent bevestigt dat en dat wanneer de stroomrichting omgekeerd wordt, de richting van het magneetveld ook omkeert. Maakt gebruik van de gelegenheid om de rechterhandregel bij een stroomvoerende draad uit te leggen. Docent tekent vervolgens verticaal een draad op het whiteboard met stroomrichting naar beneden en vraagt de leerling om de richting van het magneetveld eromheen te bepalen met de rechterhand regel. Leerling antwoordt linksom (en gebruikt haar linkerhand)

Docent vraagt of ze haar rechterhand gebruikt. Leerling realiseert zich dat en corrigeert zichzelf direct.

Docent legt de afspraak uit om richtingen veldlijnen aan te geven die loodrecht op een vlak bord of blad papier staan. Het bord in met een cirkel met daarin een kruis en het bord uit met een cirkel met een stip in het midden. Metafoor om te onthouden is de kant van een dartpijl die je van je af ziet gaan of naar je toe ziet komen.

Docent legt uit dat het symbool  $B$  staat voor de magnetische veldsterkte (inductie) en dat dat een vector is. Leerling herhaalt vragend "dus  $B$  staat voor magnetisch veld"?

Docent bevestigt en benoemt dat stroomsterkte ook een vector is omdat het richting heeft.

Docent legt uit dat wanneer de draad opgerold of opgewikkeld wordt (tot een spoel), dat dan het magneetveld in het midden van de cirkel één richting krijgt. Leerling vraagt gelijk in welke richting dat magnetisch veld dan gaat.

Docent legt voor een stukje draad in de spoel uit welke richting het  $B$ -veld daaromheen krijgt (volgens rechterhandregel stroomvoerende draad). Leerling geeft aan dat niet te in te zien.

Docent schakelt naar het boek om een plaatje van een spoel om/door een perspex-plaat met daarop ijzervijzel te gebruiken bij een andere uitleg. Daarop is te zien dat het ijzervijzel zich richt in de richting van de as van de spoel. Welke kant kun je daarop niet zien, maar dat kun je wel meten met bijvoorbeeld een kompasnaald of een permanente magneet. Docent benoemt dat een spoel waar

stroom doorheen gaat een magnetisch veld maakt en daarom elektromagneet genoemd wordt. Docent legt de rechterhandregel voor een spoel uit: vingers van de hand wijzen de richting van de stroom om het midden van de spoel heen (as van de spoel) en de duim geeft dan de richting van het magnetisch veld aan. **Leerling zegt "OK, ja"** (aandachtspunt 7).

Docent geeft aan dat als de stroom omdraait van richting dat dan het magnetisch veld ook omdraait van richting. **Leerling herhaalt dat je dus moet kijken hoe de stroom om de spoel heen gaat.**

Docent bevestigt dat en geeft aan dat wat het soms lastig maakt, is dat de spoelen niet altijd op dezelfde manier getekend zijn. Het is een 3D object dat op een plat vlak getekend wordt.

Docent laat dat zien aan de hand van een blok dat in perspectief getekend is. Hoeken op de tekening zijn dan niet allemaal 90 graden, maar de afspraak is dat die dat wel zijn. **Leerling stemt in dat dat om meer manieren kan.**

Docent gaat weer terug naar de spoel op het bord en tekent nu ook de veldlijnen die buiten de spoel lopen. Docent geeft aan dat dit precies hetzelfde veld is als bij een permanente magneet en vraagt de leerling welke kant dan de N-pool zal zijn. **Leerling geeft zonder twijfelen het juist antwoord.**

Docent plaatst ook de Z-pool en geeft aan dat buiten de magneet de afspraak van Noord naar Zuid inderdaad ook hier geldt en dat binnen de magneet de veldlijnen van Z naar N lopen. Dit is bij een permanente magneet ook zo. **Leerling vraagt of de N-pool dan ook aan de kant van de pluspool van de spanningsbron komt.**

Docent geeft aan dat dat niet altijd zo is en geeft aan dat je voor het bepalen van de richting van het magnetisch veld in een spoel de rechterhandregel gebruikt en je daarbij de richting van de stroomsterkte om de as van de spoel neemt. Dat hangt dus er dus mede vanaf welke kant om de spoel gewikkeld is (rechtsom of linksom). **Leerling herkent dit gelijk uit de eerdere uitleg** (aandachtspunt N5).

Docent vat nog een keer samen de rechterhandregels bij een stroomvoerende draad en bij een spoel (elektromagneet). **Leerling luistert aandachtig.**

Docent geeft aan de een elektromagneten op een aantal aspecten voordelen heeft boven een permanente magneet en vraagt of leerling die voordelen zou kunnen bedenken. **Leerling bedenkt als voordeel aan dat deze werkt wanneer je wilt door stroom aan of uit te zetten.**

Docent geeft aan dat je hem ook harder en zachter kan zetten door er meer of minder stroom door te laten gaan en dat je door de stroomrichting om te keren de richting van het magneetveld om kunt keren. Tot slot kunnen elektromagneten ook veel sterker zijn dan permanente magneten.

Docent kijkt even in de paragraaf van het boek of alles in de uitleg aan bod geweest is. Hij benoemt dat de eenheid van de grootte magnetische veldsterkte (B) de tesla (T) is. Deze is net als de elektrische auto's genoemd naar Nikola Tesla. Docent geeft aan een veldsterkte van 1 Tesla al erg sterk is dat bij MRI scanners velden van 2 a 3 Tesla gebruikt worden en dat daarbij niet met metalen (magnetiseerbare) voorwerpen in de ruimte mag komen. Docent vraagt of leerlingen weet wat een MRI scanner ongeveer is. **Leerling geeft aan dat te herkennen uit het ziekenhuis.**

Docent legt uit dat je met een spoel ook een schakelaar kunt maken en wel een relais. Zonder stroom is er geen magneetveld en duwt een veertje de schakelaar open. Met stroom door het spoeltje ontstaat een magneetveld dat de (magnetiseerbare) schakelaar sluit (aandachtspunt 8).



Docent geeft aan dat veelal weekijzer in een spoel gebruikt wordt om het magneetveld te versterken. Dat komt omdat weekijzer gemakkelijk te magnetiseren is en daardoor gaat bijdragen aan het magnetisch veld van de spoel. **Leerling zegt "ok" en vraagt of de schakelaar dan ook van weekijzer is om te kunnen magnetiseren.**

Docent geeft aan dat de schakelaar inderdaad van te magnetiseren materiaal moet zijn, dus weekijzer zou kunnen. Docent rondt na 22 minuten in de les de uitlegfase af en zet de leerling aan opgaven uit de planner om naar de verwerkingsfase te gaan.

**Leerling vraagt na enige tijd of de richting van B altijd tegenovergesteld gaat van de veldlijnen.**

Docent vraagt om verduidelijking van de vraag. **Leerling vraagt of dat binnen de spoel zo is.** Docent geeft aan de B altijd met de veldlijnen mee gaat. Die gaan buiten de spoel van Noord naar Zuid en binnen de spoel van Zuid naar Noord. Docent geeft erbij aan dat een kompasnaaldje ook de richting van het magnetisch veld aangeeft.

**Leerling geeft weer enige tijd later aan dat het niet gelukt is om de richting van de stroom te bepalen bij een opgave, maar nog wel de richting van het B-veld.** Docent kijkt mee met de leerling en laat zien hoe je het beste kunt uitvinden in welke richting de stroom loopt. Dit kan door de draden te volgen. Verder begin je bij deze opgave bij de richting van het B-veld en zoekt daar met de rechterhandregel de richting van de stroom om de spoel te bepalen en als laatste uit het plaatje uitvinden hoe de stroom dan door de aansluitdraden moet gaan (aandachtspunt N3).

Docent gaat naar de afronding van de les, benoemt dat de leerling goed bezig is en er op mag vertrouwen dat het zo wel goed komt met haar en natuurkunde. Rustig blijven, opgaven maken en vragen telkens meenemen naar de volgende les (aandachtspunt N4).

### Lesplan lessenserie 1 - les 3

Docent: Mike Wassenaar vrijdag 14 juni 2019 10:00 – 11:00 Luzac Zwolle

Methode: Pulsar natuurkunde 5 VWO, Hoofdstuk 10 Elektromagnetisme

Beginsituatie: Leerling heeft twee lessen elektromagnetisme gehad, na lange periode zonder natuurkunde les

Onderwerp: 10.3 Lorentzkracht op een draad (bron 9 en 10)

Doelstelling: Leerlingen kunnen de richting van de Lorentzkracht op een stroomvoerende draad en geladen deeltje in een permanent B-veld bepalen en rekenen met de bijbehorende formules.

Hulpmiddelen: Geen

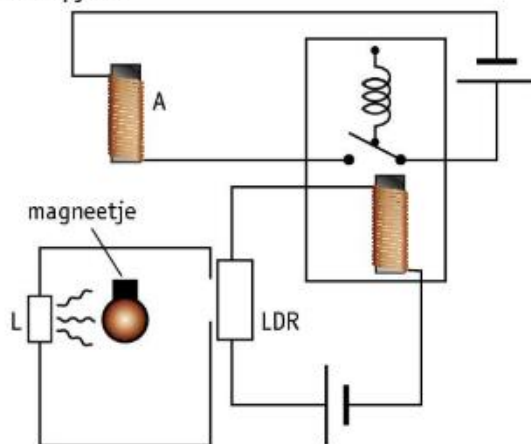
Onderwijsfuncties	Docent	Leerlingen	Tijd
<b>Leerdoelen en motivatie</b>	Zie Doelstelling	Zie Doelstelling.	5
<b>Peilen beginsituatie/ activeren voorkennis</b>	Activerende vragen stellen over rechterhand regel B-veld bij stroomvoerende draad en spoelen. Inventariseren huiswerk op onduidelijkheden en daarop terugkomen.	Vragen beantwoorden en hopelijk ook nieuwe vragen stellen	10
<b>Presenteren kennis</b>			15
<b>Presenteren werkwijzen</b>	Met ondersteuning van het digitale boek de kennis presenteren en daarbij telkens koppelen naar hetgeen eerder ervaren is. Vragen stellen over kompas op mobiel (gps of magnetisch) en dat onderzoeken.	Actief luisteren, aantekeningen maken en kompas mobiel onderzoeken	15
<b>Oefenen en feedback krijgen</b>	Aanbieden van verwerkingsopgaven, rondlopen en persoonlijke aandacht geven.	Maken verwerkingsopgaven, eventueel beginnen met huiswerkopgaven	15
<b>Nabespreken/ samenvatten</b>	Samenvatten stof.	Actief luisteren	5
<b>Evalueren of beoordelen</b>	Middels videoanalyse	N.v.t.	

### Videoanalyse les 3

Docent herhaalt in enkele zinnen de stof tot nu toe over permanente magneten, magnetisch veld rond een stroomvoerende draad en spoelen / elektromagneten en vraagt vervolgens naar het huiswerk en of daar vragen uit voort kwamen. **Leerling geeft aan dat dat wel prima ging en dat ze het aan de hand van de uitwerkingen nagekeken heeft. Wel heeft ze een vraag over opgave 24 a, b en c.**

Docent pakt opgave 24 (Figuur 3) erbij op het touchscreen:

- 24** In figuur 10.25 is het geheim van figuur 10.16 te zien. Bovenin het kastje zit een elektromagneet (A). Deze wordt geactiveerd door een relais. Het relais wordt aangestuurd met een LDR en een spanningsbron. Het balletje zweeft tussen de LDR en een lampje L.



▲ **Figuur 10.25**

- Bereken of de elektromagneet A het balletje aantrekt als het balletje precies voor de LDR zweeft.
- Leg uit waardoor het balletje blijft zweven.
- Blijft het balletje ook zweven als je de magneet op het balletje omkeert? Leg uit.
- Zou het balletje in principe kunnen zweven als je het magneetje vervangt door een stukje ijzer?

*Figuur 3 Opgave 24 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)*

Docent geeft aan dat dit over een toepassing gaat en dat er in deze schakeling twee spoelen zitten waarmee je door er stroom doorheen te laten gaan er magneten van maakt. **Leerling zegt ja.**

Docent wijst het gedeelte met de relais in de schakeling aan en vraagt de leerling of ze weet hoe dat gedeelte heet. **Leerling zegt: dat is die, eh, relais.**

Docent bevestigt dat en vraagt wat je met een relais kunt doen. **Leerling zegt: aan en uitzetten.**

Docent bevestigt dat en herhaalt de relais werking van een relais:

- Geen stroom door spoel → geen magneetveld → veer trekt schakelaar open.
- Wel stroom door spoel (in juiste richting) → wel magneetveld → ijzeren schakelaar wordt gemagnetiseerd en naar beneden getrokken (magneet sterker dan veer) → schakelaar dicht.

Docent loopt de schakeling door en vraagt de leerling of ze nog weet wat een LDR is. **Leerling zegt nee.** Docent benoemt dat het een Light Dependent Resistor is. **Leerling zegt: Dependent, ja, ik wist de D niet meer.**

Docent vraagt hoe een LDR werkt. **Leerling geeft dat de weerstand ervan kleiner wordt wanneer er meer licht op valt.**

Docent bevestigt dat en vult aan dat dit een sterk effect is op de weerstand en gaat terug naar de vraag 24a en vraagt welke krachten er op het zwevende balletje werken. **Leerling antwoordt zwaartekracht** (aandachtspunt N6).

Docent tekent de zwaartekracht en vraagt welke kracht er nog meer werkt. **Leerling weet het niet.**

Docent geeft aan dat dit een kracht omhoog moet zijn, even groot als de zwaartekracht zodat er geen netto kracht is en het balletje zweeft. Docent benoemt dat dit een magnetische kracht is. **Leerling geeft aan dit vreemd te vinden, want het blijkt dat er geen stroom door de relais gaat (geen licht op LDR dus hoge weerstand). Dus gaat er ook geen stroom door magneet A en zal het balletje vallen.** Bij controle in de uitwerkingen wordt dat bevestigd. Docent geeft aan dat de vraagstelling in Pulsar verwarrend is door het gebruik van het woordje 'zweeft'. Beter zou zijn: 'bevindt'. Docent geeft aan dat 24b ook al gemaakt is, want geen balletje voor de LDR betekent veel licht erop, lage weerstand, veel stroom door relais, schakelaar dicht en spoel A aan, dus magneetje wordt aangetrokken en balletje gaat omhoog. **Leerling bevestigt tussendoor telkens met 'ja' en beredeneert zelf ook vraag 24b juist. Leerling beredeneert ook dat het balletje weer omlaag valt zodra de bal voor de LDR komt.**

Docent geeft aan dat leerling het grootste deel zelf al kon beredeneren. **Leerling erkent dat nu ook en dat ze het niet helemaal zag omdat ze niet meer wist wat een LDR is en met name vraag 24a duidelijker kon.**

Docent gaat door naar 24c en vraagt aan de leerling of ze dat nu kan beredeneren. **Leerling twijfelt een beetje.** Docent tekent op het bord een N en Z pool bij de permanente magneet en vervolgens consequent daarmee die van de spoel. Vervolgend permanente magneet omdraaien. **Leerling geeft aan dat ze elkaar dan afstoten en het balletje niet omhoog zal gaan.** Docent geeft aan dat dit een prima redenering is. De uitwerkingen geven aan dat het balletje mogelijk zal omdraaien zodat de magneet weer juist gericht is. Ook dit is geen echt duidelijk uitleg die een leerling zelf zal kunnen bedenken. Docent gaat naar 24d en stelt de leerling de vraag. **Leerling antwoordt zonder enige twijfel.**

Docent legt dit nog even uit (en had dit beter aan de leerling kunnen vragen). Docent benoemt dat veel leerlingen dit ieder jaar weer een lastige som vinden, dat sommigen hem na uitgebreide uitleg nog steeds niet snappen en dat deze leerling hem prima kan uitleggen nu. **Leerling geeft aan bij het zien van zo'n schema al vrij snel door de bomen het bos niet meer te zien.**

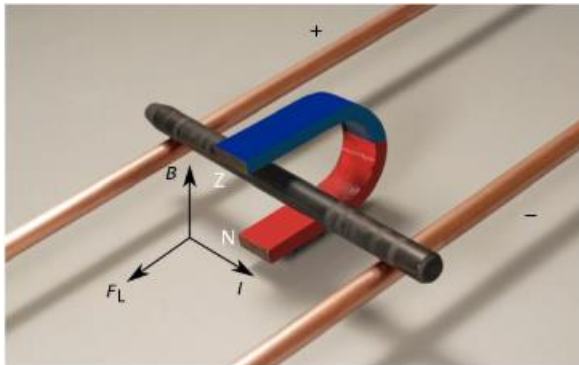
Docent geeft aan dat je dan naar een klein stukje ervan kunt kijken of je iets herkent en dat erbij zet en kijken of je nog meer dingen kunt ontdekken.

Fase voorkennis activeren middels gemaakt huiswerk duurde 15 minuten.

Docent gaat over naar nieuwe paragraaf over kracht en vraagt of leerling wel eens van lorentzkracht gehoord heeft. **Leerling geeft aan dat van klasgenoten wel gehoord te hebben, maar niet te weten wat het precies is.**

Docent geeft aan dat op een stroomvoerende draad in een magneetveld (loodrecht erop) een kracht gaat werken en dat deze kracht heel groot kan zijn. **Leerling zegt: dus als er een draad is met stroom komt er een kracht op te werken.**

Docent vult aan dat dat wel in een magneetveld moet zijn en legt het plaatje uit het boek uit (Figuur 4), te beginnen bij de schakeling en richting van de stroom en vervolgens de magneet en het daaruit volgende B-veld:



**Figuur 10.31** Kracht op een stroomdraad

*Figuur 4 - Figuur 10.31 Kracht op een stroomdraad (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)*

**Leerling zegt weifelachtig ja en geeft aan de staaf bij rollen uit het B-veld gaat.**

Docent bevestigt dat en laat een demo van YouTube zien van een proef met twee parallelle draden (MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire, 2008).

Docent legt uit dat de draden parallel (gelijke stroomrichting) of in serie (teggengestelde stroomrichting) geschakeld kunnen worden en vraagt wat de leerling weet van een draad waar stroom doorheen gaat. **Leerling geeft aan dat daar een magneetveld omheen komt.** Docent bevestigt dat een geeft dat je met de rechterhandregel kunt de richting van het B-veld kunt vinden (aandachtspunt 9).

Docent tekent de rechterdraad, richting van de stroom en vraagt de leerling naar de richting van het B-veld. **Leerling geeft de juiste richting aan en docent tekent deze op het bord.**

Docent tekent de linkerdraad met stroom in dezelfde richting en geeft aan dat hier een B-veld van de rechterdraad op werkt en er dan een lorentzkracht gaat werken. Docent benoemt dat hij het bepalen van de richting nog even achterwege laat om later uit te leggen. Docent laat deze situatie in het demo filmpje (draden parallel geschakeld) zien en daaruit blijkt dat de draden elkaar afstoten. Docent laat ook zien dat bij draden in serie (teggengesteld stroomrichting) de draden elkaar aantrekken (aandachtspunt N8).

Docent gaat terug naar het uitleggen van de linkerhandregel (FBI) aan de hand van het boek. F, B en I staat alle drie loodrecht op elkaar. Docent legt uit dat als je er twee van weet, dat de derde dan maar twee mogelijkheden heeft. Met de linkerhandregel kun je dan de juiste richting vinden (aandachtspunt N7).

Docent gaat terug naar de linkerdraad op het bord en vraagt de leerling te beredeneren welke kan de lorentzkracht op staat. **Leerling vindt (na enig stoeien) samen met de docent dat de lorentzkracht naar rechts gaat. Leerling vraagt nog wel hoe je de richting van het B-veld op de linkerdraad ook alweer weet.**

Docent legt uit dat deze van de rechterdraad komt en dat deze al eerder samen bepaald is met de rechterhandregel voor een stroomvoerende draad. Docent gaat naar de rechterdraad kijken en vraagt de leerling het B-veld aldaar van de linkerdraad te bepalen. **Leerling vraagt of de stroom hier ook omhoog gaat en bepaald vervolgens de juiste richting.**

Docent tekent het B-veld van de linkerdraad en op verschillende plaatsen en ook bij de rechterdraad. Docent vraagt leerling richting lorentzkracht op rechterdraad te bepalen. **Leerling denkt hardop en komt met de linkerhandregel tot de juiste conclusie.** Docent laat zien dat bij gelijke stroomrichting de draden elkaar inderdaad zullen aantrekken. **Leerling stemt met meerdere keren ja in en beredeneert dat dit ook zo zal zijn als bij beiden de stroom naar beneden gaat.**

Docent gaat terug naar het filmpje met draden die elkaar afstoten (serie, tegengestelde stroom) en beredeneert dit op het whiteboard samen met de leerling. Docent geeft aan dat je de grootte van het B-veld kunt berekenen met de formule  $F = B \cdot I \cdot l$  en licht dit toe met evenredigheden en een schets op het bord. Docent rondt de uitlegfase nieuwe stof af en zet de leerling aan verwerkingsopgaven.

Deze fase duurde 20 minuten. **Leerling gaat aan het werk.** Na enige tijd benoemt docent dat het heel normaal is om bij dit onderwerp beide handen te gebruiken en dat dat altijd zo is bij dit onderwerp. Zowel in de studiezaal als bij de school- en eindexamens. Na 10 minuten loopt docent even langs bij leerling en vraagt hoe het gaat. **Leerling legt uit waar ze mee bezig is en hoe ze redeneert bij een opgave.** Docent kijkt even mee en vindt dezelfde richting als de leerling. De opgave heeft een 3D weergave in perspectief en docent licht die nog even toe. Docent geeft aan dat het handig is om dezelfde weergave in een schetsje te gebruiken. **Leerling werkt weer verder (aandachtspunt 10).**

Docent laat de leerling doorwerken tot aan de schoolbel. Vraagt dan nog even hoe dat gaat. **Leerling geeft aan dat ze het toch nog wel lastig vindt om soms de linkerhandregel (FBI) te gebruiken.**

Docent geeft aan dat je je soms nu eenmaal in een rare bocht moet wringen om je linkerhand hetzelfde te krijgen als FBI bij de opgave. Docent geeft aan dat er meer hulpmethodes zijn en dat die allemaal hetzelfde resultaat opleveren (aandachtspunt 11). Docent volgt het boek omdat dat dan eenvoudig na te lezen is voor de leerlingen. Wat al deze methodes opleveren is de richting van de derde bij gegeven richting van de twee anderen (uit F, B en I dus). **Leerling knikt instemmend en begint haar tas in te pakken.**

## Lesplan lessenserie 1 - les 4

Docent: Mike Wassenaar vrijdag 14 juni 2019 11:15 – 12:15 Luzac Zwolle

Methode: Pulsar natuurkunde 5 VWO, Hoofdstuk 10 Elektromagnetisme

Beginsituatie: Leerling heeft drie lessen elektromagnetisme gehad, na lange periode zonder natuurkunde les

Onderwerp: 10.3 Lorentzkracht op een deeltje en toepassingen van lorentzkracht (bron 11 t/m 14)

Doelstelling: Leerling kan de richting van de lorentzkracht op een bewegend geladen deeltje bepalen met de rechterhandregel en de grootte ervan berekenen met de bijbehorende formule.

Hulpmiddelen: Geen

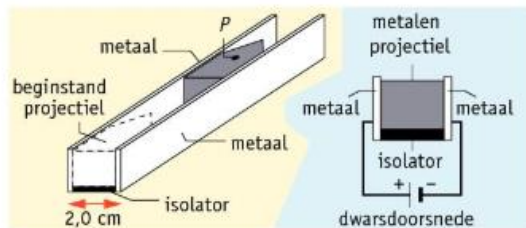
Onderwijsfuncties	Docent	Leerlingen	Tijd
Leerdoelen en motivatie	Zie Doelstelling	Zie Doelstelling.	5
Peilen beginsituatie/ activeren voorkennis	Vorige les was 15 minuten geleden, begeleiden bij verwerkingsopgaven.	Verwerkingsopgaven maken	15
Presenteren kennis	Concept bewegende lading is stroomsterkte en vervolgens rechterhandregel toepassen	Actief luisteren	10
Presenteren werkwijzen	Vershillende situaties schetsen op het bord met bewegende lading, magnetisch veld en lorentzkracht en telkens 2 van de drie grootheden geven ( $v$ , $B$ en $F_L$ )	Leerling denkt hardop mee en probeert telkens de richting van de ontbrekende grootheid te vinden met de rechterhandregel	10
Oefenen en feedback krijgen	Verwerkingsopgaven laten maken en beschikbaar zijn voor vragen.	Leerling maakt verwerkingsopgaven en stelt vragen waar nodig	15
Nabespreken/ samenvatten	Samenvatten doelstelling les	Actief luisteren en eventueel vragen stellen	5
Evalueren of beoordelen	Middels videoanalyse	N.v.t.	

## Videoanalyse les 4

Sinds de vorige les is er alleen een pauze van 15 minuten geweest en leerling vond daarin het maken van sommige verwerkingsopgaven nog lastig.

Docent stelt voor om een lastige opgave samen te maken en laat de leerling de inleiding oplezen en vraagt vervolgens wat ze hierover zonder verder naar de vragen te kijken zou kunnen bedenken (Figuur 5).

- 32 In figuur 10.36 zie je een zogenaamde 'Single pulse rail accelerator'. Daarin wordt de lorentzkracht gebruikt om een projectiel weg te schieten.



▲ **Figuur 10.36**

Het metalen projectiel maakt tijdens de lancering steeds contact met de zijwanden van de goot. De goot bevindt zich in het geheel in een sterk magneetveld. Gedurende 2,0 ms loopt er een stroom van 1,5 MA. Deze stroom zorgt voor een kracht van 85 kN op het projectiel, dat 80 g zwaar is.

- Waarom zijn de zijwanden van de goot van metaal en de bodem niet?
- Teken de richtingen van de lorentzkracht, de stroom en het magneetveld in punt P.
- Bereken de grootte van de magnetische inductie.
- Bereken de snelheid die het projectiel krijgt als je de weerstandskrachten verwaarloost.

Figuur 5- Figuur 10.36 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)

**Leerling blijft stil.** Docent geeft aan hoe hij ernaar kijkt. Er wordt iets versneld waarvan de massa gegeven is. **Leerling zegt aan arbeid te denken.** Docent geeft aan dat geen gekke gedachte is en dat dat ook zou kunnen wanneer de lengte van de rail gegeven zo zijn. Echter bij deze opgave moet je denken aan de tweede wet van Newton ( $F_{netto} = m \cdot a$ ). Docent geeft aan dat de lichte massa van het projectiel bij deze grote kracht enorm versneld zal worden. Docent geeft aan dat de kracht die hiervoor zorgt de lorentzkracht is en vraagt welke richting deze op zal staan. **Leerling twijfelt, gebruikt haar linkerhandregel en zegt nee.** Docent geeft aan dat je hier naar het plaatje moet kijken en daaruit kunt afleiden welke kant de lorentzkracht. Dus zonder gelijk met de linkerhandregel te beginnen. Docent tekent de lorentzkracht op het touchscreen over de afbeelding (in perspectief). **Leerling knikt beamend.** Docent gaat naar vraag 32a. **Leerling geeft aan dat de zijwanden nodig zijn voor geleiding.**

Docent bevestigt en gaat gelijk door naar vraag 32b en vraagt de leerling welke richting de stroom door het projectiel zal hebben. **Leerling zegt: van links naar rechts vanwege de spanningsbron.** Docent bevestigt en tekent de richting van de stroomsterkte in punt P. **Leerling gebruikt linkerhand en geeft aan dat het B-veld naar beneden moet staan.** Docent bevestigt dat en tekent de richting van het B-veld.



Docent geeft aan de vragen 32c en 32d het rekenwerk zijn dat erbij hoort en hoe je aan de  $I$  komt uit de formule voor lorentzkracht. **Leerling twijfelt wat en ziet dan in dat beiden inderdaad nu wel op te lossen zijn.** Docent legt uit dat wiskundig gezien altijd één van de grootheden uit een formule gevraagd wordt en dat je daarvoor de andere grootheden en constanten uit die formule nodig hebt. Zo ook bij  $F_L = B \cdot I \cdot l$ .

Docent gaat over naar instructie over lorentzkracht op een geladen deeltje en sluit aan bij kracht op een stroomvoerende draad. Daarin bewegen elektronen en de lorentzkracht werkt op die elektronen. Docent tekent vervolgens een los elektron op het bord, met een snelheidsvector (naar rechts) en vervolgens een magnetisch veld daar loodrecht op (het bord in of uit zodat de lorentzkracht in het vlak van het bord moet liggen. Laat de leerling de stroomrichting bepalen (tegen de richting van elektronen in) en vervolgens met de linkerhandregel de richting van de lorentzkracht bepalen (naar beneden). **Leerling geeft de juiste richting van de stroomsterkte aan.** Docent vraagt wat er dan met het elektron zal gebeuren. **Leerling kan dat niet echt bedenken.**

Docent gebruikt de metafoor van fietsen langs een gebouw waardoor ineens harde wind van opzij komt. **Leerling geeft aan dat je opzij geblazen wordt.** Docent legt uit dat bij het elektron precies hetzelfde gebeurt: het wordt afgebogen. Docent vraagt vervolgens wat de richting van de lorentzkracht zal zijn als het elektron een stukje naar beneden is afgebogen. **Leerling kan dat echt niet bedenken.** Docent geeft aan dat de richting van de stroomsterkte verandert en dat dat komt om de richting van de snelheid is veranderd. Stroomsterkte gaat daar nog steeds tegenin. **Leerling ziet dat nu ook in en kan bepalen dat de lorentzkracht nu ook gedraaid is.**

Docent geeft aan dat de kracht naar het midden van een cirkel gericht blijft en dat het elektron een cirkelbaan zal maken. Docent legt aan de hand van analogieën uit dat er altijd een kracht naar het midden gericht is bij een cirkelbaan. Bijvoorbeeld door een bal aan een touwtje rond te slingeren. Dan is de spankracht altijd naar het midden gericht. Helaas is de cirkelbaan nog niet aan bod gekomen omdat die pas in periode drie van het zesde leerjaar bij gravitatie meegenomen wordt. Het zou handig zijn dat die al gelijk bij kracht en beweging meegenomen wordt in periode 1 (aandachtspunt 13).

Docent gebruikt nog een tweede voorbeeld om cirkelbanen toe te lichten en wel ISS dat een cirkelbaan maakt door gravitatiekracht en die is ook naar het midden van de cirkel gericht. Docent benoemt deze kracht als middelpuntzoekende kracht en legt uit dat dit een nettokracht is waarvoor er een kracht moet zijn die hem levert. Net als dat voor versnellen in rechte lijn een nettokracht nodig is en dat het niet uitmaakt waar die kracht vandaan komt.

Docent koppelt deze achtergrond weer terug naar een geladen deeltje dat in een homogeen magneetveld beweegt en een lorentzkracht loodrecht op de richting van de snelheid ondervindt. De lorentzkracht levert dan de middelpuntzoekende kracht voor de cirkelbaan. Docent laat dit vervolgens zien met een demonstratie in een YouTube video (Deflecting a Beam of Electrons with Helmholtz Coils, 2011). Dit bij gebrek aan fysieke demonstratiematerialen.

**Leerling heeft al een hele tijd aandachtig geluisterd en vraagt hoe dat nu zit met elektronen in een draad. Of die dan niet ook een cirkelbaan moeten volgen.**

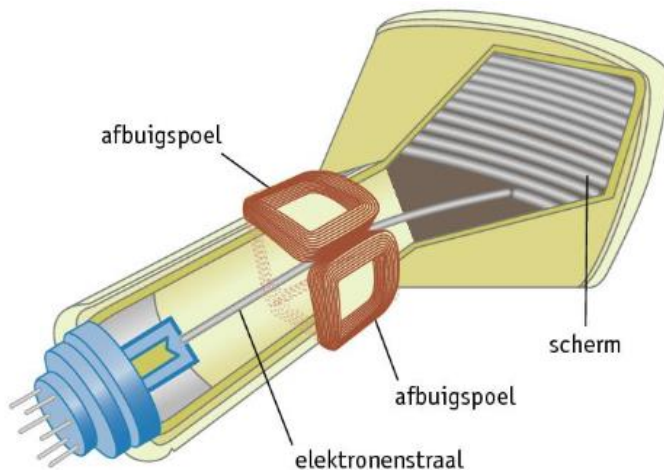
Docent herhaalt met behulp van de demoproef uit dat losse elektronen inderdaad een cirkelbaan volgen door de lorentzkracht. Docent checkt of leerling inderdaad wil weten wat er in een draad gebeurt met de richting van elektronen. **Leerling bevestigt de juiste richting.** Docent tekent draad als een dunne cilinder op het whiteboard en tekent daar een elektron in (beweegt tegen de richting van de stroom in). Lorentzkracht werkt op de elektronen en die oefenen op hun beurt kracht op de draad

uit in dezelfde richting. Daardoor werkt de lorentzkracht op de hele draad. **Leerling concludeert voor zichzelf dat ze in een draad dus niet in een rondje kunnen.** Docent bevestigt de conclusie van de leerling.

Docent introduceert nu de formule voor de lorentzkracht op een geladen deeltje en licht toe hoe deze is opgebouwd. **Leerling vraagt of het deeltje een elektron is.** Docent herhaald zijn uitleg, maar sluit niet aan op de vraag van de leerling. **Leerling herhaalt dan ook de vraag.** Docent geeft dat het dat het een elektron kan zijn, maar dat er nog meer geladen deeltjes zijn. Docent vraagt of leerling nog meer geladen deeltjes kent dan een elektron. **Leerling antwoord gelijk met "een proton".** Docent vraagt wat de lading van een proton is. **Leerling antwoord na enig aarzelen +1.** Docent bevestigt en geef aan dat dit dus net als bij een elektron maal  $1,6 \times 10^{-19}$  om de lading in coulomb te krijgen. **Leerling ziet in dat ook een proton een cirkelbaan zal gaan volgen.**

Docent vraagt of de leerling ook geladen deeltjes uit de scheikunde kent. **Leerling noemt direct ionen.** Docent geeft aan dat ionen ook positief en negatief geladen zijn en vraagt wat de lading is van  $\text{Ca}^{++}$ ? **Leerling antwoord +2.** Docent noemt nog een ander voorbeeld van geladen deeltjes, of eigenlijk inktdruppels. Ook die kunnen lading hebben en ondervinden dus lorentzkracht bij bewegen loodrecht op een magneetveld.

Docent gaat verder naar het boek en introduceert opgave 33 (Figuur 6) door het oplichten van het scherm te benoemen wanneer er elektronen op vallen. Docent geeft aan dat de elektronen eerst versneld worden met een elektrische veld en vervolgens met de lorentzkracht door een magneetveld worden afgebogen. Docent noemt dat we vroeger hadden televisies hadden die zo werken. **Leerling vraagt hoe je dan kleur kon zien.** Docent geeft aan dat er verschillende puntjes op het scherm zitten die rood, groen of blauw oplichten als er een elektron op valt.



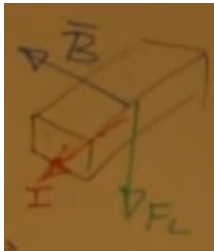
▲ **Figuur 10.37** Beeldbuis

*Figuur 6 - Figuur 10.37 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)*

**Leerling begint aan opgave 33** (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014). Na 5 minuten vraagt docent aan leerling hoe het gaat. **Leerling blijft stil.** Docent vraagt leerling om hardop te denken. **Leerling geeft aan geen idee te hebben en niet te zien hoe de elektronenstraal wordt afgebogen.**

Docent zet de Figuur 6 op het touchscreen met de opgave ernaast. Schrijven op het touchscreen lukt even niet en na een aantal pogingen gaat docent verder op het whiteboard ernaast om de eerst maar eens de weergave van de x-, y- en z-as in het perspectief van figuur 10.37 te tekenen.

Uiteindelijk komt de docent in samenspraak met de leerling tot een blok in de 3D weergave in Figuur 7 in ongeveer hetzelfde perspectief als Figuur 10.37 hierboven.



Figuur 7- Eigen schets van de vectoren voor  $F$ ,  $B$  en  $I$  bij Figuur 6

Vraag 33a gaat over de richting van het B-veld als de elektronenstraal naar beneden wordt afgebogen. Leerling ziet nu gelijk dat de lorentzkracht naar beneden gericht is en komt met de linkerhandregel tot de horizontale richting van het B-veld. Docent geeft aan dat het lastigste bij dit soort opgaven vaak is om tot het juiste 3D beeld van de gemaakte tekening (context) te komen. Daarna is het een kwestie van de richting van twee van de drie uit  $F$ ,  $B$  en  $I$  te vinden en de vervolgens de linkerhandregel toepassen om de richting van de derde te vinden.

Vraag 33a gaat eigenlijk alleen over welke spoelen er op dat moment aan staan. Leerling denkt dat dat de horizontale geplaatste spoelen zijn. Docent bevestigt dat en herhaalt dat de richting van het magneetveld bij spoel met de rechterhandregel te vinden is. Leerling vindt het lastig hierin een spoel te herkennen. Docent geeft aan dat dat inderdaad lastig is omdat tot nu toe bij alle opgaven de spoelen cirkelvormig zijn (of eigenlijk cilindervormig). Hier zijn ze dat niet. Leerling bedenkt uit zichzelf in welke richting de stroom dan door de spoelen gaat om het gewenste magneetveld te vinden en doet dat goed. Daarmee zijn vragen 32b en 32c ook gedaan.

Opgave 33 gaat vervolgens nog verder met stroomsterkte-diagram voor de horizontale en verticale afbuigspoelen op het werkblad. Leerling kan de uitleg over het horizontaal telkens van links naar rechts wel redelijk volgen, maar geeft ook aan dat echt niet zelf te kunnen bedenken. De verticale afbuiging wordt steeds na een horizontale lijn een stukje omlaag verplaatst zodat de beeldlijnen precies onder elkaar geschreven worden.

Leerling merkt op dat op het werkblad spanning in de grafiek staat en bij de uitwerkingen stroomsterkte. Docent geeft aan dat het boek hierin niet consequent is en dat voor magnetische velden uit de spoel de stroomsterkte het belangrijkste. Docent geeft ook aan dat voor stroomsterkte wel spanning nodig hebt. Leerling beaamt dat. Docent tekent telkens een stukje grafiek en leerling beaamt elk stapje. Leerling vraagt of de verticale afbuigstroom niet negatief wordt. Docent geeft aan dat dat wel zo is om de straal naar beneden toe af te kunnen buigen.

Aan de hand van de analyse door de docent kan de leerling volgen hoe één beeld wordt geschreven op het scherm. Leerling neemt ook de uitleg aan dat dit bijvoorbeeld 25x per seconde gebeurt zodat we als kijker naar het scherm een vloeiend bewegend beeld zien.

Leerling vraagt hoe dat nu werkt voor beeldschermen. Docent geeft aan dat dat met hele kleine LED's gebeurt (drie kleuren per beeldpunt) en dat dat ook 25x (of vaker) per seconde ververs wordt, zodat je een vloeiend bewegend beeld ziet.

Docent vraagt leerling als laatste om in eigen woorden nogmaals de werking uit te leggen. Leerling begint bij versnellen elektronen die vervolgens worden afgebogen in horizontale en verticale richting met afbuigspoelen. En dan (beetje twijfelend) komt er iets met kleurtjes. Docent beaamt dat en vult

nog aan dat afbuigen gebeurt met een magneetveld, waardoor er lorentzkracht op de bewegende lading ontstaat. **Leerling beaamt direct.**

Docent sluit de les af met de opmerking dat 33 een hele lastige opgave was en geeft een aantal opgaven op als huiswerk over geladen deeltjes en lorentzkracht.

## Lesplan lessenserie 1 - les 5

Docent: Mike Wassenaar vrijdag 18 juni 2019 13:45 – 14:45 Luzac Zwolle

Methode: Pulsar natuurkunde 5 VWO, Hoofdstuk 10 Elektromagnetisme

Beginsituatie: Leerling heeft vier lessen elektromagnetisme gehad, na lange periode zonder natuurkunde les

Onderwerp: 10.4 Elektromagnetische inductie

Doelstelling: Leerling ziet het verband tussen een wisselend magneetveld door een spoel, de spanning die daardoor ontstaat en de toepassing op dynamo en microfoon. Leerling kent de begrippen magnetische flux en inductiespanning en kan kwalitatief rekenen met het verband daartussen

Hulpmiddelen: (University of Colorado, Boulder, 2022)

Onderwijsfuncties	Docent	Leerlingen	Tijd
Leerdoelen en motivatie	Zie Doelstelling	Zie Doelstelling.	5
Peilen beginsituatie/ activeren voorkennis	Terugkijken naar huiswerk vorige les over lorentzkracht en rechterhandregel	Leerling stelt vragen over de gemaakte huiswerkopgaven.	10
Presenteren kennis	Applet gebruiken om het effect van een veranderend magneetveld op een spoel te laten zien.	Leerling denkt hardop mee	10
Presenteren werkwijzen	Begrip magnetische flux verduidelijken en de loodrechte component daarvan. Samenhang tussen grafieken van veranderende flux en inductiespanning.	Leerling denkt hardop mee.	15
Oefenen en feedback krijgen	Verwerkingsopgaven laten maken en actief beschikbaar zijn.	Leerling maakt verwerkingsopgaven en stelt vragen	15
Nabespreken/ samenvatten	Herhalen van doelstelling en stellen controlevragen	Actief luisteren	5
Evalueren of beoordelen	Middels videoanalyse	N.v.t.	

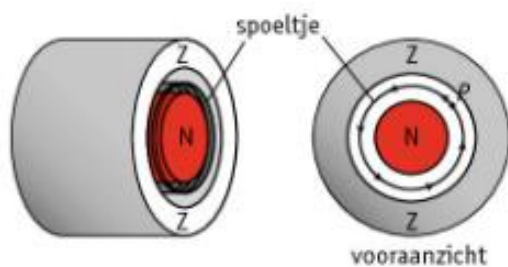
## Videoanalyse les 5

Docent begint met de introductie van laatste les over dit onderwerp voor de afsluitende toets (alleen diagnostisch, want leerling volgde niet het hele 5 VWO programma). **Leerling reageerde wat geschrokken en docent stelt haar gerust dat de toetsen niet helemaal over de vierde paragraaf zal gaan (met name de Wet van Lens over het bepalen van de polariteit van de inductiespanning).** **Leerling reageert gerustgesteld hoewel toetsen natuurkunde altijd heel veel spanning oproepen bij haar.**

Docent koppelt en naar de vorige les en het huiswerk en vraagt hoe het gegaan. **Leerling geeft aan dat het niet zo goed ging en komt direct met vier opgaven waar ze vragen bij had.** Docent schrijft de vraagnummers op het bord om later op terug te komen.

Docent vat de stof over de lorentzkracht samen en herhaalt beide manieren van 3D tekenen: in perspectief en twee assen in het vlak van tekening en de derde daar loodrecht op. Docent herhaalt de formule voor lorentzkracht op een draad en benoemt daarbij de bij een rechthoekige spoel (of winding) voor de lengte van het stuk draad in het magneetveld met het aantal windingen vermenigvuldigd moet worden. **Leerling reageert daarop met 'sorry, wat?'. Leerling kan heel soms een moment helemaal afwezig zijn.** Docent tekent de situatie op het bord en bij het zien van meer draden **vult de leerling de redenering van de docent precies op dat punt aan.** (aandachtspunt N12)

Dan de volgende opgave (35) over de aandrijfspoel van een luidspreker (Figuur 8):



**Figuur 10.41**

Het bestaat uit een magneet, een ijzeren ring en een spoeltje. Het spoeltje bevindt zich tussen de magneet en de ring.

*Figuur 8 - Figuur 10.41 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)*

**Leerling geeft aan niet te zien hoe dit nu precies werkt.** Docent zet de opgave op de smart-tv met tools klaar om erop te kunnen annoteren. Docent legt eerst uit hoe de permanente magneet er hier precies uitziet en laat vervolgens zien dat er een radiaal veld is van binnen naar buiten gericht op de ruimte waar de spoel zich bevindt. Docent tekent een paar vectoren van het B-veld. Daarna vraagt docent aan leerling om op één plek de richting van de stroomsterkte (volgens Figuur 10.41) aan te geven. **Leerling antwoord volgens tekening.** Docent tekent bij elke B-vector de vector van de stroomrichting.

Docent geeft aan dat met de richtingen van B en I de richting van de lorentzkracht te bepalen is en vraagt de leerling die te bepalen. **Leerling twijfelt wat.** Docent geeft aan om 1 vectorpaar te gebruiken. **Leerling ziet nu in dat de lorentzkracht het bord in gaat.** Docent wijst een ander vectorpaar aan en vraagt de leerling welke kan de lorentzkracht daar staat. **Leerling geeft aan weer het bord in.**

Docent concludeert dat de spoel bij deze stroomrichting het bord in beweging wordt en vraagt wat er gebeurt met de Lorentzkracht als de stroomrichting omgekeerd wordt. **Leerling ziet gelijk dat de Lorentzkracht dan ook moet omkeren.** Docent concludeert dat je met de richting van de stroom kunt bepalen in welke richting het spoeltje bewogen wordt en laat vervolgens zien dat dit spoeltje aan de conus van een luidspreker zit en dus de conus beweegt. Bij wisselspanning voert de conus een trilling die in de lucht een geluidsgolf veroorzaakt. Docent geeft aan dat voor lage tonen grote luidsprekers nodig zijn en voor hogere tonen kleine luidsprekers omdat bij grotere massa de trillingstijd toeneemt vanwege  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}$ .

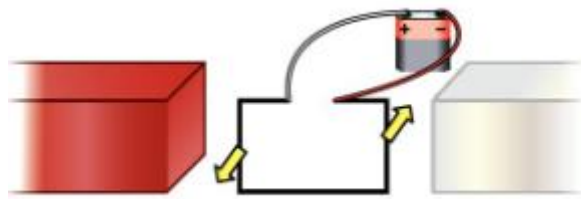
**Leerling vraagt hoe een grote speaker dan toch hoge tonen kan produceren.** Docent antwoordt dat in een grote speaker dan zowel grote als kleine luidsprekers zitten. Een speaker is de hele geluidsbox. Een luidspreker is een conus die bewogen wordt door de Lorentzkracht. Zonder grote speaker is een goede bas produceren niet mogelijk, bijvoorbeeld uit een tablet, smartphone en zelfs uit een plat touchscreen.

**Leerling heeft nog een vraag bij 35d. (stroomsterkte berekenen bij gegeven Lorentzkracht, aantal windingen en diameter spoel).** Docent noteert gegevens op het bord en wat gevraagd wordt (I). Vervolgens vraagt docent welke formule hier gebruikt kan worden. **Leerling antwoordt: ik had  $Fl = Bqv$  maar volgens mij moet ik de andere hebben.** Docent antwoordt dat I gevraagd wordt en niet in deze formule voor komt. Docent noteert formule en schrijft deze om naar de vorm  $I = Fl / (B \cdot l)$ , noemt dat Fl en B gegeven zijn en vraagt de leerling hoe je aan I komt. **Leerling geeft aan dat zo niet te zien.** Docent legt uit dat het om de lengte in het B-veld gaat en vraagt de leerling welke vorm de spoel heeft en wijst het intussen aan. **Leerling zegt aha, nu weet ik ook waar die pi vandaan komt en geeft vervolgens aan het vanaf hier wel weer te snappen.** Docent komt terug dat de 'missing link' voor de leerling niets anders was dan uitvinden hoe lang die draad in het B-veld is met deze geometrie.

Docent gaat verder naar de context van elektromotor en vraagt leerling naar richting B-veld van de permanente magneet. **Leerling moet even nadenken en antwoordt dan "O ja, van noord naar zuid buiten de magneet dus van boven naar beneden".** Docent geeft aan dat de Lorentzkracht gevraagd wordt, dus welke grootte heb je dan nog nodig. **Leerling antwoordt de stroomsterkte I.** Leerling geeft aan dat voor haar de stroomsterkte alle kanten op gaat.

Docent beaamt dat dat klopt in een winding en dat het bij de vraag alleen gaat om het stukje horizontaal bovenin dat zich loodrecht op het B-veld bevindt. **Leerling ziet de richting van de stroomsterkte en gaat met de linkerhandregel de richting van de Lorentzkracht bepalen en doet dat ook goed.** Docent vraagt wat er gebeurt als de spoel horizontaal staat en de stroomsterkte niet verandert. **Leerling geeft aan dat de Lorentzkrachten elkaar dan precies tegenwerken en de spoel stil blijft staan.** Docent beaamt dat en vraagt wat er moet gebeuren om de spoel door te laten draaien. **Leerling geeft aan dat niet gelijk te zien.** Docent vraagt wat er zou gebeuren als de stroom van richting verandert. **Leerling geeft aan dat de spoel dan door zou draaien.** Docent legt uit dat dat met een commutator bereikt wordt en hoe deze werkt. **Leerling kan dat wel volgen.**

Door naar opgave 37, zie Figuur 9.



Figuur 10.45

Figuur 9 - Figuur 10.45 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)

Docent herformuleert de vraag naar: kloppen de richtingen van de getekende lorentzkrachten? Wat is richting van het B-veld? **Leerling antwoord correct van links naar rechts.** Docent vraagt naar de richting van de stroomsterkte in de verticale stukken. **Leerling antwoord correct en vraagt vervolgens waarom op het onderste en bovenste stuk geen lorentzkracht werkt (vraag 37a).** Docent geeft aan de B en I hier parallel lopen en er dan geen lorentzkracht is. Docent geeft aan dat dat ook voor een geladen deeltje geldt dat evenwijdig aan een B-veld beweegt. **Leerling denkt even na en neemt dit vervolgens aan. Leerling noemt gelijk ook dat de spoel na een halve slag stil zal blijven staan omdat de richting van de stroomsterkte hier niet verandert.**

Na 30 minuten van terugkomen op huiswerk en stof van de vorige les, gaat docent over op de laatste paragraaf over inductie in deze laatste les over het onderwerp. Docent geeft aan de hand van het boek aan dat er een spanning in een spoel (of winding) ontstaat wanneer het magneetveld in een spoel verandert. Eerste voorbeeld is een leeskop bij een magnetische schijf. Docent licht toe dat deze spanning met name afhangt van hoe snel het magneetveld in de spoel verandert. **Leerling vraagt gelijk hoe het magneetveld dan kan veranderen.** Docent pakt de simulatie van PHET over Faraday's Law erbij (University of Colorado, Boulder, 2022).(aandachtspunt N13)

Na toelichten van de applet laat de docent ermee zien dat alleen een spanning ontstaat zolang het magneetveld door de spoel verandert. Zodra de verandering stopt, gaat de spanning direct naar 0 V. In deze simulatie kun je een magneet bewegen ten opzicht van een spoel en op deze spoel zijn een spanningsmeter en een lamp aangesloten. Docent frist op dat de lamp laat zien dat er stroom door de stroomkring gaat en dat de spanningsmeter de spanning over de lamp meet. Docent laat vervolgens met de applet zien dat bij toename van magnetisch veld door de spoel de spanning tegengesteld is aan de spanning bij afname van het magnetisch veld door de spoel. Na deze demonstratie gaat docent terug naar het boek en herhaalt de punten dat de inductiespanning afhangt van hoeveel het magnetisch veld door de spoel verandert, hoe snel die veranderingen gaan en hoeveel windingen de spoel heeft.

Daarna gaat de docent langs een aantal toepassingen zoals de dynamo van een fiets en een microfoon. Bij die laatste noemt de docent dat een microfoon eigenlijk omgekeerd werkt aan een luidspreker. Bij de luidspreker verander je met wisselspanning de lorentzkracht en beweeg je daarmee de conus en vervolgens de lucht. Bij een microfoon brengt de geluidsgolf in lucht het membraan in trilling waardoor een spoeltje ten opzichte van een permanente magneet beweegt en een inductiespanning ontstaat.

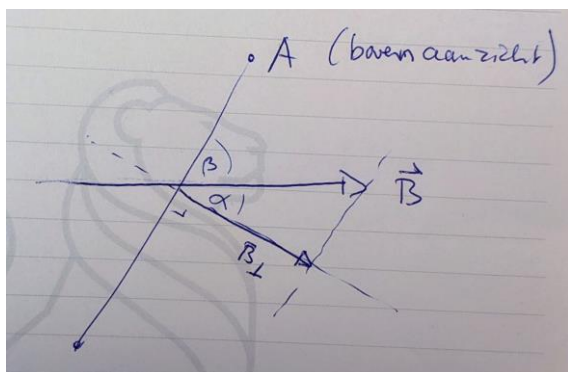
Pas nu introduceert de docent het begrip magnetische flux als de hoeveelheid magnetisch veld die door de spoel gevangen wordt. **Leerling begint een vraag maar weet hem vervolgens niet meer.** Docent geeft aan dat leerlingen bij hem in de kleine groepen altijd mogen inbreken en dat hij wel aangeeft wanneer het teveel is. Docent geeft aan dat hij erg graag heeft dat leerlingen vragen stellen, omdat hij zo beter weet wat er nodig is voor de leerlingen en daar beter op in kan springen



(aandachtspunt N14). **Leerling vraagt: "Is dat symbool ( $\Phi$ ) de letter phi?"**. Docent bevestigt dat het de Griekse hoofdletter phi is.

Docent legt uit dat flux het product is van magnetische veldsterkte en oppervlakte spoel of winding mits die loodrecht op elkaar staan. **Leerling vraagt: oppervlakte is gewoon oppervlakte van de cirkel?** Docent antwoord bevestigend en benoemt dat het dan ook in vierkante meter is. Tevens benoemt docent dat bij meer windingen nog vermenigvuldigd moet worden met het aantal windingen om tot het totaal oppervlakte te komen. Docent benoemt dat B-veld in Tesla is.

Docent tekent nu de situatie dat B-veld en winding niet loodrecht op elkaar staan in bovenaanzicht (zodat het vlak waarin de vectoren liggen in het vlak van tekening liggen) en maakt de constructie om de loodrechte component van het B-veld te bepalen (loodrecht op winding). Leerling denkt hardop mee en ziet in dat dit met goniometrie te vinden is. Docent laat de afleiding zowel zien met de hoek  $\beta$  tussen B-veld en de winding als wanneer de hoek  $\alpha$  tussen B-veld en normaal van de winding gegeven is (aandachtspunt 14) in Figuur 10.



Figuur 10 - Eigen schets van ontbinding van vector B-veld

BINAS gebruikt een formule met  $\Phi = B_{\perp} \cdot A = B \cdot A \cdot \cos\alpha$  waarbij de  $\alpha$  de hoek met de normaal is. Daarmee wordt het een kunstje met het risico dat ze niet inzien dat deze formule alleen bij een specifieke hoek hoort (tussen B-veld en normaal) met grote kans dat wanneer de andere hoek gegeven (met de winding dus) wordt de leerling dit niet inzien. Zelf leer ik ze liever zelf de ontbinding te maken om vervolgens te bepalen of sin of cos gebruikt moet worden (aandachtspunt 15.).

Nu (magnetische) flux is geïntroduceerd gaat docent verder met inductiespanning. Die hangt ervan af hoe snel de flux verandert en hoeveel windingen er zijn. Vervolgens ligt docent de notatie als afgeleide in de formule nog toe.  $U_{\text{inductie}} = N \frac{d\Phi}{dt}$  en hoe deze te bepalen uit de grafiek van de fluxverandering in de tijd. **Leerling vraagt: wat is nu de definitie van inductiespanning?** Docent antwoord dat dat de spanning is die ontstaat wanneer de magnetische flux door een spoel verandert. **Leerling antwoord met ja.**

Docent tekent een grafiek van fluxverandering als een sinus grafiek en laat zien dat deze kan horen bij een draaiende spoel in een magneetveld of een draaiende magneet in de spoel. Docent laat zien de op de maxima de flux niet verandert en dus de inductiespanning nul is en dat de raaklijn bij het steilste stuk het verticaalst loopt en de inductiespanning het grootst is. **Leerling bedenkt dat deze dus nooit verticaal kan lopen.** Docent bevestigt dat flux nooit in 1x kan veranderen en dat dat altijd een zekere tijd vraagt.

**Leerling vraagt bij een voorbeeld uit het boek over een dynamo of het lampje uit is wanneer de flux even constant is in een maximum.** Docent antwoord dat dan inderdaad de inductiespanning en inductiestroom nul zijn. Alleen moet de gloeidraad nog wel afkoelen om geen licht meer te geven en

dat kost meer tijd dan de periode dat de inductiespanning even nul is. Met nauwkeurig meten kun je wel de lichtintensiteit dan telkens even zien afnemen, maar met het blote oog niet.

Tijd voor opgaven maken om de uitleg te verwerken is er helaas niet meer. Dit sluit aan bij eerder gemaakte aandachtspunt N11. Omdat dit tevens de laatste les van de lessenserie is rond docent de les af met een vooruitblik op de nog te maken toets. Docent benoemt nogmaals dat wet van Lenz niet in de examenstof zit (het bepalen van de polariteit van de inductiespanning bij een context).

## 8.2 AANDACHTSPUNTEN UIT ANALYSE EERSTE LESSENSERIE

### Aandachtspunten uit les 1

1. Uitleggen wat een permanente magneet is, hoeft niet in de beginfase. Laat de leerlingen eerst maar ervaren wat een magneet is en dat het gedrag ervan aansluit bij wat ze er al mee ervaren hebben. De praktijk is een mooie manier om voorkennis te activeren.

2. Voorbeeld uit context: gebruik een bordenwisser op whiteboard bij activeren voorkennis.

3. Activeren: magnetisme is kracht op afstand, ken je nog een andere kracht die op afstand werkt?

4. Practicummaterialen: een inclinatiernaald zou niet alleen inzicht geven in de werking van een gewoon kompas, maar ook de inclinatie van het aardmagnetisch veld ten opzichte van het aardoppervlak.

5. Verder zijn grote paperclips veel duidelijker om magnetische influentie mee te demonstreren, dan kleine nietjes. Leerlingen zelf laten ervaren.

N1. Neem ook de zelfwerkfase op. Daar kunnen zo maar ineens interessante en verrassende vragen uitkomen (bij volgende lessen uit deze lessenserie heb ik dat gelijk toegepast.)

### Aandachtspunten uit les 2

N2. Het is leuk om terug te zien en tijdens het analyseren te realiseren dat alleen al door het bondig formuleren van wat er in de les gebeurt de stof voor mezelf nog scherper wordt.

N3. Door de stiltes tijdens het werken nu wel integraal op te nemen, kwamen inderdaad twee vragen langs, waaruit blijkt dat de leerling de uitleg niet in 1x helemaal verwerkt heeft en deze fase dus net zo essentieel is bij de begripontwikkeling.

6. Helaas lukte het bij deze opstelling niet om de proef te doen slagen. Het gebruik van een video van de proef is een flinke verbetering ten opzichte van alleen de plaatjes uit het boek en zelf op een whiteboard te tekenen is. Filmpje magnetisch veld om een stroomvoerende draad werkte goed.

7. Een spoel als elektromagneet moet mogelijk zijn om eenvoudig te realiseren. Een demo zou leerling eerder overtuigen. Een stroomdraad dat tot spoeltje wikkelen en dan met een kompasnaald het B-veld laten zien. (Conceptuele kennis ontwikkelen).

N4. Stel vaker vragen aan leerlingen in plaats van dingen gelijk uit te leggen. Dat is vanuit m'n enthousiasme soms toch een valkuil.

N5.. Bij de opgave over spoelen en de richting van de stroom kunnen een links- en rechts-gewikkelde spoel en een spanningsbron de hypothese als antwoord bij de vraag bevestigen.

8. Voor het demonstreren van een relais zonder deze fysiek in bezit te hebben, moet het mogelijk zijn een demoproef op YouTube te vinden.

### Aandachtspunten uit les 3

N6. Vraag 24a is onjuist geformuleerd: 'bevindt' zou moeten zijn 'zweeft'. Er werkt alleen zwaartekracht (= netto kracht) en zweven is dan onmogelijk.

N7. Vraag zoveel mogelijk de leerlingen om de eerste uitleg te geven. Vul daarna pas aan.

9. Een proefopstelling met parallelle stroomvoerende draden om de lorentzkracht te demonstreren zou toch te realiseren moeten zijn.

N8. Het gebruik van een duidelijke video opname van een proef is een redelijk alternatief voor een fysieke demonstratieproef of een applet.

10. Drie dimensionaal kunnen zien en denken draagt bij aan begrip van met name de linkerhandregel en het koppelen ervan aan de context van opgaven.

11. Welke weergave is handig 3D aanzicht of twee assen in het vlak van het papier en de derde daar loodrecht op. Voor een eigen schets bij de analyse van de opgave is een die twee het eenvoudigst te tekenen. Wanneer de opgave zelf al een weergave heeft is het handiger daarbij aan te sluiten.

#### **Aandachtspunten uit les 4**

12. Docent had beter kunnen vragen welke kracht het projectiel lanceert bij opgave 32.

N9. Wiskundig benaderen en via formules vinden welke grootheden en constanten je nog nodig hebt voor het uitrekenen van het antwoord. Wiskunde is nuttig gereedschap om te gebruiken om tot de oplossing te komen.

N10. Leerlingen trainen op inzicht, zodat ze herkennen waar de vraag over gaat. Vervolgens niet meer twijfelen maar uitvoeren van het proces om tot een antwoord te komen. Twijfelen kost alleen maar kostbare tijd.

13. cirkelbaan is nog niet behandeld in periode 2 door de pulsar boeken te volgen. Dat maakt dat hij bij een geladen deeltje toch even aangehaald moet worden. Is het niet handiger de cirkelbaan al in periode 1 te behandelen?

4.5 Zonder ruimtelijk inzicht in de context is het niet echt mogelijk opgave goed 33 goed te doorgronden. Door samen de 3D-weergave te ontdekken, komt de leerling uiteindelijk wel verder. Maar een complex geheel als het schrijven van één beeldje op een elektronenstraalbuis is voor deze leerling als eerste kennismaking echt te complex. Misschien dat het met meer lessen beter gaat, maar die zijn er bij Luzac niet in het versnelde programma.

#### **Aandachtspunten uit les 5**

N11. Vijf lessen van 60 minuten, met vier lessen per week en vaak ook nog twee op dezelfde dag blijft een hele uitdaging om zo'n complex onderwerp te behandelen in het versnelde examenjaar bij Luzac.

14. Uitleg in woorden, hoe juist ook, komt veel minder over dan aan de hand van een situatieschets die ter plekke gemaakt wordt, zodat de leerling hem ziet ontstaan.

N12. Nieuwe kennis kan alleen aanslaan bij voldoende voorkennis. Onderzoeken wat de voorkennis is en afhankelijk daarvan de les aanpassen. Voorbereid zijn qua vaardigheden en hulpmiddelen op interactief daarop inspringen en toch de lesdoelen aanhouden.

N13. Met name HTML5-applets zijn erg handig om direct in een les een simulatie van een experiment te laten zien. Zelf heb ik gesynchroniseerde bookmarks via Google Chrome naar applets die voor mij in de lessen goed werken. Het voordeel van HTML5 is dat die in elke browser en op elk platform werken.

N14. Leerlingen mogen (moeten) bij docent altijd hun vraag stellen, ook tijdens uitleg. Zo weet de docent beter wat er nodig is bij de leerlingen, komen misconcepten die bij leerlingen leven of ontstaan eerder boven water net als een eventuele fout gemaakt door de docent. Daarnaast denken

de leerlingen dat hardop mee met de uitleg. Juist bij de kleine klassen van Luzac is deze werkvorm vaak te gebruiken.

15. BINAS gebruikt een formule met  $\Phi = B_{\perp} \cdot A = B \cdot A \cdot \cos\alpha$  waarbij de  $\alpha$  de hoek met de normaal is. Daarmee wordt het een kunstje met het risico dat ze niet inzien dat deze formule alleen bij een specifieke hoek hoort (tussen B-veld en normaal) met grote kans dat wanneer de andere hoek gegeven wordt de leerling dit niet inziet. Zelf leer ik ze liever zelf de ontbinding te maken om vervolgens te bepalen of sinus of cosinus gebruikt moet worden.

### 8.3 AANDACHTSPUNTEN UIT EERSTE LESSENSERIE PER ONTWERPEIS

Het doel van deze matrix is om de aandachtspunten gevonden in de videoanalyse van de vijf lessen uit de eerste lessenserie in te delen om terug te laten komen in de vier lessen van de tweede lessenserie. Een aantal aandachtspunten is niet verder meegenomen in dit onderzoek en de reden daarvan staat in de toelichting in onderstaande tabel. Voor de aandachtspunten die wel terugkomen is een indeling gemaakt of ze betrekking hebben op ontwerp D of ontwerp E.

Ontwerpeis D. *De lessenserie moet adresseren dat het zelf ervaren door leerlingen van natuurkundige concepten een belangrijk aspect is bij het verkrijgen van conceptueel begrip over elektromagnetisme.*

Ontwerpeis E. *Voor het leren begrijpen van de concepten bij elektromagnetisme moet de lessenserie de wiskundige vaardigheden en het ruimtelijk inzicht die daarvoor nodig zijn, overbrengen.*

Tabel 3

Aandachtspunten uit videoanalyse eerste lessenserie.	Ontwerpeis D	Ontwerpeis E	Niet verder meegenomen	Toelichting op niet verder meenemen in deze ontwerpstudie.
<b>Les 1 - Magneetvelden</b>				
1. Permanente magneet laten ervaren	X			
2. Bordenwisser op whiteboard	X			
3. Voorkennis activeren van andere krachten op afstand	X			
4. Inclinatiemaat gebruiken	X			
5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes	X			
N1. Vaker een zelfwerkfase inbouwen			X	Luzac specifieke uitdaging met weinig vaklessen. Dit gebeurt ook in de studie-uren.
<b>Les 2 - Elektromagneten</b>				
N2. Bondiger formuleren bij uitleggen			X	Algemene didactiekverbetering
N3. Zelfwerkfase ook opnemen			X	Techniek video-opnames
6. Magneetveld rond draad demonstreren met video	X			
7. Spoel als magneet gebruiken	X			
N4. Stel vragen aan leerlingen			X	Algemene didactiekverbetering
N5. Antwoord hypothese bevestigen bij één specifieke vraag			X	Algemene didactiekverbetering
8. Relais demonstreren met video	X			
<b>Les 3 - Lorentzkracht op draad</b>				
N6. Vraag 24a staat onjuist geformuleerd in het boek			X	Heeft betrekking op lesmethode
N7. Leerling eerst vragen om zelf uit te leggen, dan pas zelf aanvullen			X	Algemene didactiekverbetering

Aandachtspunten uit videoanalyse eerste lessenserie.	Ontwerpis D	Ontwerpis E	Niet verder meegenomen	Toelichting op niet verder meenemen in deze ontwerpstudie.
9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video	X			
N8. Het gebruik van applets of video's i.p.v. demoproeven			X	Te algemeen geformuleerd. Enkele contexten komen terug bij andere aandachtspunten.
10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)		X		
11. Verschillende driedimensionale representaties benoemen		X		
<b>Les 4 - Lorentzkracht op deeltje</b>				
12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?		X		
N9. Wiskundig gebruik van formules			X	Hoewel vaak nodig in lesgroepen, hier niet specifiek verder onderzocht.
N10. Leerling trainen op inzicht en minder twijfelen			X	Algemene didactiekverbetering
13. Cirkelbaan behandelen bij lorentzkracht op geladen deeltje	X			
<b>Les 5 - Inductie</b>				
N11. Omgaan met uitdagingen in het versnelde examenjaar			X	Luzac specifieke uitdaging, komt soms terug bij lesplannen en -observaties
<b>14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg</b>		X		
N12. Les waar mogelijk interactief aanpassen op aanwezig voorkennis			X	Luzac specifieke mogelijkheid, komt wel terug bij lesplannen en -observaties
N13. Het gebruik van applets			X	Dit zou een onderzoek op zich zijn
N14. Leerlingen mogen direct hun vraag stellen tijdens uitleg			X	Luzac specifieke mogelijkheid, komt soms wel terug bij lesplannen en -observaties
15. Zelf vectoren ontbinden met de formule $\Phi = B_{\perp} \cdot A$ in plaats van met de formule in BINAS		X		
16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning		X		

## 8.4 LESPLANNEN EN ANALYSE VAN TWEEDE LESSENSERIE

Deze tweede lessenserie is ontworpen om elektromagnetisme in vier lessen van 60 minuten te geven in een versneld examenjaar zoals bij Luzac. Daarbij heb ik verbeteringen vanuit de literatuur voor de geselecteerde aandachtspunten uit de eerste lessenserie verwerkt.

Echter, omdat ik de week voor het geven van de lessen ziek was en de leerlingen het huiswerk alvast zelf bestudeerden volgens de studieplanner, heb ik met name de eerste twee lessen aangepast. Dat kon goed, mede omdat de leerlingen op maandag tussen les 1 en les 2 in de studiezaal een studie-uur hadden en dat gebruikten voor het maken van werkingsopdrachten uit de eerste les. In les 1 heb ik veel meer onderwerpen behandelt dan het oorspronkelijke plan. Omdat die stof bij het begin van les 2 al grotendeels verwerkt was, kon ik in les 2 ook verder komen dan vooraf gepland.

De oorspronkelijk geplande lessenserie is aan het eind van deze bijlage opgenomen voor eventueel toekomstig gebruik.



## Lesplan les 1

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen gaan zitten en leggen hun spullen voor de les klaar.
5 – 15	Afsluiten vorig domein (Informatieoverdracht), huiswerkcontrole, eventuele vragen daarbij centraal bespreken en herhalen leerdoelen vorige les middels OLG. Door de kleine klasomvang is dit veelal goed aan te passen op de behoeften individuele leerlingen.	Docent controleert het huiswerk en vraagt daarbij naar eventuele problemen met huiswerkopgaven en leerstof. De genoemde problemen worden centraal met de groep besproken. Daarbij herhaalt de docent de leerdoelen van de vorige les middels een OLG.	Bij huiswerk controle kan de leerling vragen stellen. Weer centraal nemen leerlingen deel aan het OLG.
15 – 20	Voorkennis activeren over magnetisme. - Wat weten jullie van magnetisme? - Welke magnetische verschijnselen kennen jullie? - Welke andere krachten die op afstand werken kennen jullie (3)?	Voorkennis wordt geactiveerd middels OLG. Docent stelt vragen en stimuleert discussie.	Leerlingen geven antwoord, en gaan onder voorzitterschap van docent met elkaar in groepsdiscussie.
20 – 30	Demonstratie met bordenwisser op whiteboard (2) en paperclips (5). Instructie nieuwe stof a.d.h.v. het boek over permanente magneten (1.) en magnetische influentie. Enkele demonstraties met magneetkoffer en inclinatieaald (4).	Docent demonstreert magnetisme met de bordenwisser en ligt de basisbegrippen toe. Docent demonstreert magnetische influentie met de bordenwisser en paperclips. Docent demonstreert met de magneetkoffer en gebruikt de inclinatieaald als kompas. Docent vraagt de leerlingen in welke richting het noorden ligt en controleert dat samen met ze met Google Maps en de inclinatieaald. Docent vraagt of dit klopt bij de stand van de zon.	Leerlingen kijken toe en stellen spontaan hun vragen, dus zonder hand opsteken. Leerlingen hebben hun boek open op de juiste bladzijde. Leerlingen luisteren actief en denken hardop mee over waar het noorden ligt en hoe dat te vinden. Leerlingen ervaren dat kompasnaald met noordpool naar het geografische noorden wijst.
30 – 40	Leerlingen krijgen korte instructie van opdrachten die ze met magneetkoffer kunnen doen. Daarna kunnen ze nog vrij verder experimenteren, bijvoorbeeld het effect van de afstand van een magneet tot de inclinatieaald.	Docent begeleidt leerlingen bij onderzoekend leren van magnetische fenomenen. Docent loopt rond met de inclinatieaald als kompas en laat per tafel van 2 leerlingen zien dat het kompas het totale magneetveld van aarde en hun magneet aanwijst door afstand tot de magneet te variëren.	Leerlingen onderzoeken de werking van magneten uit de magneetkoffer. Eén van de magneten kan roteren op tafel als een magneet. Leerlingen onderzoeken ook vrij en stellen spontaan hun vragen. Dit kan vanwege de kleine klasomvang. Enkele magneetstaven zijn gebroken, daarmee is goed te onderzoeken dat die delen zelf ook weer dipool zijn.

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
40 – 45	Aardmagnetisch veld uitleggen en demonstreren met inclinatie-naald. Toelichten dat een kompas alleen de horizontale component laat zien ervan laat zien. Leerlingen hierbij zelf laten ontdekken dat magnetische zuidpool zich op de geografische noordpool bevindt.	Docent tekent magnetisch veld van permanente magneet. Legt daarbij verband tussen richting magneetveld en richting kompasnaald. Docent tekent aarde met z'n magneetveld en gebruikt een kompasnaald bij z'n uitleg om te bepalen waar magnetische polen liggen middels OLG. Docent laat zien dat het aardmagnetisch veld een hoek met de horizontaal maakt met de inclinatie-naald en tekent dit ook op het bord met vectoren.	Leerlingen luisteren actief en mogen vragen stellen door de uitleg heen. Dit kan vanwege de kleine klasomvang. Als het goed is ontdekken leerlingen in dit OLG dat de magnetische zuidpool zich op de geografische noordpool bevindt. Leerling zien in dat de inclinatie van het magnetisch veld van de aarde op onze breedtegraad rond de 65 graden ligt.
45 - 55	Magnetisch veld rond stroomvoerende draad I(6), de werking van een spoel als elektromagneet (7) en de toepassing daarvan in een relais (8).	Docent legt uit dat om een stroomvoerende draad een magnetisch veld ontstaat, laat dit zien middels een video van een experiment (MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire, 2008) en legt uit dat de richting ervan met de rechterhandregel te bepalen is. Docent tekent een draad op het bord met een stroomrichting en vraagt leerlingen de richting van het B-veld te bepalen. Docent schetst op het bord wat er met het magneetveld gebeurt wanneer de draad opgewikkeld wordt tot een spoel en hoe in deze situatie de richting van het B-veld te bepalen is met de rechterhandregel. Docent maakt een nieuwe schets en vraagt de leerlingen de richting van het B-veld te bepalen. Docent benoemt de toepassing van een elektromagneet in een relais en loopt daarmee vooruit op een vraag uit de huiswerkopgaven.	Leerlingen mogen interrumpen zonder handopsteken (dat kan prima in de kleine lesgroepen bij Luzac). Leerlingen doen actief mee bij opdrachten van de docent.
55 - 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen in de vorm van een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerling neemt deel aan OLG, noteert huiswerk en ruimt spullen op.

## **Uitgewerkte aandachtspunten voorafgaand aan les 1**

### **1. Permanente magneet laten ervaren**

In deze fase gaan de leerlingen in tweetallen zelf experimenteren met magneten uit de magneetkoffer. Laat ze zelf ervaren wanneer ze elkaar aantrekken en afstoten en of dat sterker of zwakker wordt met de afstand. Eén magneet is draaibaar op tafel en te richten met een andere magneet.

Geef ze vervolgens per tweetal twee grote paperclips om ook het concept van magnetische influentie te onderzoeken.

Teken tot slot op het whiteboard het magnetische veld bij een permanente magneet en benoem daarbij dat het veld buiten de magneet van de Z- naar de N-pool gaat. Een kompasnaald de wijst met z'n N-pool in de richting van dit veld. Teken nu aan beide kanten een stuk ijzer en beredeneer met de leerlingen hoe dat gemagnetiseerd wordt. Als het goed is, is de conclusie dat het ijzer daarna aan beide zijden wordt aangetrokken. Een magneet trekt ijzer altijd aan (Millar, 2010).

### **3. Andere krachten op afstand**

Algemeen verhaal over krachten en met name die op afstand werken, nodig voor begrip magnetische kracht en het daaruit volgende magnetische veld en activeren voorkennis over magnetisme.

Vraag leerlingen naar wat ze al weten over magnetisme en magneten. Meestal komt er wel iets van tegengestelde polen die elkaar afstoten (soms met plus en min) en andersom. Laat vervolgens met twee magneten uit de magneetkoffer zien dat tegengestelde polen elkaar aantrekken en dat gelijke polen elkaar afstoten.

Vraag leerlingen of ze andere krachten dan magnetische kracht kennen die op afstand werken en of ze daar voorbeelden bij weten. Meestal komen ze met zwaartekracht en/of elektrische kracht. Bevestig de juiste elementen daaruit en benoem daarbij dat krachten over het algemeen kleiner wordt naarmate de afstand groter wordt (Arons, 1997) (Kirschner et al., 2018).

### **2. Bordenwisser op whiteboard**

Demonstreer dat de bordenwisser op het whiteboard blijft plakken en vraag de leerlingen om dat te verklaren. Benoem vervolgens dat er ijzer achter het bord zit en vraag nogmaals waarom er een aantrekkende kracht is als er maar één magneet is. Leg vervolgens het begrip magnetische influentie uit met behulp van illustraties uit pulsar en dat met name ijzer en nikkel goed te magnetiseren zijn (Berg & Bruning, 1994).

### **5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes**

Demonstreer met een bordenwisser en twee paperclips dat het inderdaad mogelijk is om ijzer zelf ook magnetisch te maken. Laat ook zien dat ijzer weer demagnetiseert door de bordenwisser van de bovenste paperclip te halen. Met grote paperclips is dat veel eenvoudiger om duidelijk te demonstreren dan met nietjes (Berg & Bruning, 1994).

### **4. Inclinatiennaald gebruiken**

Bij het aanschaffen van kompasjes zag ik dat er ook betaalbare inclinatiennaalden zijn en heb ik daarvoor gekozen omdat die meer mogelijkheden biedt. Dit is een extra element om het concept magnetische velden verder uit te bouwen en de verbinding te leggen met het aardmagnetisch veld. Draai de inclinatiennaald eerst in horizontale positie om als kompas te kunnen gebruiken. Vraag

waarom de naald een vaste kant op wijst. Bepaal vervolgens samen met de leerlingen of deze richting inderdaad met het noorden overeenkomt. Gebruik hierbij bijvoorbeeld Google Maps om te ligging van het gebouw en lokaal te bepalen. Loop er vervolgens mee langs bij de leerlingen en laat ze met hun magneten de richting ervan beïnvloeden. Varieer hierbij de afstand en laat zien dat de inclinatie naald de richting van het veld van de aarde en dat van hun magneet samen weergeeft.

Teken nu op het whiteboard de aarde met daarbij het magnetische veld (laat het veld rond de permanente magneet staan). Beredeneer vervolgens samen met de leerlingen wat de richting van dat het aardmagnetisch veld moet zijn en laat ze als het even kan zelf ontdekken dat de magnetische Z-pool zich op de geografische noordpool bevindt.

Laat zien dat de magnetische veldlijnen een flinke hoek (ca. 65 graden) met het aardoppervlak maken. Teken hiervan een zijaanzicht en draai vervolgens de inclinatie naald 90 graden om z'n as en richt hem op het noorden. Als het goed is, wijst de inclinatie nu het de richting hele aardmagnetische veld aan. Leg uit de een kompas alleen de horizontale component van het aardmagnetisch veld gebruikt (Millar, 2010).

## 6. Magneetveld rond draad demonstreren met video

Om tijd te winnen gebruik ik een afbeelding uit de methode en een video van een experiment (Magnetic Field of a Wire, 2018). Docent introduceert hierbij de rechterhandregel voor het verband tussen de richting van de stroomsterkte door de draad en het circulaire magneetveld dat daaromheen ontstaat (Kortland et al., 2017).

## 7. Spoel als magneet gebruiken

Middels een schets op het bord beredeneert de docent samen met de leerlingen van de richting van het B-veld bij een enkele winding zal zijn en breidt vervolgens die redeneringen uit naar een spoel die bestaat uit meerdere windingen. Docent legt uit hoe de rechterhandregel in deze context te gebruiken is voor het verband tussen richting B-veld en richting stroomsterkte door de windingen van de spoel. Docent legt uit dat bij 6 en 7 de duim van de rechterhand de richting aangeeft van de vector die rechtuit gaat (stroomsterkte respectievelijk magnetische veldsterkte) en de gekromde vingers van de rechterhand de circulaire vector (magnetische veldsterkte respectievelijk stroomsterkte) (Arons, 1997).

## Videoanalyse les 1

0 – 12 Lesintroductie en afronden vorig onderwerp.

De vorige twee lessen waren door ziekte van mij uitgevallen. Het laatste huiswerk was het maken van een tussentoets over Trillingen en Golven, dus de eerste paar minuten gingen naar het innemen daarvan. Verder zijn er net twee leerlingen bijgekomen in de lesgroep die ingestroomd zijn. Beiden moeten het SE1 (VWO 4<sup>e</sup> klas stof), net als Trillingen en Golven en hadden hun boeken nog niet. Gelukkig hadden de meeste leerlingen de studiewijzer gevolgd en de eerste paragraaf al bestudeerd (over Magnetisme) en opgaven gemaakt. **Er kwam ook gelijk een vraag over de linkerhandregel van een leerling die al vooruitgelezen had.** Daar ging ik kort op in door te benoemen dat het een hulpmiddel is om te vinden hoe  $F$  (kracht),  $B$  (magnetische veldsterkte) en  $I$  (stroomsterkte) in 3D loodrecht op elkaar staan.

12 – 15 Voorkennis magnetisme activeren.

**Dezelfde leerling van de lorentzkrachtvraag benoemt gelijk dat de aarde een magnetisch veld heeft.**

Verder worden bij doorvragen naar andere verschijnselen genoemd: de sluiting van een tas, een kompas, het draadloos opladen van een smartwatch en het fixeren ervan op de oplader en als laatste magneetjes op het whiteboard. *3. krachten op afstand* later in de les behandeld.

15 - 23 Introductie Magnetisme en experimenteren

**Omdat de leerlingen zo enthousiast waren hebben ik vrij snel in deze fase per tweetal de magneetkoffers uitgedeeld.** Docent benoemt daarbij dat magnetische kracht een kracht is die op afstand werkt, dat gelijke polen elkaar afstoten en tegengestelde elkaar aantrekken en dat de magneten in de koffer allemaal permanente magneten (1. Permanente magneet) zijn.

Om magnetische influentie van ijzer te demonstreren gebruik ik grote paperclips (5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes) en laat zien dat die elkaar niet aantrekken. Wel worden ze door beide polen door een permanente magneet worden aangetrokken en trekt een gemagnetiseerde paperclip een tweede aan. **Een leerling vraagt of ijzer altijd magneten aantrekt.** Docent legt uit dat dat eigenlijk andersom is en waarom. **Leerlingen kijken aandachtig en gaan het dan zelf ook uitproberen met twee paperclips.** Vervolgens demonstreer de docente *2. Bordenwisser op whiteboard* en ligt daarbij toe dat achterop het whiteboard een dunne laag ijzer zit die gemagnetiseerd wordt. Door te laten zien dat een paperclip niet aan het whiteboard blijft plakken, kan dat whiteboard niet zelf magnetisch zijn. **Leerlingen zijn vrij stil en zijn ondertussen nog bezig met de magneten en paperclips.**

Docent maakt de stap naar *3. krachten op afstand*, benoemt dat magnetische kracht op afstand werkt en vraagt of leerlingen nog andere krachten kent die op afstand werken. Het blijft stil. De docent springt in de lucht en benoemt dat hij nog steeds door de aarde wordt aangetrokken. O, zwaartekracht zegt een leerling. Docent benoemt dat die kracht op afstand kleiner wordt, net als magnetische kracht.

Voor het klassikale deel was het handiger geweest om de magneetkoffers wat later uit te delen, omdat daar gelijk veel aandacht en enthousiasme naar uit ging. **Aan de andere kant konden de leerlingen hiermee leren uit ervaren en waren ze erg enthousiast.**

23 – 30 Magnetische velden

Docent introduceert het concept van magnetische velden door een permanente magneet op het whiteboard te tekenen met daarbij de veldlijnen buiten de magneet van noord naar zuid en benadrukt dat deze de richting van de magnetische kracht aangeven op bijvoorbeeld een

kompasnaald. In de magneetkoffer zit een magneet die draaibaar is op tafel en docent vraagt de leerlingen deze op tafel te plaatsen zonder andere magneten in de buurt. Een leerling benoemt dat deze dan naar het noorden wijzen en de docent vraagt de klas te bedenken of dit kan kloppen. Een leerling wijst goed in de richting van het noorden en leidt dat af aan de ligging van Lemmer ten opzichte van de school. Docent benoemt dat ook de zon gebruikt kan worden ter controle. Leerlingen ontdekken dat dat vrij goed overeen komt met de observatie van de eerste leerling. Best wel cool, zegt een leerling vooraan.

Helaas staat 4. *Inclinatiennaald* buiten beeld van de camera. Docent laat zien dat deze ook in de richting van het noorden wijst en dat die richting te beïnvloeden is met een permanente magneet. De inclinatiennaald wijst de richting van het gezamenlijk magnetisch veld aan en laat dit zien door de magneet dichterbij en verder weg te houden.

Een leerling vraagt ineens of het rode de plus of de min kant is. Docent benoemt dat bij magneten de afspraak is dat de kant die naar het geografische noorden wijst de noordpool is en die meestal rood is. Een magneet heeft ook altijd twee polen, in tegenstelling tot een geladen voorwerp dat positief of negatief geladen kan zijn. Enkele staafmagneten uit de magneetkoffers zijn gebroken en daarmee demonstreert de docent dat beide helften ieder een noord en een zuidpool hebben. De leerlingen doen gelijk mee met de magneetkoffer. Een leerling legt spontaan uit hoe dat komt: het materiaal in een permanente magneet heeft dezelfde magnetische richting en die verandert niet door de staaf te breken.

### 30 - 38 Aardmagnetisch veld

Docent tekent de aarde en z'n magnetisch veld met daarbij een kompasje dat naar het noorden wijst met z'n noordpool. Docent tekent er vervolgens een permanente magneet naast met dezelfde oriëntatie met daarbij de veldlijnen en een kompasje en vraagt welke kant daarvan de noordpool is. Leerlingen komen unaniem met "onderaan". Docent maakt de stap terug naar de aarde en geeft aan dat dat daar hetzelfde is. Na enig gesputter zien de leerlingen in dat inderdaad de magnetische noordpool zich wel op de zuidpool moet bevinden (en omgekeerd). "O, dus de noordpool is een magnetische zuidpool" merkt een leerling op en stelt vervolgens dat de veldlijnen in de aarde dan ook van magnetische zuid- naar noordpool lopen (geografisch van noordpool naar zuidpool). Docent bevestigt dat dat in alle magneten geldt ook in elektromagneten (die later volgen).

Docent legt vervolgens nog uit dat de veldlijnen schuin de aarde in gericht zijn en bij ons een hoek van ongeveer 70 graden met het aardoppervlak maken en laat dat zien met de gedraaide 4. *Inclinatiennaald*. Leerlingen zijn stil. Docent benoemt ook nog dat de magnetische polen van de aarde zich niet precies op de geografische polen bevinden merkbaar bewegen en vraagt of leerlingen dat wisten. Een leerling geeft aan dat dat ook in het boek staat. Docent geeft nog aan dat dat op onze breedtegraad een kleine afwijking geeft en dat die afwijking dichterbij de noordpool steeds groter wordt. Docent neemt de magneetkoffers en paperclips weer in, om naar de zelfwerkfase over te gaan.

Een leerling sputtert nog wat over de gewisselde magnetische polen en haar buurvrouw geeft aan dat je sommige dingen gewoon moet aannemen. Dat zijn ook precies de woorden die ik na m'n uitleg gebruikte om nog meer aanvaarding te bereiken. Docent herhaalt in een OLG vorm met de vraagsteller de redenering om tot een magnetische zuidpool op de noordpool te komen. De leerling heeft er duidelijk nog moeite mee om het te bevatten, ook al kan ze alle stapjes van de redenering volgen en ook zelf bedenken.

Vanwege de gemiste lessen en omdat de leerlingen zelf de beide paragrafen al hadden bestudeert en de uitleg met ervaring aan de hand van demo-proefjes en zelf ervaren goed werkte, ging ik nog verder met elektromagnetisme. Het verwerken door middel van het maken van opdrachten gebeurt bij Luzac vaak ook voor een flink deel in de studiezaal. Dat is niet ideaal, maar moet vaak wel vanwege het versnelde examenjaar met alle examenstof.

Docent laat zien aan de hand van illustraties uit het boek en een schets op het whiteboard dat om een rechte stroomvoerende draad een circulair magnetisch veld ontstaat dat met kompasnaaldjes of ijzervijlsel te visualiseren is. Voor de richting van de magnetisch veld zijn in principe twee richting mogelijk en om de juiste richting van het B-veld passend bij de stroomrichting te vinden, kan de rechterhandregel gebruikt worden. Bij deze uitleg introduceert docent ook de conventie van vectoren het bord in en uit en dat dit één van de manieren is om drie dimensies weer te geven

(*zie opmerking*). X- en Y-as in het vlak van het bord (horizontaal en verticaal) en de Z-richting daar loodrecht op middels de tekenconventie. Docent tekent vervolgens een horizontaal draad met daarbij de richting van het B-veld er omheen en vraagt de leerlingen om met het geleerde de richting van de stroom te bepalen. **Leerlingen vinden direct vrijwel allemaal dezelfde juiste richting van I.**

Docent maakt de stap naar een gewikkelde draad (spoel) en dat daarbij de richting van het B-veld in de spoel dan overal dezelfde richting heeft en dat dit als een magneet werkt (elektromagneet). **Een leerlinge begint nu over opgave 21 en dat ze niet begreep en krijgt direct bijval van haar buurvrouw.**

Docent benoemt dat het vaak lastig te zien is aan een tekening of foto wat de richting van de windingen bij een spoel is (*zie opmerking*) en geeft aan eerst de rechterhandregel voor een spoel uit te leggen voordat hij op de vraag over opgave 21 in gaat. **Leerling vat samen dat de rechterhandregel bij een elektromagneet omgekeerd werkt in vergelijking met het magneetveld rond een stroomvoerende draad.** Docent bevestigt deze bevinding en benoemt dat je duim de richting aangeeft van hetgeen rechtdoor gaat (I of B) en je vingers dat wat eromheen draait (B of I).

Docent schetst op het whiteboard een spoel met tegengestelde windingsrichting als het boek en stroomrichting tegengesteld door de spanningsbron om te keren. Docent vraagt de leerlingen de richting van het B-veld te bepalen. **Na even afwachten beginnen de leerlingen hardop te denken met hun rechterhand erbij voor de rechterhandregel. Er komt niet echt een duidelijk antwoord.** Docent tekent de richting van de stroom en onmiddellijk vraagt een leerling hoe je dat weet. Docent benoemt dat (zoals geleerd bij elektriciteit) stroom van plus naar min loopt en dat de lange poot van de spanningsbron altijd de plus-kant is. **Diezelfde leerling doet vervolgens enthousiast mee met haar linkerhand en omdat ontdekt dat zelf omdat ze de tegengestelde richting van docent vindt.**

Docent tekent vervolgens bij de elektromagneet (spoel) de veldlijnen die buitenom terug lopen en vraagt de leerlingen waar zich de Noordpool van deze elektromagneet bevindt. **Een leerling achterin die nog niet veel gezegd heeft, geeft de juist plek aan.** Omdat er verder geen vragen meer zijn, gaat docent terug naar de eerdere vraag over opgave 21 en zet deze op de smart-tv. Samen met de leerlingen bepaalt hij de richting van de stroom aan de hand van de spanningsbron en tekent deze over het boek op de smart-tv. **De leerling die zo met de opgave geworsteld hebben zien gelijk wat de richting van B moet zijn (*zie opmerking*) en beredeneert vervolgens wat er gebeuren zou bij omwisselen van de plus en min van de spanningsbron.** Docent tekent dit mee over het boek op de smart-tv en checkt tenslotte bij alle leerlingen individueel of het allemaal of er nog vragen zijn.

Ter afronding vraagt docent hoe het B-veld van een elektromagneet te vergroten is. Een leerling benoemt het vergroten van de stroomsterkte. Verder komt er niets en docent vult aan dat ook meer windingen het B-veld versterken. **De enthousiaste leerling vooraan noemt dat er ook 'iets met ijzer' gebruikt wordt.** Docent bevestigt dat en legt uit dat ijzer in de elektromagneet gemagnetiseerd wordt (influentie) in dezelfde richting en dat dus het magneetveld versterkt.

*Opmerking:*

*Bij het analyseren van deze les fase realiseer ik me dat ook hier de 3D weergave voor veel leerlingen lastig is. Met name om in te zien welke richting de windingen van een spoel hebben en wat vervolgens de richting van de stroom is om de spoel heen. Zodra dat inzicht er is, is het toepassen van de rechterhandregel geen enkel probleem. Andersom, de richting van het B-veld vinden om een draad met de rechterhandregel is niet moeilijk. De conventie met vectoren het bord in of uit is niet bekend uit de wiskunde en wel gelijk al nodig. Ik had uit de eerste lessenserie waargenomen dat dit vooral bij de lorentzkracht speelt met de linkerhandregel, maar dat blijkt al eerder van pas te komen.*

55 – 60 Lesafsluiting

Docent rond de les af met een samenvatting van de lesstof en geeft aan dat in het komende studieuur (blok 6) en de volgende vakles (blok 7) tijd beschikbaar is voor het maken van verwerkingsopgaven. Deze werkvorm is afhankelijk van het roosters soms mogelijk bij Luzac en biedt flexibiliteit om soms in de ene les meer informatie te brengen en die in de volgende les te laten verwerken. In het rooster van deze lesgroep komt het toevallig zo uit dat de leerlingen een deel van het studieuur tussen de lessen tijd hebben om de stof te verwerken middels het maken van opgaven.



## Bevindingen op aandachtspunten na videoanalyse van Les 1

### 1. Permanente magneet laten ervaren

Leerlingen gaan enthousiast aan de slag met de magneten uit de koffer. Weliswaar volgen ze de opdracht niet precies, maar ze proberen van alles uit. Bijvoorbeeld door twee magneten met gelijke polen tegen elkaar aan te duwen op tafel en er eentje proberen 'weg te schieten' en de draaibare magneet met een staafmagneet zo snel mogelijk rondjes te laten draaien. Praktische vaardigheden, kwalitatief onderzoek, leiden tot meer conceptueel begrip (Millar, 2010).

### 3. Andere krachten op afstand

Zwaartekracht wordt direct herkend als andere kracht op afstand. Magnetische kracht werkt merkbaar sterker bij korte afstand. Deze voorkennis kon in enkele woorden geactiveerd worden, net als elektrische aantrekking tussen een geweven (en dus geladen) ballon en lange haren. (Arons, 1997) en (Kirschner et al., 2018).

### 2. Bordenwisser op whiteboard

Mede door hetgeen zelf al ervaren is bij aandachtspunt 1., zien leerlingen sneller in dat de magneet in de bordenwisser de ijzeren plaat achter het whiteboard magnetiseert en dus blijft plakken. Dat een paperclip vervolgens niet aan het whiteboard blijft plakken vinden ze dan ook logisch. Een eenvoudig en snel uit te voeren proefje als dit, met in elke les beschikbare materialen een bordenwisser, paperclip en whiteboard, leidt inderdaad tot meer conceptueel begrip (Berg & Bruning, 1994).

### 5. Paperclips gebruiken in plaats van nietjes

Leerlingen kunnen snel en eenvoudig met een magneet en enkele grote paperclips zelf experimenteren met magnetische influentie. Zo ervaren ze zelf wat dat de docent bij de uitleg al heeft laten zien (Berg & Bruning, 1994).

### 4. Inclinatiennaald gebruiken

Door de inclinatiennaald als kompas te gebruiken om het noorden te vinden en dit de koppelen aan de richting ten opzichte van het schoolgebouw, zoals die bijvoorbeeld met Google Maps gevonden wordt, ervaren de leerlingen hoe een kompas eigenlijk werkt en gebruikt kan worden. Leerlingen doorzien daarna beter het verband met de aarde als magneet met een magnetische zuidpool op de noordpool. Ze maken nu ook de koppeling met de veldlijnen die buiten een magneet van de noordpool naar de zuidpool wijzen en een kompasnaald die in met z'n noordpool in de richting van de veldlijnen gaat staan.

Door de inclinatiennaald 90 graden te draaien en naar het gevonden noorden te wijzen is eenvoudig te demonstreren dat het aardmagnetisch veld een sterke inclinatie heeft. Die ervaring helpt leerlingen om opgaven over deze context te maken.

Praktische ervaringen door leerlingen blijken een effectieve bijdrage te leveren aan het leerproces van leerlingen (Millar, 2010).

### 6. Magneetveld rond draad demonstreren met video

Leerlingen zien in enkele minuten dat het ijzervijlsel op de perspex plaat inderdaad cirkels rond de stroomvoerende draad vormen. Vervolgens stellen ze er vragen over en kunnen ze de uitleg volgen dat het ijzervijlsel gemagnetiseerd wordt en zich vervolgens als kompasnaaldjes naar de richting van

magnetische veldlijnen richten. De video van het experiment is snel op te starten en helpt de leerlingen bij begripsvorming van de context van het magnetisch veld rond een stroomvoerende draad én de daarbij horende rechterhandregel. (Clark, 1983) zoals aangehaald in (Kirschner et al., 2018)

#### 7. Spoel als magneet gebruiken

Om specifiek aan die ontbrekende vaardigheid aan te besteden, wordt het toepassen van de rechterhandregel bij een elektromagneet (spoel) ineens veel eenvoudiger voor de leerlingen. Dit aandachtspunt blijkt eerdere een wiskundige oplossing (Michelini et al., 2007) nodig te hebben alvorens transfer van deze wiskundige vaardigheid naar de context van een elektromagneet kan worden toegepast.

## Lesplan les 2

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen terug en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen hadden hiervoor een studie-uur en hebben aan natuurkunde gewerkt. Leerlingen gaan zitten en leggen hun spullen klaar voor.
5 – 15	Voorkennis activeren en terugkomen op eventuele vragen uit de verwerkingsopgaven over 10.1 en 10.2.	Docent controleert het huiswerk en inventariseert of er nog vragen zijn n.a.v. het huiswerk. Docent herhaalt mede daarmee kort de behandelde magnetische concepten uit de vorige les in de vorm van een OLG.	Leerlingen stellen vragen uit hun huiswerk en onderwerpen van de vorige les en doen actief mee met het OLG..
15 - 35	Lorentzkracht op een stroomvoerende draad (9). 3D redeneren en denken met linkerhandregel (10). Lorentzkracht op een geladen deeltje en de cirkelbaan (13)	Docent demonstreert de lorentzkracht tussen stroomvoerende draden met een video ( <a href="https://youtu.be/43AeuDvWcOk">https://youtu.be/43AeuDvWcOk</a> ) en licht dit vervolgens toe met een schets op het whiteboard en de linkerhandregel. Tekent vervolgens een paar situaties op het bord om de linkerhandregel toe te passen (telkens de richting van 2 van de drie grootheden gegeven). Docent past nu ook de lorentzkracht toe op een geladen deeltje door daarbij eerst de stroomrichting te bepalen en schetst vervolgens weer een aantal voorbeelden om mee te oefenen. Docent laat in een OLG de leerlingen ontdekken dat een geladen deeltje wel een cirkelbaan MOET gaan maken, omdat de lorentzkracht altijd loodrecht op de bewegingsrichting staat.	Leerlingen luisteren aandacht en doen actief mee met de oefeningen met de linkerhandregel voor een stroomvoerende draad en een bewegend geladen deeltje in een homogeen magnetisch veld. Leerlingen doen mee met het OLG over de cirkelbaan van een geladen deeltjes in een homogeen magnetisch veld.
35 – 45	Maken verwerkingsopdrachten	Docent zet leerlingen aan het werk met verwerkingsopdrachten volgens de planner. Docent loopt rond en stelt open vragen zoals: hoe gaat het? Docent is beschikbaar voor vragen van leerlingen bij de opgaven.	Leerlingen pakken hun planner en beginnen met het maken van werkingsopdrachten uit het boek. Leerlingen controleren zelf hun gemaakte antwoorden met het uitwerkingenboek en stellen vragen wanneer ze vast loopt.
45-55	Werking van een relais (8).	Docent laat adhv een video zien hoe een relais werkt en benoemt welke toepassingen er zoal zijn (wissels bij NS,	Leerlingen luisteren en stellen spontaan hun vragen tijdens de uitleg.

<b>Tijd</b>	<b>Onderwerp</b>	<b>Activiteit docent</b>	<b>Activiteit leerling</b>
		knipperlicht in een auto) en waarom die er zijn. Docent maakt in een OLG samen met de leerlingen opgave 24	
55 - 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen uit de les, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen nemen deel aan het OLG, noteren huiswerk in hun agenda en ruimen hun spullen op.

## **Uitgewerkte aandachtspunten voorafgaand aan les 2**

### 8. Relais demonstreren met video

Om praktische redenen en met het oog op weinig beschikbare tijd, is het handig om volgende video te gebruiken (Chris Gozzard, 2005) om kort de werking van een relais te laten zien en te laten doorgronden (Arons, 1997).

### 9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video

Om praktische redenen en met het oog op weinig beschikbare tijd, is het handig om volgende video te gebruiken om de lorentzkracht tussen stroomvoerende draden te laten zien (MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire, 2008) en te doorgronden middels uitleg op het whiteboard (Arons, 1997).

### 10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)

Bij het doorgronden van driedimensionale tekeningen en schetsen, helpt het om dat expliciet te benoemen en voorbeelden te geven van methoden van 3D tekenen. Wanneer leerlingen eenmaal de richtingen van twee van de drie vectoren helder hebben in het 3D perspectief, zou het toepassen van de linkerhandregel om de richting van de derde vector te vinden eenvoudiger moeten worden (Michelini et al., 2007).

### 13. Cirkelbaan behandelen bij lorentzkracht op geladen deeltje

Leerlingen uit 5 VWO en voor wie natuurkunde een nieuw vak is (herprofileerders) hebben de cirkelbeweging nog niet gehad hebben. Leerlingen die van HAVO komen of gezakt zijn op VWO kennen die als het goed is al wel. Daarom is het wenselijk om bij de lorentzkracht op een geladen deeltje ook de cirkelbeweging aan bod te laten komen om het verband te leggen tussen een kracht loodrecht op de beweging (zoals de lorentzkracht) en de daaruit volgende cirkelbeweging. Datzelfde gebeurt ook bij gravitatiekracht of een cirkelbeweging door spankracht of normaalkracht (achtbaan) (Kortland et al., 2017).

## Videoanalyse les 2

### 0 – 5 les introductie

Docent verwelkomt de leerlingen terug nadat ze een studieuur hadden na de eerste les van deze tweede serie.

### 5-15 voorkennis activeren

Docent geeft aan dat hij vorige les bewust veel aan het woord geweest is omdat de leerlingen zelf al stof bestuurd hadden en er lesuitval was geweest die ingehaald moest worden. Docent geeft aan het belangrijk te vinden dat leerlingen zicht bewust zijn dat magneten altijd twee polen hebben (noord en zuid) en dat veldlijnen de richting van het magnetische veld aangeven zoals een kompasnaald er zou aangeven met z'n noordpool. Buiten de magneet lopen de veldlijnen van Noord naar Zuid en binnen de magneet van Zuid naar Noord. Docent herhaalt dat ook met een spoel waar stroom doorheen gaat een magnetisch veld op te wekken is en dat de richting daarvan met de rechterhandregel te vinden is. Docent vraagt of er over de eerste paragraaf (10.1) nog vragen zijn. Leerlingen blijven stil. Docent herhaalt de vraag over paragraaf twee (10.2). Enkele leerlingen (die niet zelf toch huiswerk maakten) hebben nog niet alle vragen gemaakt, maar andere zijn al helemaal klaar met de opgaven. Er zijn geen vragen van leerlingen en docent geeft aan dat eventuele vragen bij het maken van huiswerk bij de volgende les van harte welkom zijn. Deze lesfase duurt maar tot ongeveer 10 minuten in de les.

### 15 - 30 Lorentzkracht op een draad

Docent benoemt dat er een kracht gaat werken op een draad waar stroom doorheen gaat als de draad zich in een magneetveld bevindt en dat de bron van het magneetveld verschillende oorzaken kan hebben: een permanente magneet, een elektromagneet of het magnetische veld van de aard.

Docent laat dit al eerste zien met een illustratie uit het boek (op het touchscreen) en benoemt daarbij dat hier weer het doorzien van de 3D-weergave in een plat vlak cruciaal is. (10). Hoewel de hoeken in het vlak van tekening niet 90 graden zijn tussen de drie vectoren ( $F$ ,  $B$  en  $I$ ), *weten* we dat dat wel zo is omdat dat een afspraak is bij het tekenen in perspectief van driedimensionale concepten. Docent geeft aan dat leerlingen altijd gelijk hun eventuele vraag mogen stellen. Docent ligt toe hoe de richtingen van  $B$  en  $I$  te vinden zijn uit de weergegeven magneet (van noord naar zuid buiten de magneet) en + en – pool van de spanningsbron. **Een leerling begint gelijk al over de linkerhandregel.** Docent geeft aan daar zo op terug te komen en herhaalt dat de drie vectoren loodrecht op elkaar staan. Aangezien  $B$  en  $I$  bij deze illustratie gevonden zijn, blijven er voor de richting van de Lorentzkracht nog twee richtingen over. Docent laat dat ook zien met gebruik van zijn armen als vector  $B$  en  $I$  en de mogelijke richtingen in het lokaal daar loodrecht op. Docent benoemt dat voor het maken van de juiste keuze uit die twee richtingen de linkerhand regel gebruikt kan worden. Docent laat de illustratie daarover uit het boek zien en past deze toe op de eerdere illustratie. Docent vraagt leerlingen allemaal mee te doen en geeft aan dat ze dat echt moeten gaan doen om de juiste keuze te kunnen maken bij vragen over dit onderwerp. **Leerlingen lachten wat ongemakkelijk en doen vervolgens allemaal mee.** Na enig puzzelen samen vraagt een leerling: **maar hoe weet je nou de richting van  $I$  en hoe moet je nou je linkerhand en duim en vingers houden bij de tekening van het boek. Ze geeft aan dat niet zelf te kunnen bedenken.** Docent neemt de leerlingen mee om samen nogmaals de richting van  $B$  en  $I$  te tekenen op het touchscreen (naast de illustratie uit het boek). Eerst beredeneert en tekent hij de richting van de stroom. **Leerling zegt: ja, dat begrijp ik wel.** Docent beredeneert en tekent de richting van het magnetische veld en benoemt dat ze loodrecht op elkaar staan, maar vanwege het platte vlak in de tekening niet zo zijn weergeven

vanwege de perspectief weergave. **Leerling mompelt wat en knikt instemmend.** Docent past verder de linkerhandregel toe en tekent de richting van de lorentzkracht. Docent benoemt nog een keer dat de hoeken in werkelijkheid allemaal 90 graden zijn, maar niet zo in de tekening staan vanwege de 3D-weergave in een plat vlak. **Ja, ok, stemt de leerling in met de gevonden richting van F.** De andere leerlingen luisteren aandachtig en gebruiken hun linkerhand bij de redeneringen.

Docent pakt er een andere opgave bij over het lanceren van een projectiel met lorentzkracht zoals bijvoorbeeld bij een railgun. **Een leerling reageert direct met: “ja, daar, ik liep met dit vast”.** Docent herhaalt dat je bij de linkerhandregel altijd twee vectoren (van F, B en I) weet of kunt afleiden uit de opgave en dat je daarmee altijd de richting van de derde (gevraagde) kunt bepalen). In dit geval zorgt de lorentzkracht voor versnelling en staat daarmee in de richting waarin het projectiel versneld wordt. Docent vraagt in welke richting het projectiel versneld wordt af te leiden uit de tekening. **Een leerling wijst daarop direct de juiste richting aan en zegt gelijk dat dat dan ook de richting van de lorentzkracht is.** Docent tekent de vector van de lorentzkracht over de opgave van het boek op het touchscreen. Er ontstaat wat gelach om een leerling die wat onwennig de linkerhandregel probeert toe te passen (10). Docent herhaalt nog maar eens dat er niets anders op zit op een examen dan om toch echt die linkerhandregel zo toe te leren passen. Docent verlegt de aandacht naar de tweede doorsnede van deze opgave met een ander aanzicht en vraagt de leerlingen de richting van I te bepalen. **Een leerling antwoordt dat de stroom van + naar – loopt door het metalen projectiel.** Docent tekent de richting van de stroomsterkte op de eerste doorsnede met de richting van de lorentzkracht. **Leerlingen mopperen wat en na enige overleg past de docent z'n schets van de vector bij I aan zodat deze beter bij de tekening past en de leerlingen stemmen in.** Docent geeft aan dat het doorgronden van de 3D weergave en uitvinden van de eerste twee vectoren altijd het lastigste is (10). Daarna volgt vrij rechttoe rechtaan de richting van de derde (in dit geval het B-veld) met de linkerhandregel en **een leerling voert dat gelijk al uit.** Docent vraagt ook de andere dit voor zichzelf te doen en **leerlingen vinden allemaal dezelfde richting van B.**

Docent tekent een stroomdraad op het whiteboard met I omhoog en daarbij een magneetveld het bord in en vraagt vervolgens: wat ga ik nu vragen? **Een leerling antwoordt direct met: de richting van de lorentzkracht.** Docent geeft aan dat die kracht loodrecht op B en I moet staan en er dus twee mogelijkheden overblijven (naar links en naar rechts) en dat daarvoor de linkerhandregel nodig is. **Leerlingen doen allemaal fanatiek mee en één leerling vraagt hoe je de richting van B weet.** Docent herhaalt de tekenafpraak voor vectoren het bord in en uit en **de leerling herkent die weer.** **Vervolgens komen alle leerlingen op dezelfde richting uit (naar links).** (10)

Docent tekent een nieuwe situatie op het whiteboard en vraagt de leerlingen om de richting van de stroomsterkte te bepalen. **Leerlingen discussiëren wat met elkaar en met docent over het gebruik van de linkerhandregel en komen uiteindelijk allemaal tot dezelfde (juiste) conclusie.**

Docent gebruikt een video van een demonstratie om de lorentzkracht tussen twee stroomvoerende draden te laten zien (9). Bij stilstaand beeld licht docent het experiment toe en de mogelijkheden om stroom in tegenstelde richting te laten lopen (serie) en in dezelfde richting (parallel). Draad 1 veroorzaakt een circulair B-veld waardoor draad 2 een lorentzkracht ondervindt en omgekeerd. In de video wordt niets uitgelegd, alleen met tekst in beeld is er wat toelichting. Duidelijk is te zien dat de draden elkaar afwisselend aantrekken en afstoten bij serie of parallel schakelen. **Leerlingen kijken aandachtig.** Docent neemt de situatie dat de draden elkaar afstoten en tekent twee draden, waarvan de rechter met de stroomrichting omhoog 1. In een OLG bepaald hij met de leerlingen de richting van het B-veld en tekent deze ter plekke van de linkerdraad. **De meeste leerlingen gebruikt hiervoor direct de rechterhandregel. Eén leerling probeert het met de linkerhandregel en komt er niet uit. Bij inzien dat de rechterhandregel hiervoor gebruikt kan worden zit ze gelijk de juiste richting van het**

**B-veld.** Docent tekent het B-veld bij de linkerdraad (dat van de rechterdraad komt). Samen met de leerlingen bepaald hij de richting van de Lorentzkracht (naar links, afstotend) en laat vervolgens leerlingen de richting van I bepalen. **Er volgt wat discussie en nadat ze allemaal weer de linkerhand gebruiken,** volgt de conclusie dat de stroom hier naar beneden gericht is en de draden dus in serie staan. **Eén leerling geeft aan een rechterhandregel te gebruiken voor het verband tussen F, B en I.** Docent bevestigt dat die ook werkt, maar dat hij deze niet gebruikt omdat het dan verwarrend wordt ten opzichte van het boek. Leerling krijg de vrije keuze tussen deze methode te blijven gebruiken of te switchen naar de linkerhandregel uit het boek. Beide regels leveren toch hetzelfde resultaat op. **Eén leerling vraagt hoe de drie vectoren op het bord loodrecht op elkaar kunnen staan.** Docent geeft aan dat het B-veld uit het bord komt en ook volgens de bijbehorende conventie getekend is. **Leerling ziet dat nu wel weer in (10).** Docent beredeneert nu in een OLG de richting van het B-veld rond de linkerdraad en tekent deze op de plaats van de rechterdraad. Vervolgens laat hij de leerlingen de richting van de Lorentzkracht op de rechterdraad bepalen. **Er ontstaat wat discussie tussen de leerlingen en met name één leerling ziet het maar niet. Een andere leerling die nog niet veel gezegd heeft, zegt ineens: eerst neem je één ding, bijvoorbeeld het B-veld, dan het tweede ding, bijvoorbeeld de stroomsterkte, dan volgt het derde ding vanzelf, in dit geval de Lorentzkracht. Ok, hij gaat naar rechts, antwoord de leerling gelijk die het nog niet zag.** Docent herhaalt de demo in de video voor beide situaties (serie en parallel) om nogmaals te laten zien dat de draden elkaar aantrekken respectievelijk afstoten.

### 30 – 45 Lorentzkracht op een geladen deeltje en cirkelbeweging (13)

Docent tekent een elektron op het whiteboard dat naar rechts beweegt, een B-veld het bord in en vraagt vervolgens wat de richting van de stroomsterkte is. **Een leerling geeft direct aan dat die tegengesteld is, dus naar links.** Docent bevestigt dit en geeft aan dat ook hier een Lorentzkracht werkt en vraagt de leerlingen daarvan de richting te bepalen. **Na enige weifelen beginnen enkele leerlingen de linkerhandregel toe te passen en komen tot de conclusie dat de Lorentzkracht naar beneden moet zijn.** Docent tekent de Lorentzkracht en vraagt wat er met de richting van het elektron zal gebeuren. **Een leerling noemt afbuigen en wijst omlaag.** Docent tekent de afbuiging als een cirkel met het elektron ongeveer 90 graden gedraaid verderop en vraagt wat nu de richting van de Lorentzkracht is. **Leerlingen blijven stil.** Docent vraagt wat de richting van de stroomsterkte is en **een leerling geeft aan tegen de beweging in.** Docent bevestigt en herhaalt z'n eerdere vraag. **Leerlingen beginnen weer met de linkerhand en komen na enig discussiëren tot de conclusie dat deze naar links moet zijn.** Docent maakt de gepland zijstap naar de cirkelbeweging omdat lang niet alle leerlingen die gehad hebben.

Docent tekent een cirkel met een massa  $m$  die de cirkelbeweging met snelheid  $v$  maakt en vraagt wat de snelheid zal zijn en wat je daarbij door elkaar deelt. **Een leerling antwoordt gelijk afstand delen door tijd.** Docent bevestigt en vraagt wat een logische afstand daarbij zou zijn. **Een leerling roept gelijk de straal.** Docent wijst aan dat de omtrek logischer zou zijn om te nemen en geeft aan dat de tijd die daarbij hoort van één rondgang de omlooptijd  $T$  is. Daarmee komt de formule  $v = \frac{2\pi r}{T}$  op het bord. Docent vraagt leerlingen te berekenen wat de snelheid om het midden van de aarde op de evenaar is. **Leerlingen reageren eerst wat verbaasd en dan vraagt er één of ze de gegevens in BINAS moeten opzoeken.** Docent bevestigt en laat de leerlingen even zoeken en rekenen. Docent vraagt de leerlingen om eerste de formule te noteren, dan de gegevens in te vullen. Ondanks die opdracht doet maar een enkele leerling dat. **De eerste leerling is al vrij snel klaar en vraagt of z'n antwoord goed is.** Docent checkt en bevestigt. **Andere leerlingen pakken nu pas hun BINAS** en docent geeft ze nog even de tijd om ook hun berekening te maken. **Niet elke leerling vindt gelijk het juiste antwoord. Waar het mis gaat is soms met werken van eenheden (straal uit BINAS juist in meters) of het gebruik van de baanstraal in plaats van de straal. Eén leerling werkt gelijk met kilometers en uren en komt op een**



snelheid in km/h. Eén leerling schrijft niets op, voert getallen rechtstreeks in de rekenmachine in, vindt niet het juiste antwoord en vraagt docent wat hij fout deed. Docent geeft aan dat deze leerling zoals gevraagd eerst de formule moet noteren, dan de gegevens invullen en dan pas de rekenmachine gebruiken. Docent geeft ook aan dat deze methode veel fouten voorkomt en het ook eenvoudig maakt om te zien waar het onderweg eventueel mis is gegaan.

Docent gaat verder met de kracht die nodig is voor een cirkelbeweging. Deze kracht moet loodrecht op de bewegingsrichting staan, heet de middelpuntzoekende kracht en kan met deze formule berekend worden:  $F_{mpz} = \frac{mv^2}{r}$ . Docent geeft aan dat dit in principe een nettokracht is, net zoals bij het versnellen een nettokracht in de richting van de beweging nodig is (of tegengesteld voor vertragen). Vervolgens geeft hij aan de bij een geladen deeltje in een magneetveld de lorentzkracht altijd loodrecht op de bewegingsrichting staat en dus voor de middelpuntzoekende kracht zorgt die nodig is voor het maken van een cirkelbeweging. Docent benoemt dat de lorentzkracht met volgende formule te berekenen is:  $F_L = Bqv$ , tekent een positron dat naar rechts beweegt en vraagt in welke richting deze zal afbuigen. Leerlingen moeten duidelijk even schakelen. Docent vraagt wat hier de richting van  $I$  is. Na enig weifelen vraagt een leerling: in dezelfde richting als het proton toch? Docent bevestigt dat een proton positief geladen is en de stroomrichting dan in dezelfde richting als de beweging ervan is. Docent vraagt nogmaals welke richting de protonen zullen afbuigen bij hetzelfde magneetveld als eerder (het bord in). Leerlingen gebruiken hun linkerhand ineens weer en de eerste leerling roept 'omhoog'. Docent bevestigt dit.

#### 40 – 50 Maken verwerkingsopdrachten

Docent geeft aan dat er wat minder tijd voor verwerkingsopdrachten is en dat aan het eind van de les nog een korte demo van een relais zal zijn. De leerlingen pakken hun planner erbij en gaan verder met het maken van opdrachten waar ze gebleven zijn. Niet alle leerlingen zijn even ver gevorderd, dus de onderwerpen lopen uiteen. Docent laat het even zo omdat de leerlingen bij Luzac het prettig vinden om de planner te kunnen volgen. Het duurt even voordat alle leerlingen effectief aan het werk zijn en docent moet er een paar nog eens extra aansporen. Leerlingen zijn allemaal aan het werk nu. Docent kijkt even toe en laat de leerlingen zelf werken. Een leerling stelt nog een vraag over de richting van het magneetveld bij een spoel bij één van de eerdere opgaves. Docent kijkt met leerling mee bij de opgave hoe met name de spoel getekend is in 3D en vraagt wat de richting van de stroom door de spoel zal zijn gezien vanuit de spanningsbron. Leerling antwoord: van + naar -, dus van links naar rechts. Docent geeft aan dat het gaat om de richting van de stroom door de windingen, dus om de as van de spoel als het waren. Na enig puzzelen ziet de leerling in hoe de spoel bedoeld is in de tekening en geeft de correcte richting van de  $I$  aan. Docent geeft aan dat met de rechterhandregel nu de richting van het B-veld te vinden. Leerling voert dat zelf uit en vraagt of dit zo goed is. Docent bevestigt en geeft aan dat de moeilijkheid vaak is om te doorgronden hoe een figuur bij een opgave bedoeld is. Vaak worden bij de voorkant van de spoel de windingen dik getekend en aan de andere kant dunner om het in perspectief (3D) weer te geven (10).

#### 50 – 55 Werking van een relais.

Docent zet de video klaar waarin een de werking van een relais wordt gedemonstreerd (Chris Gozzard, 2005) en vraagt de aandacht van de leerlingen weer centraal. Na even wachten geeft docent aan dat deze uitleg / demo in de vorige les buiten de boot viel. Leerlingen hebben de opgave waar ze mee bezig waren inmiddels afgerond en kijken naar het scherm of de docent. Docent laat de uitleg/demo integraal spelen (tijdsduur 1:20) en vraagt of er nog vragen zijn. Eén leerling vraagt waarom je een relais gebruikt als je de lamp ook gelijk aan kan doen. Docent geeft aan dat dit vooral gebruikt wordt wanneer het secundaire circuit veel stroom nodig heeft. Dan kunnen daarvoor korte

dikke koperdraden gebruikt worden en lange dunne koperdraden naar de relais toe voor het schakelen. Bijvoorbeeld voor het knipperlicht of de startmotor van een auto of het elektrische omzetten van een wissel bij het spoor. Dat spaart koper uit en dus kosten en de totale massa van een auto is dan minder, dus minder brandstof gebruikt. Ook kan de primair schakelaar veel kleiner zijn en dichter op elkaar zitten, zoals in het dashboard.

55 – 60 Lesafsluiting

Docent benoemt dat de les er bijna opzit en leerlingen beginnen gelijk hun tas in te pakken. Docent geeft aan dat de leerlingen zelf nog even naar opgave 24 moeten kijken waarin een relais gebruikt wordt en waar vragen over waren. Docent geeft ook op de planner (met een andere kleur) aan wat het huiswerk voor de volgende les is. Dit is omdat de lessen iets anders ingedeeld zijn dan vooraf gepland.

## Bevindingen op aandachtspunten na videoanalyse van Les 2

### 8. Relais demonstreren met video

De video van een experiment om de werking van een relais te laten zien (Chris Gozzard, 2005) is zonder voorbereiding in enkele minuten te laten zien en toe te lichten. De vraag die volgt is met name waar relais zoal voor gebruikt worden en niet over de conceptuele werking ervan (Arons, 1997).

### 9. Lorentzkracht tussen draden demonstreren met video

Bij de combinatie van de video van een experiment met het effect van lorentzkracht tussen stroomvoerende draden (MIT Physics Demo -- Forces on a Current-Carrying Wire, 2008) met een verklaring ervan op het whiteboard doen de meeste leerlingen gelijk mee met de rechterhandregel voor richting B-veld om één van de stroomvoerende draden en de linkerhandregel voor het bepalen van de bijbehorende lorentzkracht op de andere stroomvoerende draad (Arons, 1997).

### 10. Driedimensionaal leren redeneren met de linkerhandregel (F, B, I)

Aandacht en tijd besteden aan de manier van 3D weergave in een plat vlak (perspectief met en zonder verdwijnpunt of de z-as loodrecht op het whiteboard) leidt tot steeds meer herkenning bij de leerlingen. Leerlingen bleken ook moeite te hebben bij het natuurkunde aspect van opgaven, zoals het herleiden van de richting van de lorentzkracht uit de beweging. Bij een cirkelbeweging van een geladen deeltje is dat de middelpunt zoekende kracht, dus naar het midden van de cirkel. Bij het lanceren van de projectiel werkt de lorentzkracht in de richting van de versnelling. Ook het herleiden van de richting van de stroom uit de aansluiting van de spanningsbron of van bewegende geladen deeltjes is een losse stap die in de context van elektromagnetisme niet altijd gelijk herkend wordt (Arons, 1997). Wanneer leerlingen eenmaal de richtingen van twee van de drie vectoren helder hebben in het 3D perspectief, blijkt het toepassen van de linkerhandregel om de richting van de derde vector te vinden inderdaad eenvoudig voor de leerlingen (Michellini et al., 2007).

### 13. Cirkelbaan behandelen bij lorentzkracht op geladen deeltje

Door leerlingen eerst met de formule voor baansnelheid te laten berekenen wat bijvoorbeeld de snelheid van een punt op de evenaar om de aardas is, wordt zowel voorkennis geactiveerd als instructie gegeven aan leerlingen voor wie dit nieuw is. Dat vraag een paar minuten meer dan gepland en daardoor komen ze er allemaal uit. De uitleg van het concept van middelpuntzoekende kracht als nettokracht loodrecht op de beweging (en naar het middelpunt van de cirkel) gericht voortdurend zorgt voor afbuiging roept geen vragen op. (Kortland et al., 2017).

Wanneer vervolgens bij een bewegend proton in een magnetisch veld naar de richting van de stroomsterkte gevraagd wordt, valt het even stil. Dan vraagt een leerling voorzichtig vraag of dat inderdaad in de richting van het proton is en zien andere ook dit natuurkundig concept weer in (Arons, 1997). Daarna is het niet meer zo moeilijk om de linkerhandregel op de context van een geladen deeltje dat loodrecht op een permanent magnetisch veld beweegt, toe te passen.

### Lesplan Les 3

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen terug en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen hebben huiswerk gemaakt en leggen hun spullen klaar voor de les.
5 – 15	Voorkennis activeren en terugkomen op eventuele vragen uit de verwerkingsopgaven. Uit ervaring blijkt dat hier veelal vragen zijn over hoe de verschillende 3D-representaties uit opgaven te interpreteren en toe te passen (11).	Docent controleert het huiswerk en inventariseert of er nog vragen zijn n.a.v. het huiswerk. Docent herhaalt aan de hand daarvan kort de behandelde concepten over de lorentzkracht in de vorm van een OLG en neemt daarbij het omgaan met de verschillende 3D-representaties mee.	Leerlingen stellen vragen uit hun huiswerk en onderwerpen van de vorige les en doen actief mee met het OLG.
15 – 25	Toepassingen van lorentzkracht: de luidspreker met demo en het interpreteren van de 3D-weergave uit het boek (11) middels een schets (14).	Docent laat de werking van een luidspreker zien met lorentzkracht aan de hand van een schets uit het boek zien. De 3D-weergave wordt samen met de leerlingen in een OLG uitgewerkt middels een schets over het boek heen. Docent demonstreert dit vervolgens met een luidspreker gekoppeld aan de school-pc en benoemt dat ook 'oortjes' van leerlingen op dit principe werken.	Leerlingen doen actief mee aan het OLG en stellen spontaan hun vragen gedurende het eerste deel met uitleg.
30 – 40	Toepassingen van lorentzkracht: elektromotor en het interpreteren van de 3D-weergaven erbij uit het boek (11) middels een schets (14).	Docent laat de werking van een elektromotor zien met een schets over de illustraties in het leerboek heen (14)	Leerlingen doen actief mee aan het OLG en stellen spontaan hun vragen gedurende het eerste deel met uitleg.
40 – 55	Verwerkingsopdrachten maken.	Docent loopt rond en stelt open vragen aan leerlingen over hoe het gaat. Docent kijkt ook hoe leerlingen de uitwerkingen noteren en geeft ze waar nodig feedback.	Leerlingen maken verwerkingsopdrachten aan de hand van de studieplanner. Wat ze niet afkrijgen, maken ze als huiswerk in de studiezaal.
55 – 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen uit de les, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen nemen deel aan het OLG, noteren huiswerk in hun agenda en ruimen hun spullen op.

### **Uitgewerkte aandachtspunten voorafgaand aan les 3**

#### 11. Verschillende driedimensionale representaties benoemen

Er zijn meerdere manieren voor representatie in 3D, zoals een schets met een verdwijnpunt zoals bij tekenen gebruikt wordt, een opengewerkte foto en de weergave waarbij de x- en y-as in het vlak van tekening liggen en met een symbool wordt aangegeven of de vector in de richting van de z-as loodrecht daarop het bord in (x) of uit (•) gaat. Figuur 11 Notatie van vektoren in of uit een vlak. (Kirschner et al., 2018)



*Figuur 11 Notatie van vektoren in of uit een vlak (Notation for vectors in or out of a plane, 2024)*

#### 12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?

Bij een deel van de vragen over lorentzkracht is de lorentzkracht zelf niet gegeven, maar wel nodig om de richting van  $I$  of  $B$  te bepalen. Indien een massa versneld wordt met de lorentzkracht dan is de richting van de versnelling dezelfde als die van de lorentzkracht. Indien een geladen deeltje een cirkelbeweging maakt, dan zorgt de lorentzkracht voor de middelpuntzoekende kracht en is daarmee naar het midden van de cirkel gericht. (Arons, 1997) en (Kortland et al., 2017)

#### **14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg**

In woorden of beelden uitleg geven over de context van een opgave werkt alleen bij leerlingen die daar met hun volledige aandacht bij zijn én auditief zijn ingesteld. Door een schets te laten ontstaan op het whiteboard of nog beter, over de opgave in het boek op de smart-tv gaat de opgave veel meer 'leven' en is het resultaat ervan spreek tot de verbeelding (Kirschner et al., 2018)

### Videoanalyse les 3

#### 0 – 3 Les opstarten

Docent zet de video opname aan en start vervolgens de les op met de planner op het bord. Deze les is drie dagen na de eerste twee lessen en ook les vier van deze serie volgt later op deze dag. Eén leerling had de eerste twee lessen gemist en is er nu wel bij. Ze deed hiervoor HAVO en heeft het onderwerp nog helemaal niet gehad. Op de vraag hoe het ging met het huiswerk gaven de leerlingen aan vooral de handregels nog lastig te vinden om toe te passen bij de verschillende opgaven. Docent benoemt dat maandag (de vorige twee lessen) twee-en-een-halve paragraaf zijn behandeld en dat elektromagnetisme een lastig onderwerp is.

#### 3 – 15 Voorkennis activeren

Om met name de leerling die beide lessen miste bij de groep te houden, start docent nogmaals met de inclinatieaald en wel zo gedraaid dat deze als kompas werkt. Dit was niet vooraf voorzien, maar bleek nuttig a.d.h.v. reacties van leerlingen. Docent checkt met leerlingen of de kompasnaald nog steeds naar dezelfde richting wijst voor het noorden als maandag. **Eén leerling (jongen) bevestigt dat direct. Dezelfde leerling vraagt gelijk door waarom de naald blijft bewegen.** Docent geeft aan dat er heel weinig demping op zit op met hele kleine wijzigen te reageren en dat hij daardoor lang blijft trillen om de juiste richting. Docent geeft aan dat je dit als een (licht) gedempte trilling zou kunnen beschouwen. Docent draait de houder van de inclinatieaald in de richting van het aangewezen noorden en draait het kompas vervolgens 90 graden om z'n as zodat het verticaal zit. Docent vraagt vervolgens wat de leerlingen zien. **Eén leerling zegt dat de naald schuin in de aarde wijst.** Docent bevestigt dat, geeft aan dat hij dat al eens eerder getekend heeft en schetst vervolgens de aarde en het magneetveld nogmaals op het whiteboard met veldlijnen die op onze breedtegraad onder een vergelijkbare hoek de aarde in gaan. Docent benoemt dat meestal alleen met de component van het aardmagnetisch veld gewerkt wordt die evenwijdig aan het aardoppervlak naar het noorden wijst en vraagt of hier nog vragen over zijn. **De leerlingen blijven stil.** Docent tekent vervolgens een kompasnaaldje op één van de veldlijnen dat naar het noorden wijst. Docent herhaalt aan dat de noordpool van het kompasje aangetrokken wordt door een magnetische zuidpool en dat die zich dus op de geografische noordpool bevindt. Docent tekent ook de magnetische noordpool op de geografische zuidpool en laat zien (herhaling) dat ook bij de aarde de veldlijnen buiten de magneet van noord naar zuid lopen en binnen de magneet van zuid naar noord. **Leerlingen beamen dat ze dit eerder gehad hebben en wel snappen.** Docent checkt bij de leerling die beide eerdere lessen miste en die volgt het nog niet helemaal. Docent legt uit dat bij definitie de kant van een magneet die naar het geografische noorden wijst de magnetische noordpool ervan genoemd wordt en dat die dus naar een magnetische zuidpool moet wijzen. Docent laat dit vervolgens zien met een bordenwisser bij de inclinatieaald met het kompas horizontaal. Met de bordenwisser met z'n zuidpool dichtbij wijst de kompasnaald naar de bordenwisser, met de bordenwisser veraf wijst de kompasnaald in de richting van het aardmagnetisch veld (de magnetische zuidpool die zich op de geografische noordpool bevindt) en daartussen wijst de kompasnaald een richting tussen beiden in. Ofwel, de kompasnaald wijst in de richting van de vectorsom van beiden magneetvelden (bordenwisser en aarde). Deze fase over paragraaf 10.1 duurt tot minuut 8 van de les.

Docent gaat verder met 10.2 (elektromagnetisme) en schetst beide situaties waarin de rechterhandregel gebruikt wordt op het bord. Docent tekent eerst een verticale draad met stroom omlaag en vraagt de leerlingen naar de richting van het circulaire magneetveld daaromheen. **Leerlingen doen mee met hun rechterhand en komen tot dezelfde conclusie als docent: links het bord in en rechts er weer uit.** Docent vraagt leerlingen hoe het B-veld dat het bord in gaat te

tekenen. Een leerling antwoord met een kruisje in een cirkel. Docent tekent die en benoemt dat dit lijkt op een dartpijl die van je af gaat als geheugensteuntje. Vervolgens tekent docent ook de vector die het bord uitkomt aan de rechterkant met een cirkel met een stip in het midden: een dartpijl die op je af komt. Dit lijkt vrij duidelijk voor allemaal inmiddels en dan komt er een vraag van een leerling: *Ik snap dit wel, maar is dat nou het magnetische veld of de magnetische veldlijn die we zo vinden? Als ik opgaven maakt haal ik al die begrippen een beetje door elkaar.* Docent schrijft op het bord: “magnetisch veld” en benoemt dat dit het hele magnetische veld omvat dat overal is. *O, en dat bestaat uit veldlijnen vult de leerling gelijk aan.* Docent bevestigt dat en vult aan dat veldlijnen op elke plaats de richting van het magnetisch veld aan en dat waar de veldlijnen dicht bij elkaar liggen de veldsterkte groter is. Docent vraagt nog even extra aan de leerlingen die lessen gemist had hoe het met haar ging. *De leerling geeft aan dat ze dit wel moeilijk vindt en het nog moeilijk vindt bij opgaven met die linkerhandregel.* Docent kijkt even mee welke opgaven ze bedoelt en ziet dat het over de volgende paragraaf gaat. Docent geeft aan dat de linkerhandregel zo aan bod komt bij het herhalen van paragraaf 10.3 (Lorentzkracht) en laat de leerling in haar boek zien waar de rechterhandregel bij een stroomvoerende draad staat. *Leerling mompelt wat en wijst een plaatje aan wat ze nog niet helemaal snapt.* Docent geeft aan dat dit nu aan bod komt: een spoel waar gelijkstroom doorheen gaat en het magneetveld dat daarbij ontstaat. *Leerling weifelt nog steeds en vraagt of je altijd de richting van de stroom weet hier.* Docent zegt dat dat niet zo hoeft te zijn en dat het ook kan zijn dat het magneetveld gegeven is en de richting van de stroomsterkte gevraagd wordt. Docent wist de richting van de stroom, tekent het magneetveld andersom (links het bord uit en rechts het bord in) en vraagt de leerlingen om de richting van de stroom te bepalen. *De meeste leerlingen gebruiken hun rechterhand gelijk juist, maar de leerling die lessen miste heeft moeite om daarmee te beginnen.* Docent geeft aan dat er bij dit soort opgaven niets anders op zit dan de rechterhandregel te gebruiken en over die drempel van schroom heen te stappen. *Leerling vraagt of kruisje het bord in betekent en haar buurvrouw vult aan dat het B-veld dan achter de draad langs gaat en links weer uit het bord gaat. Leerling ziet het nu ook* en docent bevestigt de juiste gevonden richting van stroomsterkte.

Docent tekent een spoel en benoemt dat de winding die gestippeld zijn achter het bord langs lopen en die doorgetrokken zijn voorlangs lopen, tekent er een spanningsbron bij en vraagt aan de leerlingen die lessen miste wat de richting van de stroom is. *Leerling zegt: ik weet het niet meer hoe dat zat.* Docent geeft aan dat de lange pool van de spanningsbron de plus is, zet een + teken erbij en benoemt dat ze dit bij examens wel moet weten (ook zonder het plus teken). *Leerling zegt dat stroom van plus naar min gaat* en docent tekent een met de een pijl de richting van  $I$  die naar de spoel gaat. Docent tekent in dezelfde richting door de draad de richting van  $I$  in de windingen. De stroom gaat van voor het bord naar boven, het bord in, dan achterlangs en vervolgens onder weer het bord uit. Docent geeft aan dat hier de vingers van de rechterhand nog steeds gekromd zijn en de richting van de stroom aangeven en dat de duim dan de richting van het rechtdoor gaande veld aangeeft (naar links). *Leerling zegt: dus het B-veld gaat altijd tegen de richting van de stroomsterkte in?* Docent geeft aan dat dat niet altijd zo is en afhangt van hoe de spoel gewikkeld is: met de klok mee of tegen de klok in en dat je altijd moet kijken hoe de stroom om het midden van de spoel heen gaat. Het B-veld gaat of naar links, of naar rechts en met de rechterhandregel kun je altijd de juiste keuze maken. *Leerling knikt nu meerdere malen instemmend.* Docent tekent nu ook de veldlijnen buiten en de spoel en benoemt dat dit een elektromagneet is die net als een permanent magneet een magnetisch veld opwekt en vraagt welke kant van de spoel hier de noordpool is. Ondertussen komt een leerling binnen die door de docent verwelkomd wordt. *Enkele leerlingen noemen weifelend de linkerkant, maar erg zeker zijn ze er niet over.* Docent herhaalt dat buiten de magneet de veldlijnen van noord naar zuid gaan (en binnen de magneet van zuid naar noord). Docent tekent

er een permanente magneet onder, ook met de noordpool links, tekent er enkele veldlijnen bij en benoemt dat het precies eigenlijk precies dezelfde magnetische velden zijn. Om dit onderwerp af te ronden met een laatste check tekent docent een spoel die andersom gewikkeld is met daarbij links de noordpool en de aansluitdraden naar de spanningsbron. Vervolgens vraagt hij hoe de spanningsbron aangesloten moet zijn. **Leerlingen blijven stil**. Docent geeft de hint om eerst het hele magnetische veld te tekenen en **doet dat vervolgens ook in samenspraak met één van de leerlingen**. Docent moet leerlingen even aansporen om allemaal de rechterhand er weer bij te nemen met duim in de richting van het gevonden B-veld en daarmee de richting van I om het midden van de spoel heen te vinden. Docent tekent de richting van de stroom in enkele windingen en vervolgens ook in een aansluitdraad. Tot slot tekent docent de spanningsbron. Docent vraagt hoe het met de leerling gaat die later binnenkwam. **Goed zegt ze**. Docent vraagt vervolgens en met jou en dit onderwerp? **Ook goed zegt ze overtuigend**. Deze fase duurt tot en met minuut 19 van de les. Docent realiseert zich dat dit langer duurt dan gepland, maar besluit toch door te gaan op deze manier met paragraaf 10.3 om met name de leerling die lessen miste en de zwakkere leerlingen erbij te houden.

Docent inventariseert over welke opgaven over de lorentzkracht (10.3) uit het huiswerk nog vragen zijn. Er blijkt één opgave te zijn met vragen die betrekking heeft op 10.2 en docent kiest ervoor om daar eerst op in te gaan. Docent zet de opgave op het touchscreen. Het is een spoel met daarin een kompasnaald en gevraagd wordt om de veldlijnen te tekenen. Docent benoemt nog dat de rode kant van het kompasnaaldje de noordpool is en **gelijk vult een leerling aan dat de veldlijnen daar naar rechts gaan** (met het naaldje mee). Docent bevestigt en tekent de veldlijn binnen de spoel. Docent vraagt wie denkt dat de noordpool van de spoel links zit. **De leerlingen blijven stil**. Docent vraagt wie denkt dat de noordpool rechts zit en **de meerderheid steekt een hand op**. Docent tekent eerste de veldlijnen buiten de spoel en benoemt dat die van noord naar zuid gaan. Vervolgens tekent docent de noordpool rechts (en zuidpool links) en benoemt dat de veldlijnen in de magneet van zuid naar noord gaan. Vervolgens vraagt de opgave de richting van de stroomsterkte aan te geven en docent geeft alle leerling de opdracht dat te doen. **Leerlingen gebruiken hun rechterhand goed, maar vinden het nog lastig de richting van de stroom bij de aansluitingen van de spanningsbron te vinden**. Docent denkt hardop met ze mee, tekent op een paar windingen de richting van I en vervolgens consequent op de aansluitdraden. **Een leerling merkt op dat dit niet overeen komt met de uitwerkingen**. Docent kijkt dit na en leest de opgave nogmaals goed om te vinden waar dit verschil vandaan komt. **Een leerling leest een belangrijk stuk van de vraag voor er volgt enige discussie tussen haar en de docent over hoe de vraag bedoelt is. Op een gegeven moment vraagt de leerling of ze mag tekenen hoe zij de vraag ziet**. Graag zegt de docent. Na een testje met de inclinatiennaald, een bordmagneet en hardop denkend realiseert docent dat de leerling gelijk heeft (en dus ook de uitwerkingen). Docent legt de opgave met dit nieuwe inzicht opnieuw uit: eerst zonder stroom door de spoel waarbij het kompasje in de richting van het aardmagnetisch veld wijst en dan vervolgens met de spoel aan waarbij het kompasnaaldje naar rechts gaat wijzen. Dat betekent dat van de spoel nu de zuidpool rechts zit en de noordpool links en de veldlijn in de spoel van zuid naar noord wijst. Ofwel: binnen een spoel wijst een kompasnaald **tegen het magnetisch veld in**. Daarmee vind je een stroomrichting in de spoel tegengesteld aan wat eerder beredeneerd was en in overeenstemming met de uitwerkingen. Docent excuseert zich voor de verwarring. **Dan vraagt een leerling: maar hoezo gaat nu niet noord mee met de veldlijnen?** Docent herhaalt de uitleg dat een kompasnaald altijd met de noordpool naar een magnetische zuidpool wijst en dat buiten een elektromagneet met de veldlijnen mee is en binnen de magneet ertegenin. **Leerling knikt instemmend**. Deze uitleg / herhaling duurt uiteindelijk tot lesminuut 30.

Docent gaat verder 10.3 en herhaalt kort de samenhang tussen B, I en de lorentzkracht, dat deze drie vectoren loodrecht op elkaar staan en dat wanneer je er twee weet er voor de derde nog maar twee



mogelijkheden overblijven. De linkerhandregel helpt om daarvan de juiste richting te vinden. Docent tekent een magnetische veld naar rechts en een stroomdraad met stroom omlaag en benoemt dat voor de lorentzkracht nog maar twee mogelijkheden zijn om daar loodrecht op te staan: het bord in of het bord uit. Een leerling die al met de linkerhand meedeed vraagt gelijk: hoe geef je dan aan dat kracht hiernaartoe komt (het bord uit). Docent vraagt iedereen mee te doen en laat uitvoerig zien hoe hier de linkerhandregel toe te passen en komt ook uit op het bord. De leerling herhaalt haar vraag: hoe geef je dat dan aan? Docent tekent en legt nog eens uit wat de afspraak voor vectoren die het bord uitkomen is (cirkel met stip in het midden). Een andere leerling vraagt: maakt het uit waar je die kracht aangeeft. Docent antwoordt dat de kracht op de draad werkt, dus dat je deze vector ook op de draad moet tekenen. Voor de volledigheid herhaalt docent ook nog de formule  $F_L = BIl$  en legt daarbij uit dat de lorentzkracht afhangt van de sterkte van het magneetveld B, de stroomsterkte I en de lengte van het stuk draad dat zich in het B-veld bevindt omdat alleen daarop lorentzkracht werkt.

Docent tekent een elektron dat naar rechts gaat en een B-veld het bord in. Docent benoemt dat een elektron lading heeft en dat als lading beweegt er stroomsterkte is. Een leerling zegt gelijk: maar de stroom gaat toch die kant op?, terwijl ze naar links wijst. Docent bevestigt, tekent de richting van I, geeft aan dat er nu twee van drie bekend zijn (namelijk B en I) en vraagt de leerlingen om allemaal de richting van de lorentzkracht te bepalen. Het is een lastige om met de linkerhandregel na te bootsen vanuit de leerlingen en ze buigen zich in alle bochten, maar komen wel allemaal tot dezelfde conclusie: naar beneden. Docent tekent de baan die het elektron gaat maken en herhaalt dat dit een cirkelbaan moet zijn omdat de kracht altijd loodrecht op de bewegingsrichting (= tegengesteld aan stroomsterkte) blijft werken. De lorentzkracht levert hier dus de middelpuntzoekende kracht. Dus; geladen deeltjes die loodrecht op een magneetveld bewegen maken altijd een cirkelbaan. Docent waarschuwt nog voor de andere situatie als het deeltje positief geladen is, tekent een proton dat naar rechts beweegt en vraagt naar de richting van de stroomsterkte. Een leerling antwoordt gelijk dat die dan ook naar rechts gaat. Docent bevestigt dit en benoemt dat dan de lorentzkracht naar boven werkt en dat positief geladen deeltjes dus een cirkelbeweging in tegengestelde richting maken van negatief geladen deeltjes. Docent checkt of de leerling die beide lessen miste ook hier weer mee is. Leerling mompelt: ik snap dat cirkelgedoe nog niet helemaal. Docent vraagt bij het voorbeeld van het elektron: zie je dat de lorentzkracht naar beneden werkt? Leerling bevestigt dat. Docent benoemt dat het deeltje afbuigt en beredeneert dat de richting van de lorentzkracht een stukje verderop nog steeds loodrecht op de beweging van het deeltje staat. Leerling knikt. Docent benoemt dat de lorentzkracht naar hetzelfde punt blijft wijzen en dat je dan een cirkelbeweging krijgt. Leerling knikt weer. Docent benoemt dat de kracht naar het midden bij cirkelbewegingen de middelpuntzoekende kracht genoemd wordt en dat deze ook van andere krachten kan komen zoals spankracht bij het rondslingeren van iets aan een touw of van gravitatie zoals bij de maan om de aarde. Leerling knikt opnieuw. Tot slot noteert docent de formule voor lorentzkracht op een deeltje  $F_L = Bqv$ . Docent benoemt bij een elektron of proton de lading precies 1 e ofwel  $1,602 \cdot 10^{-19}C$  is, maar dat dat niet altijd zo hoeft te zijn. Bijvoorbeeld bij 2x geïoniseerd calcium  $Ca^{++}$  of bij een inktdruppel die een lading van heel veel elektronen heeft. Een leerling vraagt: waar vind je die waarde van 1 e? Docent antwoordt dat deze in BINAS tabel 7a staat bij het elektrisch ladingsquantum.

*Het is inmiddels lesminuut 40 en docent gaat verder met opgave 33 waar veel vragen over waren. Weliswaar kost het bespreken van huiswerk en activeren voorkennis meer tijd, maar dat is op te vangen in de twee les van deze dag (en vierde van de lessenserie). Het is hier belangrijk om alle leerlingen mee te krijgen en het blijkt weer eens erg lastig om dit conceptuele onderwerp met 1x uitleg te doorgronden.*

Opgave 33 staat na enig knippen en plakken op de whiteboard app op het touchscreen (omdat de opgave in het boek niet op één bladzijde staat). Docent benoemt dat dit weer een 3D weergave is in een plat vlak, dat dit niet altijd op een eenduidige manier gebeurt en dat leerlingen dat wel moeten kunnen doorzien (11). Opgave gaat over een beeldbuis (elektronenstraalbuis) waarbij bij de eerste vraag de elektronen naar beneden afgebogen worden en docent vraagt wat de richting van de lorentzkracht is. Een leerling die vaak gelijk antwoord zegt zo en wijst naar beneden. Docent tekent de lorentzkracht omlaag en vraag vervolgens wat de richting van de stroomsterkte is. Dezelfde leerling vraagt: maar hoe zit dat met dat magneetveld? Ik zie niet waar dat vandaan komt. Docent legt a.d.h.v. de tekening uit dat de twee spoelen links en rechts samen voor een horizontaal magneetveld kunnen zorgen en de twee spoelen boven en beneden voor een verticaal magneetveld kunnen zorgen. Dit blijft erg lastig voor de leerlingen om uit de tekening af te lezen (11). Docent herhaalt dat om uit te vinden hoe het magneetveld bij de eerste vraag staat je twee dingen moeten weten namelijk de kracht en de stroom en vraagt wat is de richting van de stroom als de elektronen het bord in bewegen. Meerdere leerling tegelijk geven aan dat deze dan tegengesteld is en uit het bord komt. Docent tekent de richting van  $I$  bij de al eerder getekende richting van de lorentzkracht en vraagt wat nu de richting van het B-veld is. Meerdere leerlingen doen mee en wijzen aan schuin het bord in. Docent tekent de richting van het B-veld. De volgende vraag is om de stroomrichting in de spoelen op dat moment te bepalen. Docent geeft aan dat dit weer met de rechterhandregel moet gebeuren en dat de richting van het B-veld al bepaald is. Een leerling die niet vaak antwoord doet nu wel mee en vindt met z'n rechterhand de juiste richting. De laatste vraag gaat over de afbuigstromen in de tijd om het beeld te vullen met lijnen van links naar rechts en die vervolgens van boven naar beneden te schrijven. Docent legt daartoe eerst de werking van een beeldbuis en hoe het scherm per schermupdate bestraald wordt met een schets op het whiteboard (N9). Meerdere leerlingen knikken. Docent gebruikt een werkblad bij de opgave om de uitwerking op dezelfde manier op het whiteboard te schetsen. Docent licht toe dat de getekende horizontale afbuigspanning snel verandert van min naar plus en dat de elektronen dus eerst sterk naar links afgebogen worden, dan steeds minder sterkt tot nul (recht door) en dan steeds meer naar rechts tot de uiterste positie. Gevraagd wordt om het verloop in de tijd van de verticale afbuigspanning te schetsen. Docent legt uit dat die begint bij een maximale waarde zodat de bovenste lijn geprojecteerd wordt. Deze blijft constant tijdens het horizontaal afbuigen van links naar rechts. Vervolgens gaat die spanning een stapje omlaag en wordt de twee lijn iets lager geprojecteerd. Enzovoorts. Docent vat samen dat deze opgave behoorlijk complex is omdat ten eerste de 3D weergave doorzien moet worden, dan de werking van een beeldscherm en het opwekken van de verticale en horizontale B-velden om de elektronen op de juiste manier af te buigen en tot slot het verloop in de tijd van de spanning die op de spoelen gezet wordt te bepalen. Docent vraagt of er nog vragen over zijn en geeft aan dat de leerlingen die meestal direct al stellen. Een leerling geeft dat hier geen vragen over te hebben maar wel over opgave vier uit de toepassingsopgaven en of daar deze les nog tijd voor is. Docent kijkt even naar de opgave en zet hem vast op het bord en geeft aan hier het volgende uur mee verder te gaan en dan ook de toepassingen van lorentzkracht (tweede deel van 10.3) en inductiespanning (10.4) te behandelen. Een andere leerling vraagt alvast wat het huiswerk voor maandag is. Docent laat dit alvast zien met de planner op het touchscreen. De meeste leerlingen hebben nu een tussenuur en gaan voor de volgende les op deze dag alvast verder met de opgaven volgens planner en zelf de nieuwe stof bestuderen.

### **Bevindingen op aandachtspunten na videoanalyse van Les 3**

#### **11. Verschillende driedimensionale representaties benoemen**

Bij het bespreken van verwerkingsopgaven uit het gemaakte huiswerk blijkt dat de meeste leerlingen er de 3D contexten niet of niet goed in herkennen. Herhalen van de verschillende mogelijkheden van 3D weergave in een plat vlak en die samen met de leerlingen toepassen kost tijd. Daarna doorgronden al veel meer leerlingen wel de context van de opgaven en is het toepassing van handregel zelf niet meer zo moeilijk (Kirschner et al., 2018).

#### **12. Welke kracht zorgt bij opgave 32 voor de versnelling?**

Bij deze opgave herkenden de meeste leerlingen naast de 3D-weergave ook de natuurkundige context niet. Daarvoor bleek ten eerste het inzicht dat de lorentzkracht hier voor lineaire versnelling zorgt essentieel. Ten tweede was het inzicht dat richting van de stroomsterkte door het projectiel volgt uit de stroomkring die op de spanningsbron is aangesloten (Arons, 1997). Met een goede schets van deze tweede vectoren ( $F$  en  $I$ ) was het bepalen van de richting van  $B$  met de linkerhandregel in deze 3D-weergave niet meer zo moeilijk (Kortland et al., 2017).

#### **14. Een schets maken werkt beter dan woorden bij uitleg**

De bevindingen bij 11 en 12 ondersteunen dat zonder het maken van schetsen de 3D-weergaven én natuurkundige contexten enorm lastig te doorgronden zijn voor leerlingen. Met de schetsen op het whiteboard of nog beter, op het touchscreen over de opgave heen, kunnen veel meer leerlingen de 3D contexten leren doorzien. Wat nog wel lastig voor ze is, is om dat zelf uit te voeren en toe te passen op nieuwe opgaven (Kirschner et al., 2018).

## Lesplan les 4

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen terug en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen hebben huiswerk gemaakt en leggen hun spullen klaar voor de les.
5 – 15	Voorkennis activeren en terugkomen op eventuele vragen uit de verwerkingsopgaven.	Docent controleert het huiswerk en inventariseert of er nog vragen zijn n.a.v. het huiswerk over toepassingen van de lorentzkracht. Docent gebruikt een OLG om op de vragen in te gaan en om de stof te herhalen.	Leerlingen stellen vragen uit hun huiswerk en onderwerpen van de vorige les en doen actief mee met het OLG.
15 – 25	Flux en de component van het magnetische veld loodrecht op de winding.(15).	Docent legt aan de hand van een schets op het bord het concept magnetische flux uit. Daarna maakt docent een tweede schets waarbij het B-veld een hoek maakt met de winding en construeert samen met de leerlingen in een OLG de loodrechte component van het B-veld. Tot slot laat docent zien dat de formule uit BINAS uitgaat van de hoek tussen B-veld en normaal op de winding $\Phi = B \cdot \cos\alpha \cdot A$ en dat het beter is zelf de component te bepalen. Dan gaat het ook goed als de hoek tussen winding en B-veld gegeven is.	Leerlingen stellen hun vragen direct en doen actief mee met het OLG. Leerlingen nemen de schets over in hun schrift en kijken mee in hun BINAS.
25 – 40	Elektromagnetische inductie en het verband tussen fluxverandering en inductiespanning (16). Toepassingen van inductie: draadloos opladen en inductie koken.	Docent laat met de Phet-applet "Faraday's law" zien dat bij veranderende flux een inductiespanning ontstaat. Docent schets op het bord een sinus-achtige grafiek van een flux-verandering tegen de tijd en bepaald samen met de leerlingen in een OLG hoe de inductiespanning zich dan in de tijd gedraagt. Dat is de steilheid van de $(\Phi,t)$ -grafiek. Docent vraagt leerlingen naar draadloos opladen van een mobiel en laat dit vervolgens met een demo zien. Docent vraagt leerlingen hoe een inductiekookplaat zou werken en vult vervolgens de uitleg verder aan.	Leerlingen doen actief mee met de les en met name het OLG over verband tussen fluxverandering en inductiespanning en toepassingen daarvan.

<b>Tijd</b>	<b>Onderwerp</b>	<b>Activiteit docent</b>	<b>Activiteit leerling</b>
40 – 55	Verwerkingsopdrachten maken.	Docent loopt rond en stelt open vragen aan leerlingen over hoe het gaat. Docent kijkt ook hoe leerlingen de uitwerkingen noteren en geeft ze waar nodig feedback.	Leerlingen maken verwerkingsopdrachten aan de hand van de studieplanner. Wat ze niet afkrijgen, maken ze als huiswerk in de studiezaal.
55 – 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen uit de les, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen nemen deel aan het OLG, noteren huiswerk in hun agenda en ruimen hun spullen op.

#### **Uitgewerkte aandachtspunten voorafgaand aan les 4**

15. Zelf vectoren ontbinden met de formule  $\Phi = B_{\perp} \cdot A$  in plaats van met de formule in BINAS

In BINAS (NVON-commissie, 2013) Tabel 35D3, Kolom Overige, staat de formule  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos\alpha$ .

Bij deze formule wordt impliciet uitgegaan van de hoek tussen de normaal van winding (met oppervlakte A) en de richting van het magnetisch veld B. Wanneer in een opgave de hoek tussen de winding zelf en de richting van het magnetisch veld gegeven is, dan moet van die hoek de sinus gebruikt worden en niet de cosinus (Etkina et al., 2006) en (Bransford et al., 2000).

16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning

De inductiespanning is evenredig met de verandering van de flux in de tijd en daarmee wiskundig gezien niets anders dan de afgeleide van de flux. Als analoge context kan het verband tussen plaats en snelheid gebruikt worden. De snelheid is tenslotte afgeleide van de plaats in de tijd. In een grafiek is de afgeleide de steilheid van de lijn van de grafiek en die kan op een tijdstip bepaald worden met de raaklijnmethode (Arons, 1997).

## Videoanalyse les 4

Helaas zijn er geen opnamen van het lesbegin en is bovenstaande niet dan ook niet bruikbaar als data en daarom ook niet gedetailleerd uitgewerkt. Dit les gedeelte duurde 7 minuten.

*0 – 7 min. Lesbegin en voorkennis activeren (zonder opname)*

Docent verwelkomt de leerlingen, laat de studieplanner op het scherm zien en benoemt wat het huiswerk was en wat het plan voor deze les is qua nieuwe stof. Docent benoemt en noteert de onderdelen van de les die aan bod gaan komen met een check box ervoor op het whiteboard. De aandacht van leerlingen gaat van gesprekjes onderling naar de docent en enkele leerlingen openen hun schrift met huiswerk. Docent inventariseert per leerling hoe het huiswerk is gegaan. Meerdere leerlingen geven aan niet uit Toepassing Opgave 4 (Quadrupool Magneten) van Pulsar te komen. Docent bespreekt samen met de leerlingen de vragen uit deze opgave en gaat met name in op het juist interpreteren van de 3D-weergave om daar vervolgens de linkerhandregel op toe te passen om de richting van de lorentzkracht op de elektronen uit de elektronenbundel te bepalen. Docent maakt daartoe een schets van de vectoren voor  $F$ ,  $B$  en  $I$  over het boek op de smart-tv.

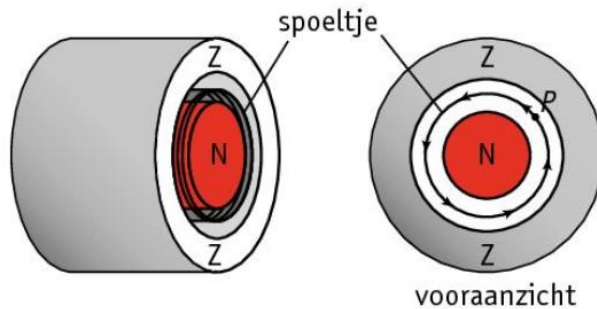
*7 – .. voorkennis activeren (met opname)*

Tijdens het activeren van voorkennis realiseert de docent zich dat de opname nog niet loopt en start deze alsnog. Het tweede deel van het huiswerk waar vragen over waren, is over de toepassingen van de lorentzkracht en dan met name de luidspreker en de elektromotor.

Docent heeft een luidspreker meegenomen en legt uit dat deze geluid genereert door de conus heen en weer te laten bewegen ofwel een trilling te laten uitvoeren. Deze trilling wordt door de lucht doorgegeven en plant zich voort als een golf en brengt vervolgens van de leerlingen het trommelvlies in trilling. De conus wordt bewogen door de lorentzkracht op een spoel in een magneet en kan van richting veranderd worden door de richting van de stroom telkens om te wisselen. Docent gebruikt bij deze uitleg ook een afbeelding uit Pulsar Natuurkunde 5 VWO (zie onder) op de smart-tv met een doorsnede van de spoel in een radiale, permanente magneet. Docent geeft tijdens de uitleg een andere speaker door aan de leerlingen om aan elkaar door te geven. **Leerlingen bekijken de spoel even en geven hem dan telkens door.** Docent legt uit hoe de afbeelding van die radiale, permanente magneet bedoeld is. **Een leerling vraagt op de speaker het ook doet.** Docent bevestigt dat en vraagt of de leerling hem op haar smartphone wil aansluiten en wat muziek wil laten horen. Helaas heeft de leerling een iPhone en die hebben geen jack aansluiting meer. Docent sluit de speaker aan op de school-pc. **Een leerling vraagt of hij kerstmuziek opzet.** Dat doet de docent en de muziek is heel zachtjes te horen. **Leerlingen luisteren heel aandachtig.** Docent legt uit dat normaliter er nog een versterker tussen zit. Hij laat de kerstmuziek zachtjes op staan en gaat verder met z'n uitleg adhv de afbeelding op de smart-tv. Legt nogmaals uit hoe de magneet hier werkt en dat het magneet veld buiten de magneet van ...

**... noord naar zuid gaat, vult een leerling spontaan aan.** Docent schetst op vier plaatsen de vector van het B-veld( van binnen naar buiten) en legt uit hoe de spoel zich daarin bevindt. Hij tekent op dezelfde vier plaatsen de richting van de stroom. Docent vraagt wat je kunt bepalen als je  $B$  en  $I$  gevonden hebt. **Een leerling antwoord zachtjes: de lorentzkracht.** Docent vraagt alle leerling mee te doen en met de linkerhandregel de richting van de lorentzkracht te bepalen met één van de vier punten. **Leerlingen doen allemaal enthousiast mee en vinden dat die het bord in gaat.** Docent benoemt dat ook bij de andere drie punten de lorentzkracht het bord in is gericht en het spoeltje bij die stroomrichting het bord in gaat bewegen. Docent legt uit dat als de stroomrichting omkeert, de lorentzkracht dan ook van richting verandert en het spoeltje de andere kant op gaat bewegen.

Docent laat zien dat de conus aan het spoeltje vast zit en legt uit dat de conus zo in beweging gebracht wordt (Figuur 12 - Figuur 10.41 ).



**Figuur 10.41**

*Figuur 12 - Figuur 10.41 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)*

De muziek is nog steeds zachtjes te horen en hoewel de leerlingen er van genieten gaat de docent verder met de volgende toepassing van lorentzkracht, de stroommeter. Docent plaatst Figuur 13 op het touchscreen.



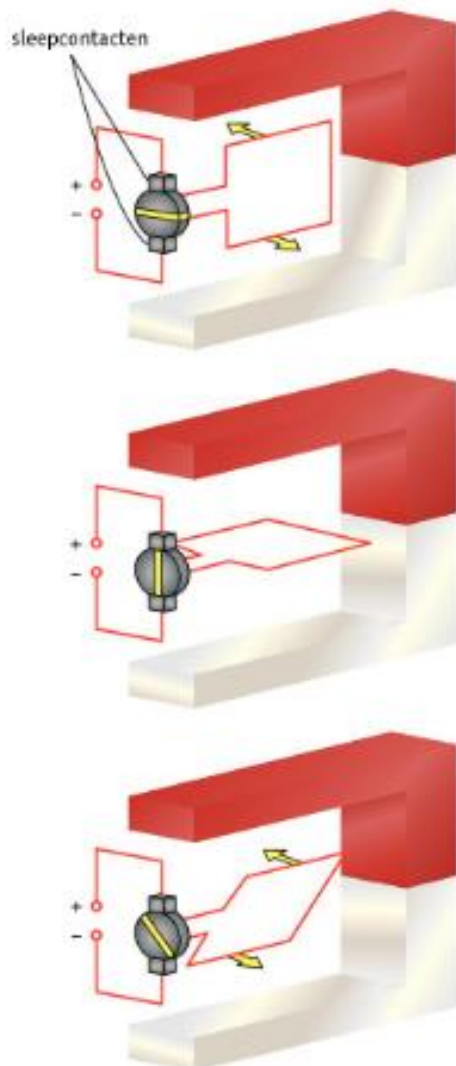
▲ **Figuur 10.42**

*Figuur 13 - Figuur 10.42 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)*

Docent legt uit dat de draad waaraan de spoel hangt een kracht gaat uitoefenen wanneer de spoel de draad verdraaid. **Leerlingen luisteren en zijn stil.** Docent geeft aan dat het magneetveld, van de spoel dat ontstaat door stroom door de spoel, een kracht ondervindt van de permanente magneet en dat dit voor een draaiing om de as van de draad zorgt. Aan deze draad wordt een wijzer verbonden die over een schaalverdeling loopt. **Leerlingen luisteren en zijn nog steeds stil.**



Docent gaat door naar de elektromotor als toepassing van lorentzkracht, laat Figuur 14 zien en vraagt wat je ook alweer nodig hebt om de richting van de lorentzkracht te vinden.



▲ Figuur 10.43 Principe elektromotor

Figuur 14 - Figuur 10.43 (Pulsar Natuurkunde 3e ed vwo 5, 2014)

Een leerling antwoord: die staat toch al getekend? Docent vraagt door naar wat dan precies nodig om die richting te beredeneren. Leerling antwoord magneetveld (en wijst de richting ervan aan) en stroom. Docent tekent op het touchscreen de richting van het magneetveld en beide vectoren voor stroomsterkte in het bovenste en onderste deel van de winding. Docent laat leerlingen vervolgens met de linkerhandregel de richting van de lorentzkracht boven en onder bepalen. De leerlingen doen actief mee en na enig gepuzzel is er consensus over de richting.

Docent vraagt wat er dan met de spoel gaat gebeuren en geeft zelf daarop het antwoord. (beter zou zijn om hier de leerlingen de kans te geven na te denken, maar er is tijdsdruk om het onderwerp helemaal in deze les te behandelen). Een aantal leerlingen doet wel mee met hun handen.

Docent gaat naar de volgende situatie: de spoel is gedraaid door de lorentzkracht en staat nu horizontaal met de lorentzkrachten op 1 lijn en tegengesteld. Een leerling vraagt waarom de spoel eigenlijk gaat draaien. Docent legt dat aan de hand van het vorige plaatje nog een keer uit en de leerling knikt begrijpend. Een andere leerling merkt gelijk op dat de spoel in de tweede situatie dus niet verder draait. Docent bevestigt dat en benoemt dat als er niets zou veranderen de elektromotor

inderdaad niet zou werken. Docent richt nu de aandacht op de collector en laat zien hoe het meedraaiende schijfje ervoor zorgt dat op het juiste moment de stroomrichting in de spoel wordt omgekeerd (en daarmee de lorentzkracht) zodat de elektromotor wel blijft draaien. **Leerlingen kijken aandachtig mee.** Leerlingen stellen verder geen vragen en docent gaat verder met elektromagnetische inductie (op zich had ook hier wel een controlevraag gepast). Docent gebruikt hiervoor de applet Faraday's Law (University of Colorado, Boulder, 2022) en maakt daarbij de veldlijnen van de magneet zichtbaar. Daarmee demonstreert de docent dat er spanning (en stroom bij een stroomkring) ontstaat wanneer het magneetveld door een spoel verandert. **Leerlingen kijken aandachtig toe.** Docent vertelt dat dit principe bijvoorbeeld gebruikt wordt voor het draadloos opladen van een mobiel. Docent heeft een draadloze oplader mee en vraagt of een leerling een draadloos oplaadbare mobiel heeft en die wil opladen. **Een leerling staat gelijk op om mee te doen en legt z'n mobiel op de lader. En inderdaad geeft de mobiel aan nu (draadloos) op te laden.** Docent legt uit dat achter in de iPhone een spoel zit en dat in de lader ook een spoel zit waardoor de stroom telkens van richting verandert en daarmee het magneetveld. Daardoor wisselt het magneetveld door de spoel van de iPhone en daarin ontstaat dan telkens een stroom die gebruikt wordt om op te laden. **Een andere leerling is helemaal perplex en vraagt of dat met elke iPhone kan.** Docent geeft aan dat dat van de versie afhangt en laat de leerling het zelf proberen. **Helaas laadt haar iPhone niet op.** Docent vraagt of de leerlingen nog andere toepassingen van draadloos opladen kennen en **een leerling antwoordt gelijk met: een elektrische tandenborstel.** Docent licht toe hoe dat bij die toepassing werkt met elektromagnetische inductie. **Een leerling vraagt of draadloos opladen duur is.** Dat is in principe helemaal niet zo duur volgens de docent. Docent vraagt of leerlingen thuis ook met inductie koken. **De meeste leerlingen beamen dat met ja, we koken elektrisch.** Als de docent doorvraagt naar het verschil tussen elektrisch en inductie komt er geen duidelijkheid. Docent legt het verschil tussen elektrisch koken (met gloeispiraal) en inductie koken uit. **Een leerling moppert: ja maar dat weten wij toch niet. Er volgen nog wat vragen over hoe je het verschil kunt zien en dat bij inductie de kookplaat toch ook warm wordt.** Docent legt uit dat de pan warm wordt en daardoor de kookplaat ook.

Docent vraagt retorisch waar de grootte van de inductiestroom vanaf hangt en benoemt dat dit afhangt van hoe snel het magnetisch veld verandert, hoeveel windingen de spoel heeft en hoe groot de spoel is (het oppervlakte van de dwarsdoorsnede). Vervolgens introduceert docent het woord magnetische flux als een maat (grootte) voor de hoeveelheid veldlijnen die een spoel 'vangt'. Docent noteert vervolgens de formule  $\Phi = B \cdot A$  met bijbehorende eenheden en introduceert het symbool als de hoofdletter van de Griekse letter phi. Daarna tekent docent en bovenaanzicht van een spoel onder een hoek met een magneetveld en maakt een vectorconstructie om de loodrechte component van het B-veld op de dwarsdoorsnede A van de spoel te vinden. **Leerlingen luisteren en enkele leerlingen schrijven mee.** Docent laat de formule in (NVON-commissie, 2013) zien en geeft aan dat die er impliciet uit gaat dat hier hoek  $\alpha$  de hoek van B-veld met de normaal van de winding met oppervlakte A. Docent geeft het advies om altijd zelf de ontbinding te maken en vervolgens de bekende goniometrie regels (sos cas toa) toe te passen zoals ze dat ook al geleerd hebben voor het ontbinden van krachtvectoren.

Laatste onderwerp van deze les is het verband tussen inductiespanning en fluxverandering. Docent benoemt gelijk dat de inductiespanning daarmee wiskundig gezien niets anders is dan de afgeleide is van de flux. **Enkele leerlingen geven aan dat te herkennen uit de wiskunde, maar er zijn er ook een paar die zeggen er nog niets van te begrijpen.** Docent gebruikt een ander voorbeeld uit de context van mechanica waarbij ook met wiskundige afgeleiden gewerkt wordt. Snelheid is eigenlijk gewoon de afgeleide van plaats en de docent tekent een plaatsgrafiek op het whiteboard en bepaald daaruit de snelheidsgrafiek eronder door telkens naar de helling (afgeleide) van de kijken. Vervolgens past hij

ditzelfde toe op een harmonische trilling door uit het  $(u,t)$ -diagram het  $(v,t)$ -diagram te bepalen. Docent vraagt aan de leerlingen of ze dit inzien en **de leerlingen die het eerst niet goed begrepen knikken nu wel instemmend**. Docent gaat weer terug naar het verband tussen flux en inductiespanning en laat nogmaals zien dat ook hier het verband is dat de inductiespanning de afgeleide is van de flux en dat dus naar de steilheid van het flux-diagram gekeken moet worden om te weten hoe groot de flux is. Helaas is de lestijd bijna voorbij en moeten de leerlingen zelf de verwerkingsopgaven uit het huiswerk maken.

#### Bevindingen op aandachtspunten na videoanalyse van Les 4

15. Zelf vectoren ontbinden met de formule  $\Phi = B_{\perp} \cdot A$  in plaats van met de formule in BINAS

Het eerste probleem dat leerlingen hiermee hebben, is dat ze zich de context driedimensionaal niet goed voor kunnen stellen. Hiervoor zijn bij meerdere aandachtspunten al werkende oplossingen aangedragen en die blijken ook in deze context te werken. Wanneer het driedimensionale inzicht er eenmaal is, kan de stap gezet worden naar het construeren van B-vector en de ontbinding naar  $B_{\perp}$ . Daarna is het toepassen van goniometrie om de grootte van  $B_{\perp}$  te berekenen goed te doen en kan de koppeling naar de formule in BINAS gemaakt worden. (Etkina et al., 2006) en (Bransford et al., 2000).

16. Verband tussen magnetische flux en inductiespanning

Wanneer leerlingen in een andere natuurkundige context het wiskundig verband tussen een grootte en de afgeleide daarvan herkennen, zoals tussen plaats en snelheid, zien ze in dat het verband tussen flux en inductiespanning wiskundig gezien hetzelfde is. Dan zijn de opgaven om bijvoorbeeld het verloop inductiespanning tegen de tijd uit (flux, tijd)-diagram te bepalen ineens niet meer zo moeilijk meer (Arons, 1997).

## Oorspronkelijk geplande lessenserie 2

Deze serie van vier lessen was oorspronkelijk gepland om te geven als lessenserie 2, met daarin voorgestelde verbeteringen op de onderzoeksvragen. Vanwege omstandigheden (lesuitval door ziekte docent én leerlingen die zelfstandig met de studieplanner doorwerkten) heeft de docent deze lessenserie kort tevoren aangepast om op die omstandigheden in spelen. Onderstaande lessenserie kan als basis dienen voor toekomstig gebruik.

### Oorspronkelijk lesplan lessenserie 2 - les 1

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen gaan zitten en leggen hun spullen voor de les klaar.
5 – 15	Afsluiten vorig domein (Informatieoverdracht), huiswerkcontrole, eventuele vragen daarbij centraal bespreken en herhalen leerdoelen vorige les middels OLG. Door de kleine klasomvang is dit veelal goed aan te passen op de behoeften individuele leerlingen.	Docent controleert het huiswerk en vraagt daarbij naar eventuele problemen met huiswerkopgaven en leerstof. De genoemde problemen worden centraal met de groep besproken. Daarbij herhaalt de docent de leerdoelen van de vorige les middels een OLG.	Bij huiswerk controle kan de leerling vragen stellen. Weer centraal nemen leerlingen deel aan het OLG.
15 – 20	Voorkennis activeren over magnetisme. - Wat weten jullie van magnetisme? - Welke magnetische verschijnselen kennen jullie? - Welke andere krachten die op afstand werken kennen jullie (3)?	Voorkennis wordt geactiveerd middels OLG. Docent stelt vragen en stimuleert discussie.	Leerlingen geven antwoord, en gaan onder voorzitterschap van docent met elkaar in groepsdiscussie.
20 – 30	Demonstratie met bordenwisser op whiteboard (2) en paperclips (5). Instructie nieuwe stof a.d.h.v. het boek over permanente magneten (1.) en magnetische influentie. Enkele demonstraties met magneetkoffer en inclinatieaald (4).	Docent demonstreert magnetisme met de bordenwisser en ligt de basisbegrippen toe. Docent demonstreert magnetische influentie met de bordenwisser en paperclips. Docent demonstreert met de magneetkoffer en gebruikt de inclinatieaald als kompas. Docent vraagt de leerlingen in welke richting het noorden ligt en controleert dat samen met ze met Google Maps en de inclinatieaald. Docent vraagt of dit klopt bij de stand van de zon.	Leerlingen kijken toe en stellen spontaan hun vragen, dus zonder hand opsteken. Leerlingen hebben hun boek open op de juiste bladzijde. Leerlingen luisteren actief en denken hardop mee over waar het noorden ligt en hoe dat te vinden. Leerlingen ervaren dat kompasnaald met noordpool naar het geografische noorden wijst.

<b>Tijd</b>	<b>Onderwerp</b>	<b>Activiteit docent</b>	<b>Activiteit leerling</b>
30 – 40	Leerlingen krijgen korte instructie van opdrachten die ze met magneetkoffer kunnen doen. Daarna kunnen ze nog vrij verder experimenteren, bijvoorbeeld het effect van de afstand van een magneet tot de inclinatieaald.	Docent begeleidt leerlingen bij onderzoekend leren van magnetische fenomenen. Docent loopt rond met de inclinatieaald als kompas en laat per tafel van 2 leerlingen zien dat het kompas het totale magneetveld van aarde en hun magneet aanwijst door afstand tot de magneet te variëren.	Leerlingen onderzoeken de werking van magneten uit de magneetkoffer. Eén van de magneten kan roteren op tafel als een magneet. Leerlingen onderzoeken ook vrij en stellen spontaan hun vragen. Dit kan vanwege de kleine klasomvang. Enkele magneetstaven zijn gebroken, daarmee is goed te onderzoeken dat die delen zelf ook weer dipool zijn.
40 – 45	Aardmagnetisch veld uitleggen en demonstreren met inclinatieaald. Toelichten dat een kompas alleen de horizontale component laat zien ervan laat zien. Leerlingen hierbij zelf laten ontdekken dat magnetische zuidpool zich op de geografische noordpool bevindt.	Docent tekent magnetisch veld van permanente magneet. Legt daarbij verband tussen richting magneetveld en richting kompasnaald. Docent tekent aarde met z'n magneetveld en gebruikt een kompasnaald bij z'n uitleg om te bepalen waar magnetische polen liggen middels OLG. Docent laat zien dat het aardmagnetisch veld een hoek met de horizontaal maakt met de inclinatieaald en tekent dit ook op het bord.	Leerlingen luisteren actief en mogen vragen stellen door de uitleg heen. Dit kan vanwege de kleine klasomvang. Als het goed is ontdekken leerlingen in dit OLG dat de magnetische zuidpool zich op de geografische noordpool bevindt. Leerling zien in dat de inclinatie van het magnetisch veld van de aarde op onze breedtegraad rond de 65 graden ligt.
45 - 55	Verwerkingsfase middels maken van opdrachten	Docent neemt magneetkoffers weer in en is daarna beschikbaar voor vragen. Docent loopt rond en vraagt regelmatig hoe het gaat.	Leerlingen maken de eerste opgaven uit het huiswerk en stellen direct vragen wanneer die opkomen. Vanwege kleine klas, kan dit vrijwel altijd direct en zonder handopsteken.
55 - 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerling neemt deel aan OLG, noteert huiswerk en ruimt spullen op.

## Oorspronkelijk lesplan lessenserie 2 - les 2

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen terug en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen hadden hiervoor een studie-uur en hebben aan natuurkunde gewerkt. Leerlingen gaan zitten en leggen hun spullen klaar voor.
5 – 15	Voorkennis activeren en terugkomen op eventuele vragen uit de verwerkingsopgaven.	Docent controleert het huiswerk en inventariseert of er nog vragen zijn n.a.v. het huiswerk. Docent herhaalt mede daarmee kort de behandelde magnetische concepten uit de vorige les in de vorm van een OLG.	Leerlingen stellen vragen uit hun huiswerk en onderwerpen van de vorige les en doen actief mee met het OLG..
15 – 30	Elektromagnetisme. Magneetveld rond een draad (6), een spoel als magneet (7) en 3D redeneren en denken met rechterhandregel.	Docent demonstreert met een video dat rond een stroomvoerende draad een magnetische veld ontstaat en laat illustraties erover uit het leerboek zien. Docent legt met een schets op het bord uit hoe de richting de van het B-veld te bepalen is en laat de leerlingen dit op een nieuwe schets toepassen met de rechterhandregel. Docent schetst vervolgens wat er gebeurt met het B-veld bij een tot spoel gewikkelde draad, legt uit hoe de rechterhandregel hier toe te passen en laat de leerlingen dat zelf op een nieuwe schets toepassen. Docent laat adhv voorbeelden uit het boek zien, hoe in 3D te redeneren en vraagt in een OLG wat er zou gebeuren bij veranderen van stroomrichting en wikkelrichting van de spoel.	Leerlingen luisteren actief en passen actief de rechterhandregel toe op de verwerkingsopdrachten van de docent bij een stroomvoerende draad en een spoel. Leerlingen doen actief mee aan het OLG en stellen hun vragen spontaan tijdens de uitleg. Leerlingen denken hardop mee bij het maken van opgave 24.
30-40	Werking van een relais (8).	Docent laat zien hoe een relais werkt adhv bron 7 uit het boek en benoemt welke toepassingen er zoal zijn (wissels bij NS, knipperlicht in een auto) en waarom die er zijn. Docent maakt in een OLG samen met de leerlingen opgave 24,	Leerlingen luisteren en stellen spontaan hun vragen tijdens de uitleg.

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
40 - 55	Lorentzkracht op een stroomvoerende draad (9). 3D redeneren en denken met linkerhandregel (10). Lorentzkracht op een geladen deeltje en de cirkelbaan (13)	Docent demonstreert de lorentzkracht tussen stroomvoerende draden met een video ( <a href="https://youtu.be/43AeuDvWcOk">https://youtu.be/43AeuDvWcOk</a> ) en licht dit vervolgens toe met een schets op het whiteboard en de linkerhandregel. Tekent vervolgens een paar situaties op het bord om de linkerhandregel toe te passen (telkens de richting van 2 van de drie grootheden gegeven). Docent past nu ook de lorentzkracht toe op een geladen deeltje door daarbij eerst de stroomrichting te bepalen en schetst vervolgens weer een aantal voorbeelden om mee te oefenen. Docent laat in een OLG de leerlingen ontdekken dat een geladen deeltje wel een cirkelbaan MOET gaan maken, omdat de lorentzkracht altijd loodrecht op de bewegingsrichting staat.	Leerlingen luisteren aandacht en doen actief mee met de oefeningen met de linkerhandregel voor een stroomvoerende draad en een bewegend geladen deeltje in een homogeen magnetisch veld. Leerlingen doen mee met het OLG over de cirkelbaan van een geladen deeltjes in een homogeen magnetisch veld.
55 - 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen uit de les, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen nemen deel aan het OLG, noteren huiswerk in hun agenda en ruimen hun spullen op.



### Oorspronkelijk lesplan lessenserie 2 - les 3

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen terug en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen hebben huiswerk gemaakt en leggen hun spullen klaar voor de les.
5 – 15	Voorkennis activeren en terugkomen op eventuele vragen uit de verwerkingsopgaven. Uit ervaring blijkt dat hier veelal vragen zijn over hoe de verschillende 3D-representaties uit opgaven te interpreteren en toe te passen (11).	Docent controleert het huiswerk en inventariseert of er nog vragen zijn n.a.v. het huiswerk. Docent herhaalt aan de hand daarvan kort de behandelde concepten over de lorentzkracht in de vorm van een OLG en neemt daarbij het omgaan met de verschillende 3D-representaties mee.	Leerlingen stellen vragen uit hun huiswerk en onderwerpen van de vorige les en doen actief mee met het OLG.
15 – 25	Toepassingen van lorentzkracht: de luidspreker met demo en het interpreteren van de 3D-weergave uit het boek (11) middels een schets (14).	Docent laat de werking van een luidspreker zien met lorentzkracht aan de hand van een schets uit het boek zien. De 3D-weergave wordt samen met de leerlingen in een OLG uitgewerkt middels een schets over het boek heen. Docent demonstreert dit vervolgens met een luidspreker gekoppeld aan de school-pc en benoemt dat ook 'oortjes' van leerlingen op dit principe werken.	Leerlingen doen actief mee aan het OLG en stellen spontaan hun vragen gedurende het eerste deel met uitleg.
30 – 40	Toepassingen van lorentzkracht: elektromotor en het interpreteren van de 3D-weergaven erbij uit het boek (11) middels een schets (14).	Docent laat de werking van een elektromotor zien met een schets over de illustraties in het leerboek heen (14)	Leerlingen doen actief mee aan het OLG en stellen spontaan hun vragen gedurende het eerste deel met uitleg.
40 – 55	Verwerkingsopdrachten maken.	Docent loopt rond en stelt open vragen aan leerlingen over hoe het gaat. Docent kijkt ook hoe leerlingen de uitwerkingen noteren en geeft ze waar nodig feedback.	Leerlingen maken verwerkingsopdrachten aan de hand van de studieplanner. Wat ze niet afkrijgen, maken ze als huiswerk in de studiezaal.
55 – 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen uit de les, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen nemen deel aan het OLG, noteren huiswerk in hun agenda en ruimen hun spullen op.

## Oorspronkelijk lesplan lessenserie 2 - les 4

Tijd	Onderwerp	Activiteit docent	Activiteit leerling
0 – 5	Intro les	Docent verwelkomt leerlingen terug en benoemt lesinhoud a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen hebben huiswerk gemaakt en leggen hun spullen klaar voor de les.
5 – 15	Voorkennis activeren en terugkomen op eventuele vragen uit de verwerkingsopgaven.	Docent controleert het huiswerk en inventariseert of er nog vragen zijn n.a.v. het huiswerk over toepassingen van de Lorentzkracht. Docent gebruikt een OLG om op de vragen in te gaan en om de stof te herhalen.	Leerlingen stellen vragen uit hun huiswerk en onderwerpen van de vorige les en doen actief mee met het OLG.
15 – 25	Flux en de component van het magnetische veld loodrecht op de winding.(15).	Docent legt aan de hand van een schets op het bord het concept magnetische flux uit. Daarna maakt docent een tweede schets waarbij het B-veld een hoek maakt met de winding en construeert samen met de leerlingen in een OLG de loodrechte component van het B-veld. Tot slot laat docent zien dat de formule uit BINAS uitgaat van de hoek tussen B-veld en normaal op de winding $\Phi = B \cdot \cos\alpha \cdot A$ en dat het beter is zelf de component te bepalen. Dan gaat het ook goed als de hoek tussen winding en B-veld gegeven is.	Leerlingen stellen hun vragen direct en doen actief mee met het OLG. Leerlingen nemen de schets over in hun schrift en kijken mee in hun BINAS.
25 – 40	Elektromagnetische inductie en het verband tussen fluxverandering en inductiespanning (16). Toepassingen van inductie: draadloos opladen en inductie koken.	Docent laat met (University of Colorado, Boulder, 2022) zien dat bij veranderende flux een inductiespanning ontstaat. Docent schets op het bord een sinus-achtige grafiek van een flux-verandering tegen de tijd en bepaald samen met de leerlingen in een OLG hoe de inductiespanning zich dan in de tijd gedraagt. Dat is de steilheid van de $(\Phi, t)$ -grafiek). Docent vraagt leerlingen naar draadloos opladen van een mobiel en laat dit vervolgens met een demo zien. Docent vraagt leerlingen hoe een inductiekookplaat zou werken en vult vervolgens de uitleg verder aan.	Leerlingen doen actief mee met de les en met name het OLG over verband tussen fluxverandering en inductiespanning en toepassingen daarvan.

<b>Tijd</b>	<b>Onderwerp</b>	<b>Activiteit docent</b>	<b>Activiteit leerling</b>
40 – 55	Verwerkingsopdrachten maken.	Docent loopt rond en stelt open vragen aan leerlingen over hoe het gaat. Docent kijkt ook hoe leerlingen de uitwerkingen noteren en geeft ze waar nodig feedback.	Leerlingen maken verwerkingsopdrachten aan de hand van de studieplanner. Wat ze niet afkrijgen, maken ze als huiswerk in de studiezaal.
55 – 60	Leseinde	Docent herhaalt leerdoelen uit de les, indien de tijd het toelaat in een OLG. Docent benoemt huiswerk a.d.h.v. studieplanner.	Leerlingen nemen deel aan het OLG, noteren huiswerk in hun agenda en ruimen hun spullen op.

UNIVERSITY OF TWENTE  
Drienerloaan 5  
7522 NB Enschede

P.O.Box 217  
7500 AE Enschede

P +31 (0)53 489 9111

[info@utwente.nl](mailto:info@utwente.nl)  
[www.utwente.nl](http://www.utwente.nl)