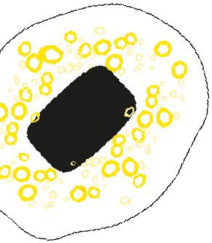


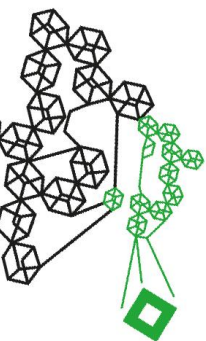
UNIVERSITY OF TWENTE.



Ontwikkeling van een simulatie om conceptuele begripsvorming over elektrische en magnetische velden te stimuleren

Onderzoek van Onderwijs (10 EC) – Natuurkunde

Merel Wevers



Beoordelaars: Henk Pol en Wim Nijhuis

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Praktijkprobleem	4
1.2	Mogelijke oplossingen	4
1.3	Keuze in dit ontwerponderzoek: simulatie	5
1.4	Randvoorwaarden	6
1.5	Opzet van het ontwerponderzoek	6
2	Methode	7
2.1	Ontwerpfase	8
2.2	Onderzoeksfase	9
3	Ontwerpfase	11
3.1	Simulatie	11
3.1.1	Ontwerpeisen	11
3.1.2	Ontwerp	13
3.1.3	Expertreview en functionaliteitenreview	19
3.2	Leeractiviteit	20
3.2.1	Ontwerpeisen	20
3.2.2	Ontwerp	21
3.3	Docentenhandleiding	25
3.3.1	Ontwerpeisen	25
3.3.2	Ontwerp	25
4	Onderzoeksfase	27
4.1	Pre- en posttest	27
4.2	Leerlingreviews	29
4.2.1	Niveau 1 - <i>Doen</i>	29
4.2.2	Niveau 2 - <i>Leren</i>	29
4.2.3	Simulatie	30
4.2.4	Algemeen	31
5	Conclusie en discussie	32

1 Inleiding

1.1 Praktijkprobleem

De aanleiding van dit ontwerponderzoek is de constatering dat bovenbouwleerlingen het over het algemeen lastig vinden om operationeel onderscheid te maken tussen elektrische en magnetische velden (Arons, 1997). Dit is onder andere geconstateerd door mijn vakcoach, die aangeeft dat het op zowel zijn vorige school (Het Vlier in Deventer) als op Het Stedelijk College Zuid in Enschede een terugkerend probleem is.

De begripsmoeilijkheid uit zich in verschillende onjuiste leerlingdenkbeelden, zoals het idee dat positieve lading wordt afgestoten door een noordpool of de aanname dat stilstaande lading wordt aangetrokken of afgestoten door een stroomvoerende draad of magneet (Arons, 1997). De kern van het probleem is dat leerlingen onvoldoende inzicht hebben in het feit dat de magnetische kracht op een lading (1) alleen wordt uitgeoefend als de lading beweegt en (2) loodrecht staat op zowel de bewegingsrichting als de richting van het magnetisch veld. De elektrische kracht werkt daarentegen (1) op zowel stilstaande als bewegende lading en (2) in de richting van het elektrisch veld. De aard van de magnetische kracht op een lading is dus fundamenteel anders dan die van de elektrische kracht op een lading, die meer overeenkomsten heeft met de eerder behandelde en intuïtief meer voor de hand liggende krachten (Arons, 1997).

Een gevolg van de aard van elektrische en magnetische velden is dat elektrische velden in staat zijn om een geladen deeltje zowel af te buigen als te versnellen, terwijl magnetische velden deeltjes alleen kunnen afbuigen en niet versnellen. Door het gebrek aan inzicht in het fundamentele verschil tussen elektrische en magnetische velden is ook dit iets waar leerlingen moeite mee hebben, wat zich onder andere uit in moeilijkheden bij het voorspellen van de baan van een (bewegende) lading in een elektrisch of magnetisch veld (Arons, 1997).

Verder is het voor leerlingen lastig te begrijpen dat een elektrisch veld alleen een kracht kan uitoefenen op een lading en een magnetisch veld zowel een kracht kan uitoefenen op een bewegende lading als op een magneet. De twee 'soorten' magnetische krachten lijken voor leerlingen totaal verschillend te zijn, doordat in het voortgezet onderwijs magnetische dipolen niet worden geassocieerd met bewegende lading. Bovendien wordt er door leerlingen niet goed onderscheid gemaakt tussen de elektrische kracht op een lading en de magnetische kracht op een magneet, waarbij het fundamentele verschil wordt veroorzaakt doordat er geen magnetische maar wel elektrische monopolen bestaan.

Een bijkomend (maar minder fundamenteel) probleem is dat leerlingen moeilijkheden ervaren bij het toepassen van de linker- en rechterhandregels bij magnetische velden, wat wordt veroorzaakt door een gebrek aan oefening in alle mogelijke oriëntaties en variaties (Arons, 1997).

1.2 Mogelijke oplossingen

Een mogelijke oplossing voor het beschreven praktijkprobleem is om leerlingen de mogelijkheid te geven om visuele (en tastbare) waarnemingen te doen van de natuurkundige verschijnselen (Arons, 1997) en deze bij voorkeur ook te beïnvloeden en te verklaren (Adams et al., 2008a; Rutten et al., 2012) om daarmee de conceptuele begripsvorming te stimuleren.

Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan in de vorm van een klassikale demonstratie, zoals een demonstratie van de kracht op een stroomvoerende draad in een homogeen magneetveld (Arons, 1997). Het

nadeel van een klassikale demonstratie is echter dat leerlingen het verschijnsel alleen visueel kunnen waarnemen en dus niet zelf kunnen voelen of beïnvloeden.

Dit is wel mogelijk bij een leerlingpracticum waarin leerlingen zelf fysieke experimenten uitvoeren, zoals het experiment van Oersted (Arons, 1997). In deze situatie is het echter maar beperkt mogelijk om de koppeling met de theorie te maken, onder andere doordat niet alle verschijnselen of situaties te illustreren zijn met een experiment en doordat magneetvelden, ladingen en krachten niet zichtbaar zijn.

Een simulatie kan in dit geval uitkomst bieden. Een simulatie wordt gedefinieerd als een computerprogramma dat een model bevat van een systeem of proces en onderscheidt zich van een animatie door het feit dat in een simulatie interactie mogelijk is (Rutten et al., 2012) en de gebruiker dus invloed kan uitoefenen op het verloop. Onderzoek heeft uitgewezen dat simulaties de conceptuele begripsvorming van leerlingen kunnen bevorderen, waardoor ze de concepten niet alleen kunnen uitleggen, maar ook gebruiken om juiste voorspellingen te doen in zowel de simulatie als in de echte wereld (Adams et al., 2008a; Rutten et al., 2012). Uit onderzoek blijkt daarnaast dat leerlingen door het interactieve element van een simulatie verbanden kunnen leggen en nieuwe inzichten krijgen (Adams et al., 2008a). Dit geeft aan dat de interactie essentieel is voor de conceptuele begripsvorming.

Een geavanceerde toepassing van een simulatie is virtual of mixed reality, wat beide meer diepgang kan geven aan een simulatie. De mogelijkheid om tastbare feedback of fysieke componenten te integreren in de simulatie en daarmee een koppeling met de werkelijkheid te maken kan leiden tot betere leerresultaten en een hogere motivatie (Rutten et al., 2012). Ook een educatieve game kan bijdragen aan de begripsvorming en de motivatie bevorderen (Rutten et al., 2012).

1.3 Keuze in dit ontwerponderzoek: simulatie

In dit ontwerponderzoek is ervoor gekozen een simulatie te ontwikkelen om de conceptuele begripsvorming van leerlingen over elektrische en magnetische velden te stimuleren en daarmee het hierboven beschreven begripsprobleem aan te pakken. Deze keuze is gemaakt, omdat het gebruik van een simulatie verschillende voordelen heeft (Rutten et al., 2012).

Ten eerste kunnen met behulp van een simulatie abstracte of niet-waarneembare verschijnselen worden gevisualiseerd aan de hand van verschillende representaties, zoals diagrammen of vectoren. Zo kunnen bijvoorbeeld magnetische velden en krachten zichtbaar worden gemaakt. Ten tweede geven simulaties een mogelijkheid tot interactie met een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, waarin ongewenste effecten of onnauwkeurigheden geen rol spelen en het geïllustreerde verschijnsel beter naar voren komt. Daarnaast is het in een simulatie mogelijk om de tijdschaal aan te passen van verschijnselen die in werkelijkheid te lang of te kort duren om waar te kunnen nemen. Bovendien kunnen in een simulatie eenvoudig parameters worden aangepast en kan het effect hiervan voorspeld en waargenomen worden, zodat leerlingen de mogelijkheid hebben om systematisch en efficiënt hypothesen te toetsen.

Vanwege deze voordelen is er in dit ontwerponderzoek voor gekozen om een simulatie te ontwikkelen en in te zetten om het praktijkprobleem aan te pakken. In het ontwerponderzoek is er daarnaast voor gekozen om geen gebruik te maken van de mogelijkheden van mixed of virtual reality of een educatieve game, vanwege de beperkte duur van het onderzoek. Wel zijn naast de simulatie ook een bijbehorende leeractiviteit en docentenhandleiding ontwikkeld.

1.4 Randvoorwaarden

Naast het ontwerp van de simulatie zelf hangt de effectiviteit van de simulatie bij de conceptuele begripsvorming af van de wijze waarop de simulatie wordt toegepast in de lespraktijk in de vorm van een leeractiviteit.

Een eerste invloedrijke factor is de positie die de leeractiviteit inneemt in de lessenserie of het curriculum (Rutten et al., 2012). Dit beïnvloedt onder andere het niveau waarop de leeractiviteit kan worden aangeboden en de voorkennis die leerlingen hebben wanneer ze de simulatie gebruiken. Uit onderzoek blijkt dat enige voorkennis van het verband tussen de relevante variabelen noodzakelijk is voor effectief onderzoekend leren (Rutten et al., 2012). Aan de andere kant kan te veel voorkennis ervoor zorgen dat leerlingen in de 'performance mode' (prestatiemodus) komen wanneer ze denken dat ze de stof al zouden moeten beheersen en dit hindert leerlingen juist bij het aannemen van een actieve leerhouding (Adams et al., 2008a).

Een andere factor die van invloed is op de effectiviteit van de simulatie bij de conceptuele begripsvorming is de vormgeving van de leeractiviteit waar de simulatie onderdeel van is. Voor de motivatie is het belangrijk dat er heldere leerdoelen voor leerlingen worden geformuleerd (Adams et al., 2008a). Deze leerdoelen worden impliciet verwerkt bij het ontwerp van de simulatie, maar moeten expliciet gemaakt worden bij het ontwerp van de bijbehorende leeractiviteit. Onder de vormgeving van de leeractiviteit valt ook de wijze waarop de simulatie wordt ingezet. Dit kan onder andere in de vorm van een demonstratie of een leerlingpracticum zijn en het leerlingpracticum kan individueel of in groepjes worden uitgevoerd.

Als laatste heeft de mate van sturing invloed op de effectiviteit van de leeractiviteit. Deze sturing kan worden aangeboden in de vorm van begeleidende opdrachten die de aandacht van de leerlingen kunnen richten op de relevante aspecten van de simulatie (Adams et al., 2008a). Ook de docent kan bij de leeractiviteit een begeleidende rol spelen.

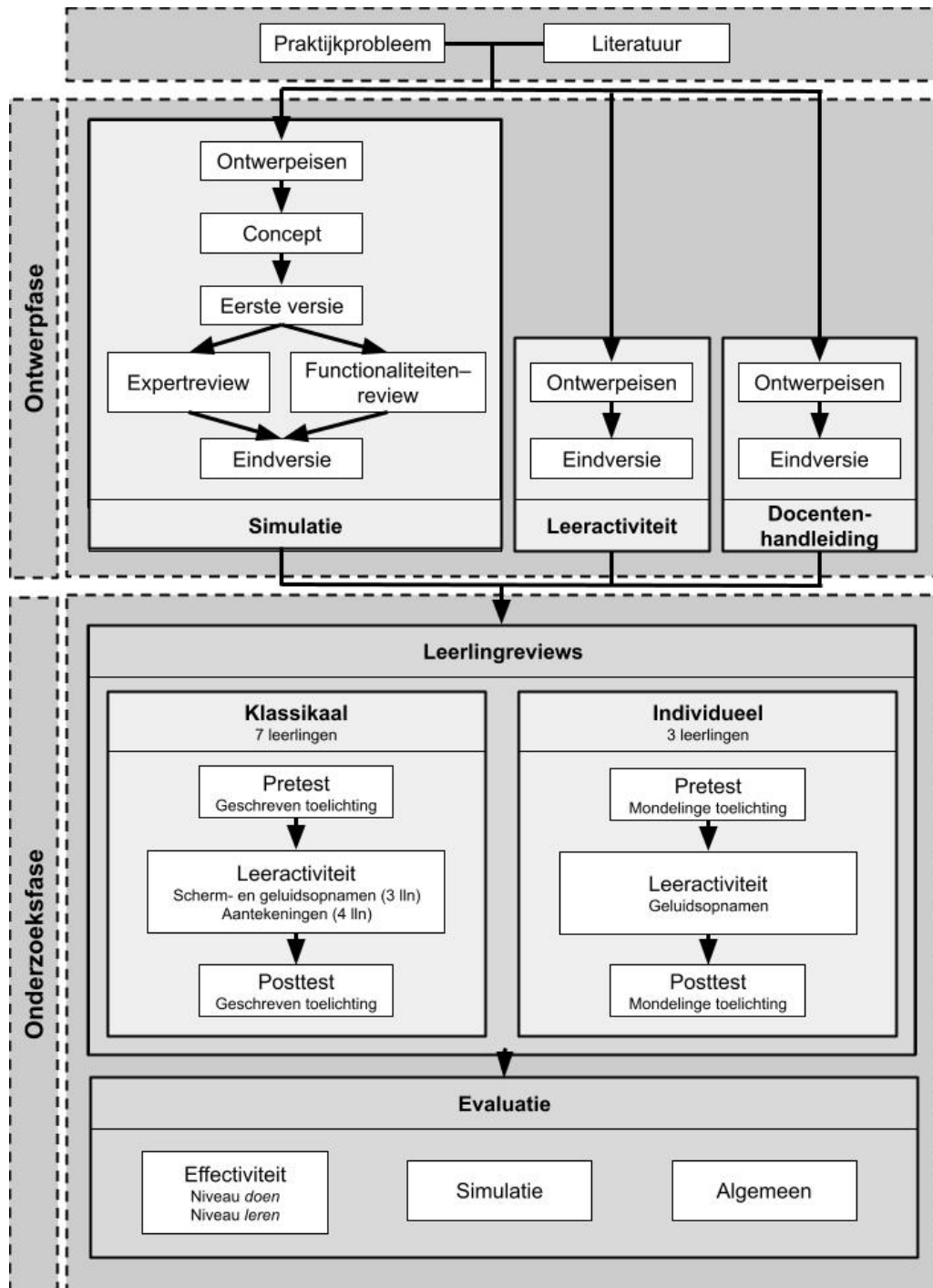
1.5 Opzet van het ontwerponderzoek

In dit ontwerponderzoek is een simulatie ontwikkeld om de conceptuele begripsvorming over elektrische en magnetische velden bij leerlingen te stimuleren. Daarnaast is een bijbehorende leeractiviteit ontwikkeld die zorgt voor sturing bij het gebruik van de simulatie. Bovendien is een docenthandleiding geschreven om docenten te helpen bij het begeleiden van de leeractiviteit. Vervolgens is de effectiviteit van de simulatie en bijbehorende leeractiviteit bij de conceptuele begripsvorming geëvalueerd onder specifieke omstandigheden en in een specifieke context.

In dit ontwerponderzoek is de ontwikkelde leeractiviteit specifiek gericht op leerlingen uit vwo 6, met wie in het voorgaande jaar elektromagnetisme is behandeld en eerder ditzelfde schooljaar het onderwerp is herhaald. Bij deze klas is ook door mijn vakcoach geconstateerd dat de beschreven begripsmoeilijkheden voorkomen. De leeractiviteit is ingezet als voorbereiding op het eindexamen. Hier is voor gekozen omdat het vanwege de timing van het ontwerponderzoek in relatie tot het PTA op College Zuid niet mogelijk was om de simulatie klassikaal in te zetten bij vwo 5 op het moment dat elektromagnetisme voor het eerst behandeld wordt. De verwachting was daarnaast dat de simulatie en de bijbehorende leeractiviteit bij vwo 6 tot betere begripsvorming zou leiden, omdat de leerlingen al bekend waren met het onderwerp. Bovendien was de verwachting dat de input van deze leerlingen voor het onderzoek waardevoller zou zijn, omdat ze door hun voorkennis ook inhoudelijke feedback konden geven.

2 Methode

Het ontwerponderzoek is uitgevoerd in twee opeenvolgende fasen. Een schematisch overzicht hiervan is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Methode

De eerste fase was de ontwerpfase, waarin de simulatie en bijbehorende leeractiviteit zijn ontwikkeld. In deze fase stond de vraag centraal hoe de simulatie en leeractiviteit vormgegeven moesten

worden om de conceptuele begripsvorming over elektrische en magnetische velden bij leerlingen te stimuleren.

De tweede fase van het ontwerponderzoek was de onderzoeksfase, waarin de effectiviteit van de ontwikkelde simulatie en bijbehorende leeractiviteit werden geëvalueerd. In deze fase stond de vraag centraal in hoeverre de ontwikkelde simulatie en bijbehorende leeractiviteit in een specifieke context daadwerkelijk bij leerlingen bijdragen aan de conceptuele begripsvorming over elektrische en magnetische velden.

2.1 Ontwerpfase

De ontwerpfase van het ontwerponderzoek bestond uit meerdere ontwerpcycli voor het ontwerpen van de simulatie. Bij de start van de eerste ontwerpcyclus is aan de hand van een literatuurstudie en op basis van een analyse van het praktijkprobleem een programma van ontwerpeisen opgesteld. Aan de hand van deze ontwerpeisen is een eerste concept-ontwerp ontwikkeld. Dit concept is vervolgens besproken met de vakcoach en op basis hiervan verder uitgewerkt.

Het concept is vervolgens stap voor stap in Java geïmplementeerd tot een werkende eerste versie van de simulatie. Tijdens de ontwikkelen van deze eerste versie is de (nog incomplete) simulatie meermaals besproken met de vakcoach, zodat in een vroeg stadium eventuele fouten uit de simulatie gehaald konden worden en verdere wensen of verbeterpunten opgenomen konden worden in het ontwikkelproces. Dit leidde uiteindelijk tot een eerste versie van de simulatie waarin alle functionaliteiten verwerkt waren.

De praktische bruikbaarheid van deze eerste versie is geëvalueerd aan de hand van een *expertreview* door de vakcoach. Tijdens deze *expertreview* bediende de vakcoach zelf de simulatie, terwijl de onderzoeker observeerde. Zowel op basis van de feedback van de vakcoach als op basis van de observaties van de onderzoeker is een lijst met verbeterpunten opgesteld. Tijdens deze *expertreview* werd vooral gekeken naar aspecten die de simulatie didactisch effectief zou maken.

De eerste versie is ook geëvalueerd aan de hand van een *functionaliteitenreview* door een tweede-graads natuurkunde-docent. Het doel van deze *functionaliteitenreview* was om te evalueren of de simulatie intuïtief was in het gebruik en alle functionaliteiten op de juiste manier werkten. Om deze reden was de reviewer iemand die de simulatie tijdens de *functionaliteitenreview* voor het eerst zag en gebruikte, in tegenstelling tot de vakcoach bij de *expertreview*. Ook bij deze *functionaliteitenreview* bediende de reviewer zelf de simulatie terwijl de onderzoeker observeerde. Op basis van deze *functionaliteitenreview* is de lijst met verbeterpunten verder aangevuld.

De verbeterpunten zijn vervolgens geïmplementeerd. Dit leidde tot de definitieve versie van de simulatie.

Op basis een literatuurstudie en de analyse van het praktijkprobleem zijn daarnaast de ontwerpeisen opgesteld voor de leeractiviteit en docentenhandleiding. Aan de hand hiervan zijn vervolgens ook de leeractiviteit en docentenhandleiding ontwikkeld die aansluiten bij de ontworpen simulatie.

Bij de ontwerpfase zijn geen leerlingen betrokken vanwege het beperkte aantal leerlingen dat deel kon nemen aan het onderzoek. Deze leerlingen hebben deelgenomen aan de onderzoeksfase en niet aan de ontwerpfase, omdat de verwachting was dat hun input tijdens de onderzoeksfase waardevoller zou zijn.

2.2 Onderzoeksfase

Om de effectiviteit van de simulatie en bijbehorende leeractiviteit te evalueren, in de context beschreven in Paragraaf 1.5, zijn zogenaamde *leerlingreviews* uitgevoerd. Deze *leerlingreviews* waren van belang, omdat experts (zoals bij de *expertreview*) over het algemeen minder snel irrelevante of misleidende informatie ontdekken in een simulatie (Adams et al., 2008b) en omdat de *leerlingreviews* het dichtst bij de praktijksituatie komen waarvoor de simulatie en leeractiviteit zijn ontworpen. Er zijn twee verschillende vormen van de *leerlingreviews* uitgevoerd: de *individuele leerlingreview* en de *klassikale leerlingreview*.

Voorafgaand aan de *leerlingreviews* heeft de onderzoeker klassikaal de simulatie en de leeractiviteit geïntroduceerd en leerlingen gevraagd om deel te nemen aan de *individuele leerlingreviews*. Alle leerlingen kregen hierbij een brief waarin het onderzoek verder werd toegelicht. Ook de ouders van de deelnemende leerlingen hebben deze brief ontvangen.

Aan de *individuele leerlingreviews* hebben drie leerlingen uit de in Paragraaf 1.5 beschreven doelgroep deelgenomen. Aan het begin van de *individuele leerlingreviews* legde de onderzoeker aan de leerling uit hoe de review zou verlopen. Vervolgens bestond de review uit drie onderdelen. Allereerst werd de leerling gevraagd om een *pretest* te maken bestaande uit acht meerkeuzevragen om het conceptuele begrip over elektrische en magnetische velden te peilen. Hierbij werd de leerling gevraagd om hardop na te denken en stelde de onderzoeker regelmatig vragen om de gedachtegang van de leerling te achterhalen. Vervolgens volgde de leerling een les van ongeveer 40 minuten, gebruikmakend van de simulatie en leeractiviteit, waarbij de onderzoeker de rol van de docent aannam en daarbij de instructies uit de ontwikkelde docentenhandleiding volgde. Ook tijdens de les stelde de onderzoeker regelmatig vragen om de gedachtegang van de leerling te achterhalen. Na afloop van de les maakte de leerling een *posttest*. Deze *posttest* bevatte dezelfde vragen als de *pretest* en wederom werd de leerling gevraagd om hardop na te denken. Om de *individuele leerlingreview* na afloop te kunnen evalueren werden gedurende de hele review geluidsopnamen gemaakt die later zijn getranscribeerd.

Aan de *klassikale leerlingreview* hebben in totaal zeven leerlingen uit de beschreven doelgroep deelgenomen. Allereerst werden de deelnemende leerlingen bij deze review gevraagd om de *pretest* individueel te maken en bij ieder antwoord een toelichting op te schrijven. Vervolgens volgden de leerlingen een les van ongeveer 40 minuten, gebruikmakend van de simulatie en leeractiviteit. Hierbij gaf de onderzoeker, in de rol van de docent, eerst instructie over het gebruik van de simulatie en leeractiviteit volgens de aanwijzingen in de docentenhandleiding, waarna de leerlingen in tweetallen (en één leerling individueel) de leeractiviteit uitvoerden. Aan de leerling die de leeractiviteit individueel uitvoerde heeft de docent van deze klas tijdens de leeractiviteit de linkerhandregel uitgelegd, omdat deze leerling de linkerhandregel nog niet bleek te kennen. Om de *klassikale leerlingreview* na afloop te kunnen evalueren werd tijdens het gebruik van de leeractiviteit bij één tweetal en bij de individuele leerling een scherm- en geluidsopname gemaakt. Bij de andere twee tweetallen heeft de onderzoeker tijdens de leeractiviteit enkele aantekeningen gemaakt over het leerproces. Na afloop van de les maakten de leerlingen de *posttest*, waarbij ze wederom werden gevraagd om een toelichting op hun antwoorden op te schrijven.

Op basis van de *leerlingreviews* is de effectiviteit van de simulatie en bijbehorende leeractiviteit vervolgens geëvalueerd aan de hand van de twee niveaus van effectiviteit uit het model van Millar (2010): *doen* en *leren*. Het eerste niveau (*doen*) vergelijkt wat leerlingen zouden moeten doen volgens de specificatie van de leeractiviteit met wat ze daadwerkelijk doen. Het tweede niveau (*leren*) vergelijkt wat leerlingen zouden moeten leren volgens de leerdoelen met wat leerlingen daadwerkelijk leren en evalueert dus de conceptuele begripsvorming. De effectiviteit op niveau 1 (*doen*) is geëvalu-

eerd aan de hand van de observaties tijdens de *leerlingreviews*. De effectiviteit op niveau 2 (*leren*) is kwalitatief geëvalueerd aan de hand van de antwoorden (en toelichtingen) op de *pre-* en *posttest* en de redeneringen tijdens het gebruik van de simulatie.

Naast de effectiviteit op niveau 1 en 2 is ook de gebruiksvriendelijkheid van de simulatie geëvalueerd aan de hand van observaties tijdens de *leerlingreviews* en feedback van de deelnemende leerlingen. Bovendien is geëvalueerd wat leerlingen van het gebruik van de simulatie en de leeractiviteit vonden op basis van observaties en uitspraken die leerlingen hebben gedaan.

Er is voor gekozen om geen controlegroep te gebruiken vanwege het beperkte aantal leerlingen dat kon deelnemen aan het onderzoek. Als een deel van deze leerlingen deel had moeten uitmaken van de controlegroep zouden er nog minder leerlingen geweest zijn die de simulatie en leeractiviteit konden testen.

3 Ontwerpfase

Voor conceptuele begripsvorming bij het gebruik van een simulatie is het noodzakelijk dat leerlingen gestimuleerd worden een actieve leerhouding aan te nemen, waarbij ze kritisch nadenken en dus zichzelf vragen stellen en deze beantwoorden aan de hand van de simulatie (Adams et al., 2008a). In de praktijk blijkt dan ook dat zogenaamde kookboekpractica waarbij leerlingen alleen doen en niet denken weinig effect hebben op de conceptuele begripsvorming (Berg & Buning, 1994).

Aan de andere kant hebben leerlingen ook een zekere mate van sturing nodig om effectief te kunnen leren (Arons, 1997). Zonder sturing bij het gebruik van een simulatie hebben leerlingen moeite met het opstellen van hypothesen, het bedenken van relevante experimenten en het interpreteren van de data (Rutten et al., 2012).

Er is tijdens de ontwerpfase dan ook gezocht naar een manier om een balans te vinden tussen de mate van sturing en de mate waarin leerlingen gestimuleerd worden een actieve leerhouding aan te nemen. In dit onderzoek is de keuze gemaakt om het stimuleren van de actieve leerhouding en de sturing gescheiden aan te bieden. De actieve leerhouding wordt vooral gestimuleerd door (het ontwerp van) de simulatie. De sturing wordt aangeboden aan de hand van de bijbehorende leeractiviteit en de begeleiding door de docent. Op deze manier zijn er bovendien verschillende toepassingsmogelijkheden voor de simulatie, omdat deze met verschillende leeractiviteiten (met verschillende niveaus van sturing) kan worden gecombineerd. De implementatie hangt dan af van de context waarin de simulatie wordt ingezet (Adams et al., 2008a).

Tijdens de ontwerpfase zijn zowel de simulatie als de bijbehorende leeractiviteit als de docent-handleiding ontwikkeld. Het ontwerp van elk van deze onderdelen wordt hieronder verder toegelicht.

3.1 Simulatie

3.1.1 Ontwerpeisen

Het doel van de simulatie is om (1) het onderscheid tussen elektrische en magnetische velden te illustreren en (2) een actieve leerhouding bij de leerlingen te stimuleren. Daarnaast is het belangrijk dat de simulatie intuïtief is in het gebruik.

Voor de eerste functie moet de simulatie dus zo worden vormgegeven dat de volgende natuurkundige verschijnselen duidelijk worden geïllustreerd:

- Een elektrisch veld oefent op zowel stilstaande als bewegende lading een elektrische kracht uit;
- De elektrische kracht werkt in de richting van het elektrisch veld;
- Een magnetisch veld oefent alleen een kracht uit op bewegende lading;
- De magnetische kracht staat loodrecht op zowel de bewegingsrichting als de richting van het magnetisch veld.

Ook voor de tweede functie, het stimuleren van een actieve leerhouding, moet de simulatie aan enkele voorwaarden voldoen (Adams et al., 2008a):

- De gebruiker kan alle potentieel belangrijke parameters zelf aanpassen, in het bijzonder ...

- de elektrische en magnetische veldsterkte;
- de richting van de elektrische en magnetische velden;
- de massa van het geladen deeltje;
- de lading van het geladen deeltje.
- Alle elementen in de simulatie zijn direct gerelateerd aan het leerdoel.
- Het uiterlijk van de simulatie ...
 - is aantrekkelijk;
 - komt niet intimiderend over.
- Indien mogelijk bevat de simulatie ...
 - verschillende representaties van hetzelfde element;
 - kleine puzzels om vragen op te roepen;
 - spelelementen om de gebruiker te stimuleren om te interacteren met de simulatie en deze spelelementen ...
 - * dienen een educatief doel;
 - * leiden niet af.

Daarnaast is een simulatie het meest effectief als de bediening intuïtief is en de aandacht van de leerling dus uit kan gaan naar de inhoud in plaats van de bediening (Adams et al., 2008b). In de zogenaamde 'PhET Look and Feel' zijn richtlijnen opgenomen die kunnen helpen bij het ontwikkelen van een intuïtieve simulatie (Adams et al., 2008b). Daarnaast is ervoor gekozen om gebruik te maken van (1) een 2D-weergave, in raketnotatie, die consistent is met de lesmethode en (2) een schematische weergave om de koppeling met de theorie duidelijk te maken. Verdere ontwerpeisen voor de simulatie zijn dus:

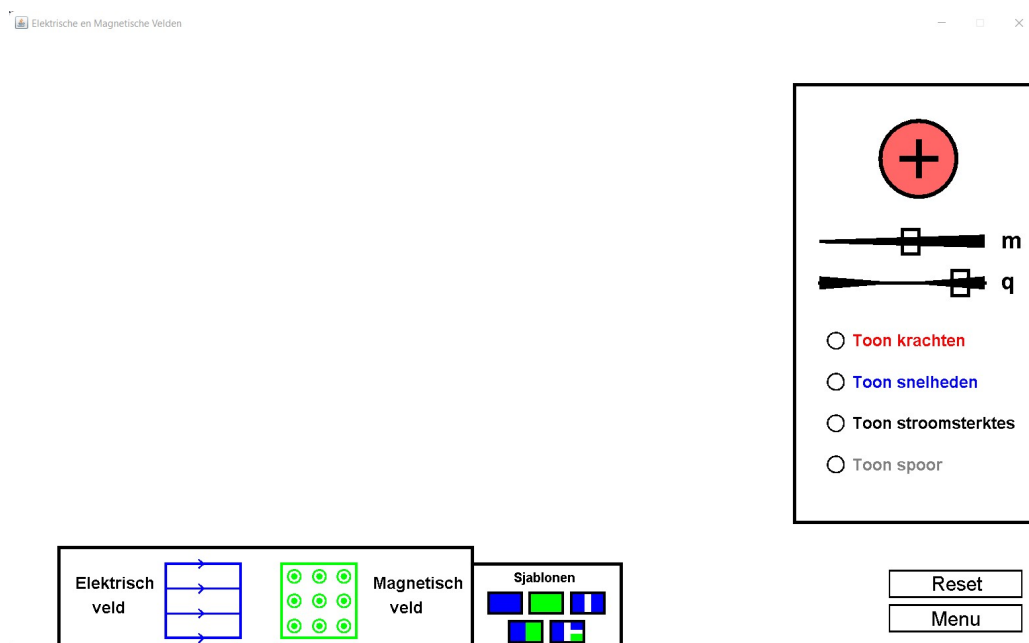
- De simulatie is intuïtief in het gebruik:
 - Er is een duidelijk onderscheid tussen het simulatiegebied en het bedieningspaneel.
 - * Het simulatiegebied ...
 - bevat versleepbare objecten;
 - bevat de bediening van de versleepbare objecten.
 - * Het bedieningspaneel ...
 - wordt gebruikt voor het instellen van globale parameters;
 - wordt gebruikt voor het veranderen van representaties;
 - bevat keuzerondjes en/of schuifknoppen;
 - bevat weinig of geen selectieknoppen.
 - Er worden visuele aanwijzingen gebruikt, zoals ...
 - * kleuren;
 - * vormen;
 - * symbolen;
 - * achtergronden
 en deze zijn consistent met de methode van Systematische Natuurkunde.
 - De weergave van objecten is ...

- * tweedimensionaal;
- * schematisch.
- Eventuele tabbladen ...
 - * worden gebruikt om verschillende delen van de simulatie te onderscheiden;
 - * zijn duidelijk zichtbaar.
- De hoeveelheid tekst wordt tot een minimum beperkt.
- De simulatie start op met weinig animaties en complexiteit.
- Eventuele hulp vanuit de simulatie wordt aangeboden in de vorm van een 'wiggle-me'.

3.1.2 Ontwerp

Op basis van de ontwerpisen is ervoor gekozen om de simulatie uit twee delen te laten bestaan. Het eerste deel wordt het *Lab* genoemd en in deze omgeving staat het experimenteren met ladingen in homogene elektrische en magnetische velden centraal. Het tweede deel wordt de *Game* genoemd en in deze omgeving kunnen leerlingen hun opgedane kennis toepassen om verschillende (uitdagende) puzzels op te lossen. Binnen dit onderzoek is alleen het *Lab* verder uitgewerkt, zodat de effectiviteit van dit deel van de simulatie gericht kan worden geëvalueerd in de onderzoeksfase.

In Figuur 2 is het startscherm van het *Lab* weergegeven.



Figuur 2: Simulatie – *Lab* – Startscherm

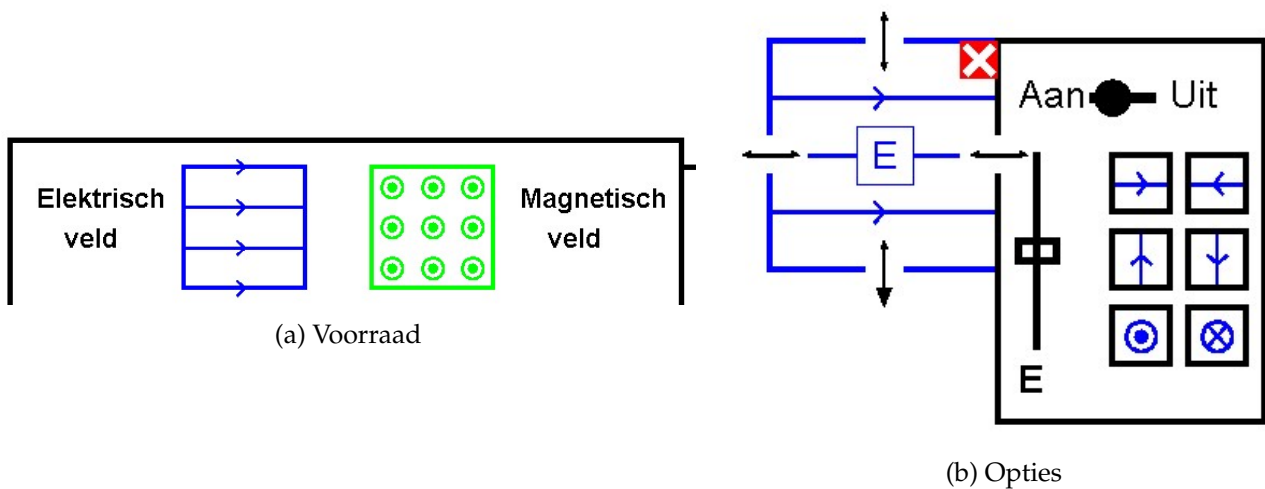
Binnen deze omgeving kan de gebruiker homogene elektrische en magnetische velden het simulatiegebied in slepen en daarmee het simulatiegebied naar eigen inzicht indelen. Verder kan de gebruiker een geladen deeltje het simulatiegebied in slepen en loslaten binnen een elektrisch of magnetisch veld en vervolgens waarnemen welk traject dit geladen deeltje aflegt.

Hieronder worden de verschillende functionaliteiten en de gemaakte ontwerpkeuzes verder toegelicht. Omdat de ontwerpkeuzes niet kunnen worden toegelicht zonder een beschrijving te geven van de simulatie lijkt onderstaande beschrijving op een uitgebreide gebruikershandleiding die mogelijk

enigszins lang is.

Elektrische en magnetische velden

De elektrische en magnetische velden kunnen vanuit de voorraad, zoals weergegeven in Figuur 3a, naar het simulatiegebied worden geslept. Wanneer de gebruiker de muis over het geplaatste veld beweegt verschijnen de opties zoals in Figuur 3b. Het veld kan dan weer verslept worden of worden verwijderd door op het kruisje te klikken. Door één van de pijltjes aan de rand te slepen wordt het veld vergroot of verkleind. Verder is het mogelijk om met de schuifknop de veldsterkte aan te passen en met de keuzeknoppen de richting van het veld te veranderen. Bovendien kan het veld aan- of uitgezet worden.



Figuur 3: Simulatie – Lab – Elektrische en magnetische velden

Er is bij het ontwerpen van de simulatie voor gekozen om alleen gebruik te maken van homogene elektrische en magnetische velden, omdat dit voor het illustreren van de fundamentele verschillen tussen elektrische en magnetische velden volstaat. Wel kan de gebruiker ervoor kiezen om een inhomogeen veld na te bootsen door enkele velden met verschillende veldsterktes naast elkaar te plaatsen. Bovendien kunnen er niet twee velden over elkaar heen geplaatst worden, zodat steeds alleen het effect van een enkel veld wordt gesimuleerd.

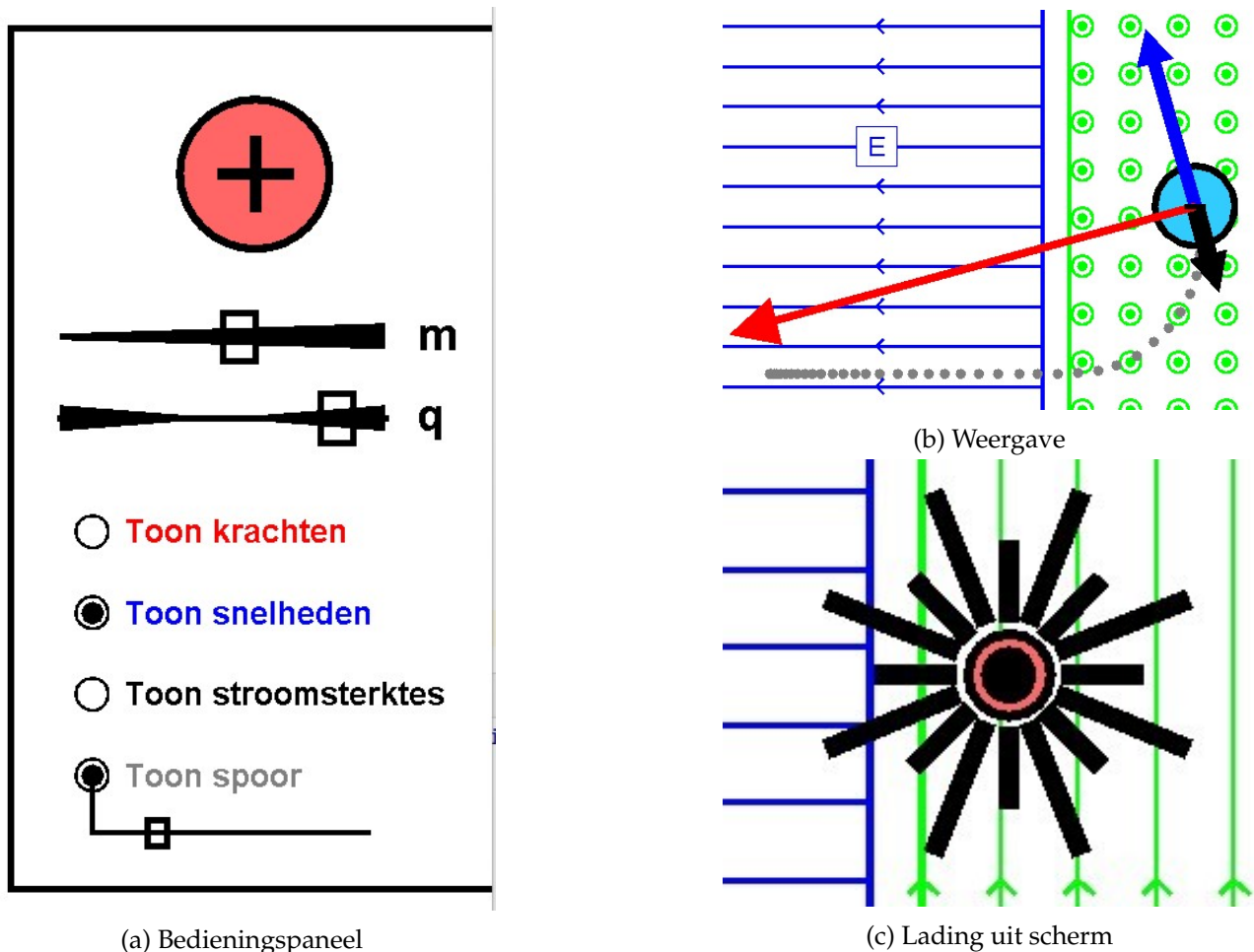
De gekozen kleuren voor de elektrische en magnetische velden komen overeen met de meeste natuurkundeboeken. De methode *Systematische Natuurkunde*, die wordt gebruikt op Het Stedelijk College Zuid, maakt echter geen onderscheid in kleur tussen de verschillende velden. Omdat het doel van deze simulatie juist is het verschil tussen elektrische en magnetische velden duidelijk te maken is ervoor gekozen om wel onderscheid in kleur aan te brengen en dit consistent te doen met de meeste lesmethodes. Bovendien zijn de velden in het midden met een symbool gelabeld om dit onderscheid verder te benadrukken. De symbolen voor de richtingen, in raketnotatie, komen overeen met de symbolen die zowel in de les als in de lesmethode worden gebruikt. Wanneer de sterkte van het veld wordt aangepast verandert bovendien de dichtheid van de elektrische of magnetische veldlijnen.

De functionaliteit van het aan- en uitzetten van de velden is toegevoegd om de gebruiker de mogelijkheid te geven om meerdere geladen deeltjes tegelijk te laten vertrekken, zodat de trajecten vergeleken kunnen worden. Wanneer het veld uitstaat is aan de rand wel zichtbaar in welke richting het veld werkt.

Als laatste is er voor zes mogelijke richtingen van de velden gekozen. De velden kunnen bijvoorbeeld dus niet diagonaal werken. Deze keuze is gemaakt vanwege de complexiteit van het weergegeven hiervan, met name wanneer het veld een component in z-richting heeft (uit het papier), en omdat het weinig toegevoegde waarde heeft om deze mogelijkheid wel in te bouwen.

Geladen deeltjes

Ook de geladen deeltjes kunnen vanuit de voorraad naar het simulatiegebied worden gesleept. Deze voorraad is weergegeven bovenin Figuur 4a. Een geladen deeltje dat in het simulatiegebied is gesleept kan later weer worden opgepakt en naar een andere positie worden gesleept. Het geladen deeltje krijgt geen snelheid mee van de beweging van de muis wanneer deze wordt losgelaten. Door een geladen deeltje terug in de voorraad te zetten kan het deeltje weer worden verwijderd. Wanneer een geladen deeltje naar ongeveer dezelfde hoogte of breedte wordt gesleept als een ander geladen deeltje wordt deze automatisch uitgelijnd, zodat de trajecten nauwkeuriger vergeleken kunnen worden.



Figuur 4: Simulatie – Lab – Geladen deeltjes

In Figuur 4a zijn ook de schuifknoppen weergegeven waarmee de massa en de lading van het geladen deeltje kunnen worden ingesteld. Het aanpassen van de massa wordt visueel weergegeven

door het veranderen van de grootte en de randdikte van het geladen deeltje. Het aanpassen van de lading is zichtbaar doordat de dikte van het plus- of minteken verandert. Verder is een positief geladen deeltje rood en een negatief geladen deeltje blauw. Ook de vorm van de schuifbalk geeft hierbij visuele ondersteuning.

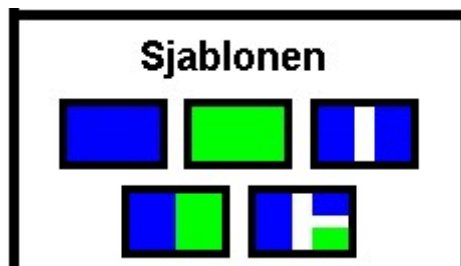
In het bedieningspaneel in Figuur 4a kan de gebruiker daarnaast door middel van selectieknoppen het tonen van de krachten, snelheden en stroomsterktes als vectoren en het weergeven van het spoor aan- of uitzetten. De weergave waarbij alle selectieknoppen aanstaan wordt getoond in Figuur 4b. Voor de visuele ondersteuning wordt hier dezelfde kleur gebruikt voor de vectoren en het spoor als voor de bijbehorende tekst. Wanneer het spoor aanstaat kan met behulp van de schuifknop de lengte van het spoor worden aangepast. Doordat de stippen waaruit het spoor bestaat met vaste tussenpozen worden gezet wordt niet alleen het traject gevisualiseerd, maar worden ook snelheidswisselingen zichtbaar.

In Figuur 4c is weergegeven wat er gebeurt wanneer een geladen deeltje in z-richting beweegt (loodrecht op het scherm). Het deeltje blijft eerst kort in beeld, waarbij met raketnotatie wordt aangegeven welke kant het op beweegt. Vervolgens verschijnt het beeld zoals in Figuur 4c. De 'ster' symboliseert dat het scherm kapot is gegaan. De rode of blauwe kleur in het midden geeft aan of de lading positief of negatief was en de raketnotatie blijft de bewegingsrichting aangeven. Na enkele seconden verdwijnt dit weer uit beeld. Bij het ontwerp van de simulatie is hier wederom voor gekozen omdat een driedimensionale beweging moeilijk kan worden weergegeven in een tweedimensionaal vlak. Op deze manier kan de leerling toch aan het denken worden gezet over de derde bewegingsrichting zonder de simulatie onnodig complex te maken.

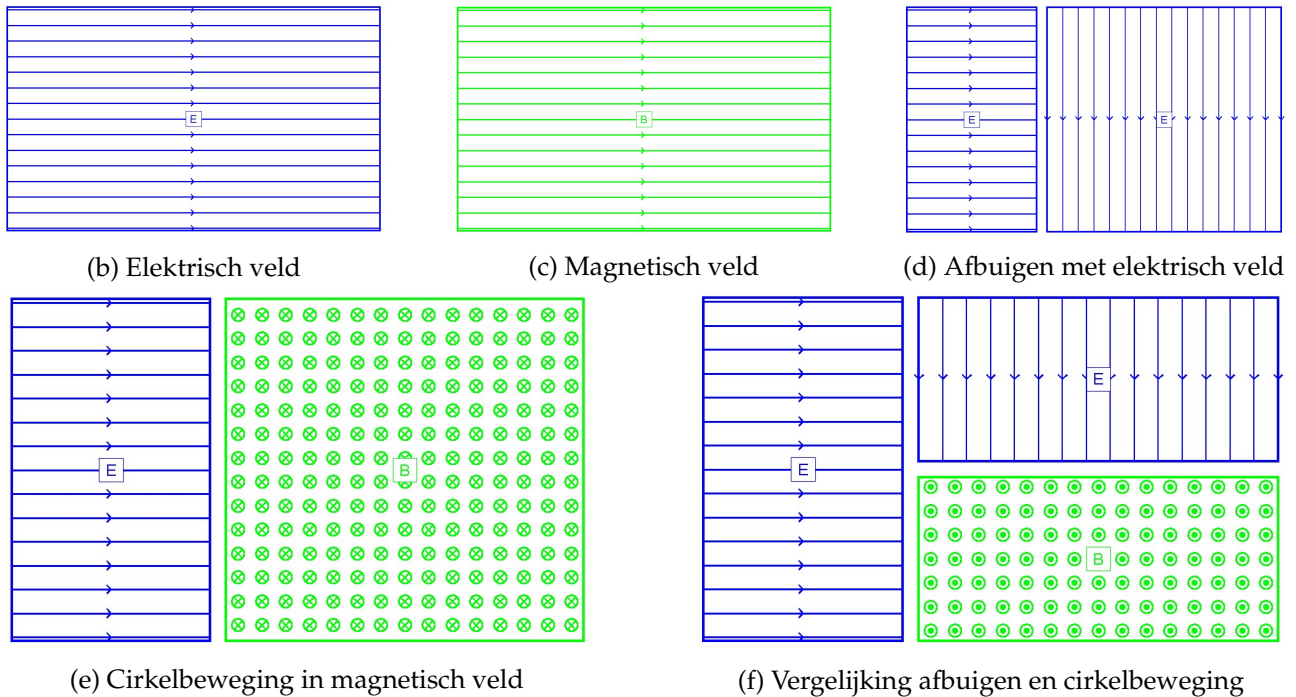
Een andere ontwerpkeuze die is gemaakt is dat de geladen deeltjes onderling geen kracht op elkaar uitoefenen in het model. Gelijke ladingen stoten elkaar dus niet af en tegengestelde ladingen trekken elkaar niet aan. Deze keuze is gemaakt om ervoor te zorgen dat twee verschillende situaties gelijktijdig in beeld gebracht en vergeleken kunnen worden zonder dat deze situaties elkaar beïnvloeden. Het is wel belangrijk om de leerling erop te attenderen dat dit in werkelijkheid anders is.

Standaard configuraties

De omgeving *Lab* start op zonder elektrische en magnetische velden in het simulatiegebied, zodat de gebruiker de functionaliteiten eerst zelf kan ontdekken. Hiermee wordt een actieve leerhouding gestimuleerd. Om er wel voor te zorgen dat alle relevante verschijnselen aan bod komen zijn er vijf standaard configuraties voorgeprogrammeerd. Deze kan de gebruiker oproepen door te klikken op één van de kleurcodeerde sjablonen zoals in Figuur 5a. De standaard configuraties zijn weergegeven in Figuren 5b tot en met 5f.



(a) Sjablonen



Figuur 5: Simulatie – Lab – Standaard configuraties

Het doel van het elektrische veld in Figuur 5b is om leerlingen te laten ontdekken dat een elektrisch veld op zowel een stilstaande als bewegende lading een kracht uitoefent en dat deze kracht constant is en in de richting van het elektrische veld werkt. Bovendien kunnen leerlingen hier ontdekken hoe de grootte van de kracht en de versnelling afhangen van de massa en lading van het geladen deeltje en de sterkte van het elektrische veld.

Het doel van het magnetisch veld in Figuur 5c is vervolgens om leerlingen te laten ontdekken dat een magnetisch veld geen kracht uitoefent op een geladen deeltje en ze te laten verwonderen over het verschil tussen elektrische en magnetische velden.

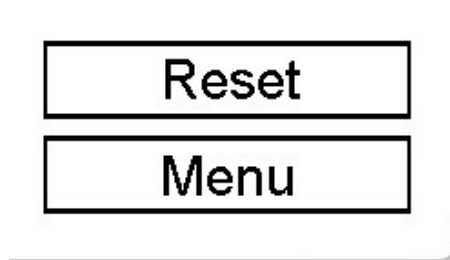
Aan de hand van de twee elektrische velden in Figuur 5d kunnen leerlingen vervolgens ontdekken dat een elektrisch veld in staat is om een deeltje zowel af te buigen als te versnellen. In het traject van het geladen deeltje kunnen de leerlingen een parabolvorm herkennen die vergelijkbaar is met een *horizontale worp*.

De combinatie van een elektrisch en magnetisch veld in Figuur 5e geeft leerlingen vervolgens de mogelijkheid om te ontdekken dat een magnetisch veld wel een kracht uitoefent op een bewegend geladen deeltje en dat deze kracht loodrecht staat op zowel de bewegingsrichting als de richting van het magnetisch veld. Daarnaast is deze standaard configuratie bedoeld om leerlingen het inzicht te geven dat een magnetisch veld alleen in staat is om een geladen deeltje af te buigen en niet te versnellen en er daardoor een cirkelbeweging ontstaat. Met behulp van de linkerhandregel kunnen leerlingen voorspellen in welke richting het geladen deeltje wordt afgebogen. Bovendien kunnen leerlingen met deze configuratie ontdekken hoe de straal van de cirkelbeweging wordt beïnvloed door de snelheid, massa en lading van het geladen deeltje en de sterkte van het magnetisch veld. Door de richting van het magnetisch veld aan te passen kunnen ze daarnaast ontdekken dat op een geladen deeltje dat parallel aan het magnetisch veld beweegt geen kracht wordt uitgeoefend.

Als laatste is ervoor gekozen om een standaard configuratie toe te voegen waarin het afbuigen van een bewegend deeltje in een elektrisch veld wordt vergeleken met het afbuigen in een magnetisch veld. Dit is weergegeven in Figuur 5f.

Knoppen

Er is bij het ontwerp voor gekozen om slechts twee knoppen toe te voegen als globale bediening, zie Figuur 6. De *Reset*-knop zet alle instellingen terug naar de standaardinstellingen. Dit betekent dat alle velden en geladen deeltjes uit het simulatiegebied worden verwijderd en de instellingen van de voorraad geladen deeltjes worden teruggezet. Door op de *Menu*-knop te klikken komt de gebruiker bij het hoofdmenu, waar kan worden gekozen om naar het *Lab* of naar de *Game* te gaan.

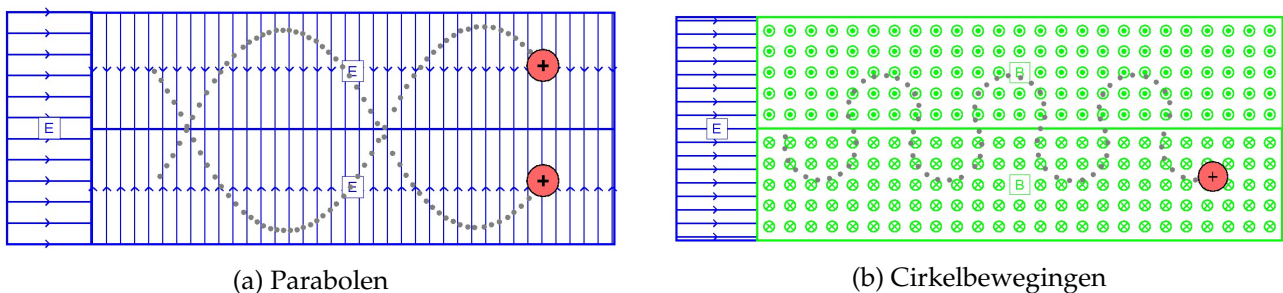


Figuur 6: Simulatie – *Lab* – Knoppen

Er is voor gekozen om geen *Hulp*-knop toe te voegen, omdat deze over het algemeen niet gebruikt wordt. Daarnaast is de keuze gemaakt geen *Start*-, *Stop*- of *Pauze*-knop toe te voegen om te voorkomen dat de indruk gewekt wordt dat een geladen deeltje stil kan staan in een elektrisch veld. De gebruiker kan wel meerdere geladen deeltjes tegelijk laten starten door ze in hetzelfde elektrisch veld te zetten en deze vervolgens aan te zetten.

Spelelementen

In de omgeving *Lab* zitten geen expliciete spelelementen. Deze zullen eventueel later worden ingebouwd in de omgeving *Game*. Wel kan de leerling zelf impliciete spelelementen ontdekken. Voorbeelden hiervan zijn weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Simulatie – *Lab* – Spelelementen

De uitdaging hierbij kan zijn om het traject van het geladen deeltje ‘mooier’ te maken door de verschillende parameters aan te passen. Zo kan een leerling proberen in Figuur 7a een smallere parabool te maken of in Figuur 7b proberen de straal van de cirkelbewegingen te veranderen. Om dit te bereiken is inzicht nodig in de onderliggende natuurkundige principes.

3.1.3 Expertreview en functionaliteitenreview

Het ontwerp zoals hierboven beschreven is de definitieve versie waarvan de effectiviteit uiteindelijk geëvalueerd is aan de hand van de leerlingreviews. In dit definitieve ontwerp zijn de verbeterpunten die volgden uit de expertreview en functionaliteitenreview al verwerkt. De resultaten van beide reviews van de eerste versie van de simulatie worden hieronder beschreven.

Expertreview

De expert was enthousiast over de functionaliteiten en het uiterlijk van de simulatie. Op basis van de eerste versie verwachtte hij dat de simulatie didactisch effectief zou zijn bij de conceptuele begripsvorming over elektrische en magnetische velden. Om de effectiviteit verder te vergroten zijn naar aanleiding van de expertreview verschillende aspecten verbeterd.

Ten eerste is het 'kapotgaan' van het scherm wanneer een geladen deeltje loodrecht op het scherm beweegt aangepast. In eerste instantie werd na het 'kapotgaan' niet meer aangegeven wat de lading en bewegingsrichting van het geladen deeltje waren voordat het verdween en ging het verdwijnen te snel. In de definitieve versie worden de lading en bewegingsrichting ook na het verdwijnen aangegeven door middel van een kleur en een symbool, zodat de leerling langer de tijd heeft om te verwerken welk effect precies heeft plaatsgevonden. Ook in de definitieve versie is dit echter nog niet helemaal duidelijk en dus is in overleg met de expert besloten om over het 'kapotgaan' een vraag op te nemen in de leeractiviteit.

Ten tweede viel het de expert op dat in de eerste versie de geladen deeltjes nog niet werden uitgelijnd wanneer ze ongeveer boven of naast elkaar werden geplaatst. Omdat het uitlijnen ervoor kan zorgen dat verschillende situaties nauwkeuriger kunnen worden vergeleken is er voor gekozen om deze functionaliteit toe te voegen aan de definitieve versie.

Ten derde was het aantal punten in het spoor in de eerste versie constant. Voor langzaam bewegende geladen deeltjes was het spoor daardoor relatief kort. De expert gaf aan dat het met name bij een klassikale demonstratie nuttig zou zijn om het spoor langer te kunnen laten staan, zodat het traject beter gevisualiseerd en geanalyseerd kan worden. Om deze reden is de schuifknop voor de lengte van het spoor toegevoegd in de definitieve versie.

Ten vierde bleek uit de expertreview dat de expert soms geladen deeltjes probeerde te verwijderen door ze terug te zetten in de voorraad. In de eerste versie bleven deze deeltjes daar echter staan zonder te verdwijnen. Dit is aangepast in de definitieve versie.

Uit de expertreview zijn daarnaast enkele aspecten naar voren gekomen waarvan bewust de keuze is gemaakt om dit niet aan te passen in de definitieve versie. Zo bleek bijvoorbeeld dat de expert een geladen deeltje op de rand van een elektrisch veld probeerde te plaatsen zonder dat het middelpunt zich in het elektrisch veld bevond. Het model rekent echter alleen met het middelpunt van het geladen deeltje en dus bleef het deeltje in dit geval stilstaan. Er is voor gekozen om dit niet aan te passen, maar leerlingen hier juist zelf een verklaring voor te laten zoeken wanneer ze dit ontdekken.

Verder bleek dat de expert probeerde een geladen deeltje snelheid te geven in een magnetisch veld door het deeltje te 'gooien' met de muis. Omdat je in werkelijkheid een geladen deeltje ook niet kan vasthouden en dus alleen kan versnellen door het in een elektrisch veld te plaatsen is ervoor gekozen om ook dit niet aan te passen in de definitieve versie.

Als laatste bleek dat het door het algoritme mogelijk is dat een geladen deeltje een fractie energie erbij krijgt, waardoor het kan gebeuren dat een deeltje na omkeren in een magnetisch veld verder terugkomt in het elektrisch veld dan waar het vertrok. Natuurkundig gezien is dit onmogelijk. Ook bij de eerste versie van het ontwerp was al veel moeite gestopt om dit probleem te verhelpen en dit was ook grotendeels gelukt. Alleen in uitzonderlijke gevallen kwam het in de eerste versie nog voor dat een geladen deeltje te veel energie kreeg. Vanwege de beperkte duur van dit onderzoek is ervoor gekozen om deze uitzonderlijke gevallen niet verder te verhelpen. In plaats daarvan is ervoor gekozen om leerlingen te laten uitleggen waarom het in werkelijkheid niet mogelijk is wanneer ze een dergelijk uitzonderlijk geval ontdekken.

Functionaliteitenreview

Ook op basis van de functionaliteitenreview van de eerste versie zijn enkele aanpassingen gedaan om tot de definitieve versie te komen. Zo ontdekte de reviewer dat een veld dat onder de schuifknop stond werd meegesleept met de schuifknop. In de definitieve versie is dit aangepast. Verder bleek dat de *Hulp*-knop nergens naartoe leidde. Deze knop is in de definitieve versie verwijderd, omdat het *Hulp*-menu over het algemeen niet wordt gebruikt. Verder is er in de omgeving *Game* een *Menu*-knop toegevoegd, zodat de simulatie niet helemaal hoeft te worden afgesloten wanneer de gebruiker naar deze omgeving is gegaan en terug wil naar het *Lab*.

Daarnaast bleek dat het vergroten en verkleinen van de velden niet direct intuïtief was. De reviewer probeerde in eerste instantie de rand zelf (in plaats van het pijltje op de rand) te verslepen. Omdat de reviewer echter snel genoeg ontdekte hoe het wel werkte en dit vervolgens makkelijk was in het gebruik is ervoor gekozen om dit niet aan te passen.

3.2 Leeractiviteit

3.2.1 Ontwerpeisen

Voor het analyseren van praktische leeractiviteiten is in de context van "Getting Practical" een richtlijn ontwikkeld (Millar, 2010). Deze richtlijn kan ook worden gebruikt voor het ontwikkelen van een leeractiviteit.

Allereerst kunnen drie categorieën van algemene leerdoelen worden onderscheiden (Millar, 2010). In dit geval gaat het om een begripspracticum, waarbij het doel is leerlingen hun kennis en begrip over natuurkundige verschijnselen te laten ontwikkelen. Naast deze algemene identificatie van het leerdoel is het van belang expliciete leerdoelen helder te formuleren die gericht zijn op de specifieke leeractiviteit. In het geval van een begripspracticum is het de bedoeling dat leerlingen hogere-orde denkactiviteiten uitvoeren (Ebbens en Ettekoven, 2020). Om de leerdoelen expliciet te maken kan het classificatie-model OBIT worden gehanteerd (Ebbens en Ettekoven, 2020).

Naast het identificeren van de leerdoelen is het belangrijk om na te denken over de structuur van de leeractiviteit (Millar, 2010). Vooral bij een begripspracticum moet het aanbieden van een 'kookboekpracticum' worden voorkomen. Leerlingen moeten de ruimte krijgen om zichzelf vragen te stellen en dit vervolgens te onderzoeken. Daarnaast is het van belang dat leerlingen zowel *denken* als *doen*. Een leeractiviteit die is gebaseerd op *ideeën* (in tegenstelling tot *data*) is het meest effectief in het integreren van het *denken* en *doen* (Millar, 2010). Door gebruik te maken van het POE-model (*voorspellen, observeren* en *verklaren*) kan de conceptuele begripsvorming verder worden gestimuleerd (Millar, 2010).

Dit leidt tot de volgende ontwerpeisen:
De leeractiviteit ...

- is gebaseerd op expliciete en helder geformuleerde leerdoelen;
- richt de aandacht van de leerling op de relevante onderdelen van de simulatie;
- stimuleert de leerling om te voorspellen, observeren en verklaren aan de hand van de simulatie;
- laat ruimte aan de leerling om zichzelf vragen te stellen en hierop een antwoord te zoeken.

3.2.2 Ontwerp

Allereerst zijn er bij het ontwerp van de leeractiviteit heldere leerdoelen geformuleerd. Deze leerdoelen, zoals opgenomen in de docentenhandleiding, zijn weergegeven in Figuur 8.

Na het uitvoeren van de leeractiviteit aan de hand van de simulatie kan de leerling ...

... de inzichten over elektriciteit en magnetisme integreren met de concepten uit de mechanica ...

en

... dit toepassen om ...

- ... voor een (bewegend) geladen deeltje in een homogeen elektrisch of magnetisch veld te *voorspellen* ...
 - ... wat de richting en (relatieve) grootte van de kracht is;
 - ... welk traject het deeltje aflegt.
- ... het traject van een geladen deeltje te *beïnvloeden* met behulp van homogene elektrische en magnetische velden.

Figuur 8: Leeractiviteit – Leerdoelen

Deze leerdoelen zijn gebaseerd op het classificatie-model OBIT, dat bestaat uit de niveaus *onthouden*, *begrijpen*, *integreren* en *toepassen* (Ebbens en Ettekoven, 2020). Het gaat bij de leeractiviteit om het *begrijpen* van de inzichten bij elektriciteit en magnetisme en het *integreren* hiervan met de eerder geleerde concepten uit de mechanica en vervolgens om het *toepassen* van deze geïntegreerde kennis.

Om de leeractiviteit effectief vorm te kunnen geven zijn daarnaast de inzichten bij elektriciteit en magnetisme en de concepten uit de mechanica expliciet geformuleerd en opgenomen in de docentenhandleiding. Dit is weergegeven in Figuur 9.

Dit wordt geïntegreerd met de volgende concepten uit de mechanica:

- Eenparige rechte bewegingen;
- Eenparig versnelde rechte bewegingen;
- Kromlijnige bewegingen (zoals bij een horizontale worp);
- Eenparige cirkelbewegingen.

(b) Mechanica

Figuur 9: Leeractiviteit – Concepten

De volgende inzichten over elektriciteit en magnetisme komen aan bod:

- De kracht op een geladen deeltje in een homogeen elektrisch veld ...
 - o ... werkt in de richting van het elektrisch veld;
 - o ... hangt af van de lading van het deeltje en de sterkte van het elektrisch veld;
 - o ... is onafhankelijk van de snelheid en bewegingsrichting van het deeltje.
- De kracht op een geladen deeltje in een homogeen magnetisch veld ...
 - o ... staat loodrecht op de bewegingsrichting en loodrecht op de richting van het magnetisch veld en de richting kan worden bepaald met de linkerhandregel;
 - o ... hangt af van de lading en snelheid van het deeltje en de sterkte van het magnetisch veld;
 - o ... is afhankelijk van de snelheid en bewegingsrichting van het deeltje: er werkt geen kracht als het deeltje stilstaat of beweegt in de richting van het magnetisch veld.
- Een elektrisch veld is in staat om een geladen deeltje zowel af te buigen als te versnellen.
- Een magnetisch veld is in staat om een geladen deeltje af te buigen, maar niet om een geladen deeltje te versnellen.

(a) Elektriciteit en magnetisme

Op basis van de ontwerpeisen is ervoor gekozen om de leeractiviteit vorm te geven als "kaartspel", waarbij de kaartjes leerlingen ondersteunen bij het ontdekken en onderzoeken van de natuurkundige verschijnselen die naar voren komen in de simulatie, maar leerlingen ook de ruimte hebben om te kiezen óf en welke kaartjes ze willen gebruiken. Hierdoor wordt zowel sturing aangeboden als een actieve en onderzoekende leerhouding gestimuleerd.

De kaartjes zijn onderverdeeld in drie categorieën die aansluiten bij de leerdoelen: *Ontdekken*, *Voorspellen* en *Maken*. De categorie *Ontdekken* is gericht op het *begrijpen* van de inzichten bij elektriciteit en magnetisme en het *integreren* hiervan met de concepten uit de mechanica. Bij de categorie *Voorspellen* gaat het om het *toepassen* van deze inzichten om te voorspellen wat er zal gebeuren in (nieuwe en complexere) situaties. De categorie *Maken* is gericht op het *toepassen* van de inzichten om het traject van een deeltje te beïnvloeden. De drie categorieën en de gemaakte ontwerpkeuzes hierbij worden hieronder verder toegelicht.

Ontdekken

De categorie *Ontdekken* bestaat uit vijftien standaardkaartjes, waarvan zeven gericht zijn op elektrische velden en acht op magnetische velden. Op ieder kaartje komt een ander inzicht of concept naar voren. Het instructie-kaartje en twee voorbeelden zijn weergegeven in Figuur 10.

Ontdekken

Bekijk de situatie en probeer te **voorspellen** wat er zal gebeuren door de vraag te beantwoorden.

Controleer dit vervolgens met de simulatie.

Probeer eerst zelf het verschijnsel te **verklaren**.
Bekijk daarna de verklaring op de achterkant.

Oefen eventueel verder met de extra oefen-kaartjes die rechtsboven zijn aangegeven.

(a) Instructie

Ontdekken Oefenen 4

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?

Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

(b) Elektrische Velden – Voorkant

Op het deeltje met de **grootste lading** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje met de **grootste lading** de **grootste versnelling**.

(c) Elektrische Velden – Achterkant

Ontdekken Oefenen 9

Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

(d) Magnetische Velden – Voorkant

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

(e) Magnetische Velden – Achterkant

Figuur 10: Leeractiviteit – *Ontdekken*

De vormgeving van deze categorie is gebaseerd op het POE-schema: *predict, observe, explain*. Op ieder kaartje is een situatie weergegeven. Aan de hand van de vraag worden leerlingen gestimuleerd om te voorspellen (*predict*) wat er zal gebeuren. Dit kunnen ze dan controleren aan de hand van de simulatie (*observe*). Vervolgens is het de bedoeling dat leerlingen een verklaring (*explain*) zoeken voor het waargenomen verschijnsel. De verklaring kunnen ze hierna vinden op de achterkant van het kaartje.

Naast de standaardkaartjes zijn er 33 extra oefenkaartjes die een mogelijkheid tot differentiatie geven. Wanneer leerlingen het concept op een bepaald kaartje lastig vinden, kunnen ze rechtsboven op het kaartje zien welke oefenkaartjes ze kunnen gebruiken om verder te oefenen. Deze kaartjes behandelen hetzelfde concept in een net andere situatie.

Voorspellen

De categorie *Voorspellen* bestaat uit drie standaardkaartjes en vijf extra verdiepingskaartjes. Het instructie-kaartje en een voorbeeld zijn weergegeven in Figuur 11.

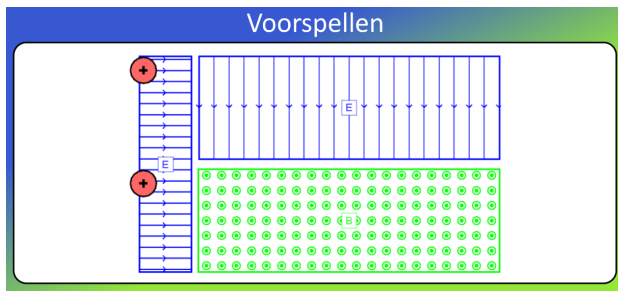
Voorspellen

Bekijk de situatie en probeer te **voorspellen** wat er zal gebeuren. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de grootte en richting van de kracht, de snelheid of het traject.

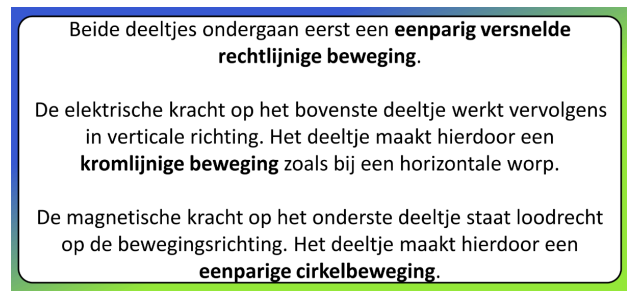
Controleer dit vervolgens met de simulatie.

Probeer eerst zelf het verschijnsel te **verklaren**.
Bekijk daarna de verklaring op de achterkant.

(a) Instructie



(b) Voorkant



(c) Achterkant

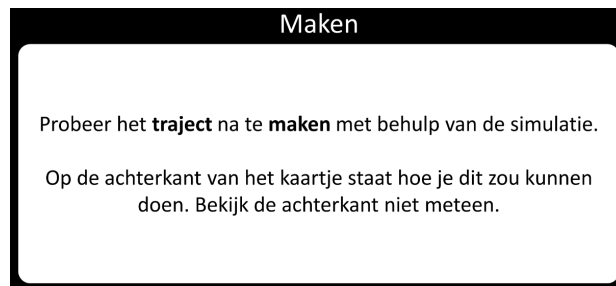
Figuur 11: Leeractiviteit – *Voorspellen*

Ook bij deze categorie wordt gebruikgemaakt van het POE-schema. Bij deze categorie moeten leerlingen echter de opgedane inzichten uit *Ontdekken* toepassen om voorspellingen te doen aan complexere situaties.

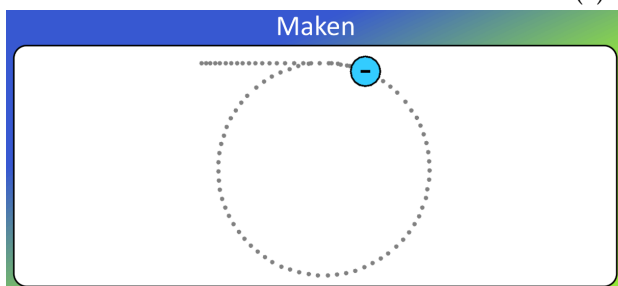
De vijf extra verdiepingskaartjes geven wederom een mogelijkheid tot differentiatie. Op deze kaartjes zijn complexe situaties weergegeven die alleen kunnen worden verklaard door (veel) verschillende formules samen te voegen. Omdat de simulatie en leeractiviteit met name gericht zijn op de conceptuele begripsvorming, en niet het manipuleren van formules, gaan deze verdiepingskaartjes voorbij aan het basisniveau van de leeractiviteit. Deze kaartjes worden wel aangeboden om leerlingen de kans te geven zichzelf extra uit te dagen.

Maken

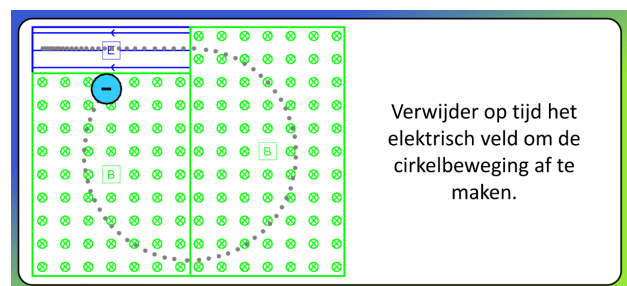
Bij de categorie *Maken* passen de leerlingen de opgedane inzichten toe om het traject van een geladen deeltje te beïnvloeden. Het instructie-kaartje en een voorbeeld zijn weergegeven in Figuur 12.



(a) Instructie



(b) Voorkant



(c) Achterkant

Figuur 12: Leeractiviteit – *Maken*

Op de voorkant van het kaartje wordt een traject weergegeven dat een geladen deeltje heeft afgelegd.

Leerlingen moeten proberen om dit traject na te maken met behulp van de simulatie. Om dit te bereiken zullen ze hun opgedane kennis moeten toepassen. Op de achterkant van het kaartje staat hoe het traject gemaakt zou kunnen worden.

De kaartjes uit de categorie *Maken* zijn vooral bedoeld als inspiratie. Leerlingen kunnen ook een traject zelf bedenken of een gegeven traject enigszins aanpassen.

3.3 Docentenhandleiding

3.3.1 Ontwerpeisen

Volgens de richtlijnen van "Getting Practical" heeft de presentatie van praktische leeractiviteiten een belangrijke invloed op de effectiviteit van de leeractiviteit bij de conceptuele begripsvorming (Millar, 2010). Hieronder valt dat leerlingen zich bewust moeten zijn van het doel van de leeractiviteit en er een duidelijke instructie moet worden gegeven. Daarnaast moet de leeractiviteit voor- en/of nabesproken worden (Millar, 2010). In het geval van een begripspracticum zal deze discussie vooral gericht zijn op het verklaren van observaties en het ontwikkelen van conceptuele ideeën. Instructies over deze begeleiding door de docent moeten dus onderdeel zijn van de docentenhandleiding.

De complete lijst van ontwerpeisen voor de docentenhandleiding is als volgt:
De docentenhandleiding ...

- is overzichtelijk en bevat niet te veel tekst;
- geeft heldere instructies aan de docent over ...
 - het gebruik van de simulatie;
 - het gebruik van het "kaartspel" als leeractiviteit;
 - de begeleiding.

3.3.2 Ontwerp

Bij het schrijven van de docentenhandleiding is geprobeerd een balans te vinden tussen het geven van duidelijke instructies aan de docent en het beperkt houden van de hoeveelheid tekst. Het doel van de docentenhandleiding is namelijk om de docent te informeren over het gebruik van de simulatie en leeractiviteit en de begeleiding die de docent hierbij kan geven. In tegenstelling tot de ontwerper is de docent nog niet bekend met de simulatie of het "kaartspel" en eventuele moeilijkheden bij het gebruik hiervan. Om de docent goed voor te bereiden op het begeleiden van de leeractiviteit is daarom gepoogd hierover heldere instructies op te nemen in de docentenhandleiding. Aan de andere kant is geprobeerd om de hoeveelheid tekst tot een minimum te beperken en de instructies overzichtelijk weer te geven. Een te uitgebreide of onoverzichtelijke docentenhandleiding zal in de praktijk namelijk niet of nauwelijks gebruikt worden.

Het voorblad van de docentenhandleiding geeft een korte impressie van de simulatie en leeractiviteit: het thema, onderwerp, niveau en leerjaar en een plaatje en korte samenvatting van zowel de simulatie als de leeractiviteit. Daarnaast bevat de docentenhandleiding algemene informatie met de concepten, voorkennis en leerdoelen, zoals weergegeven in Figuur 8 en 9. Bovendien kan de docent in de docentenhandleiding een gebruiksaanwijzing voor zowel de simulatie als de leeractiviteit vinden.

De docentenhandleiding bevat daarnaast een lijst van aandachtspunten voor de docent die zijn onderverdeeld in *vooraf*, *tijdens* en *achteraf*. Vooraf geeft de docent een korte instructie over zowel het gebruik van de simulatie en de kaartjes, waarbij de docent wel ruimte laat aan de leerling om de simulatie verder zelf te ontdekken. Tijdens de leeractiviteit geeft de docent zowel praktische aanwijzingen als begeleiding bij het leerproces. De praktische aanwijzingen zijn vooral gericht op het gebruik van de simulatie en de kaartjes. De begeleiding bij het leerproces bestaat onder andere uit het stellen van verdiepende vragen, zoals: "Wat zou er gebeuren als ... ?" of "Hoe kan je ervoor zorgen dat ... ?". Achteraf sluit de docent de les af door (klassikaal) te bespreken wat de leerlingen hebben geleerd.

4 Onderzoeksfase

Om de effectiviteit van de ontworpen simulatie en bijbehorende leeractiviteit te evalueren zijn *leerlingreviews* uitgevoerd, zoals beschreven in Paragraaf 2.2. Hieronder worden de gebruikte *pre-* en *posttest* en de resultaten van de *leerlingreviews* beschreven.

4.1 Pre- en posttest

Om de effectiviteit op niveau 2 (*leren*) uit het model van Millar (2010) kwalitatief te evalueren is onder andere gebruikgemaakt van de *pre-* en *posttest* zoals weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14. Deze *pre-* en *posttest* is gebaseerd op de begripsvragen over elektrische en magnetische velden die horen bij het Handboek Natuurkundedidactiek (Kortland et al., 2017). De vragen zijn zo aangepast dat ze aansluiten bij de begripsmoeilijkheden zoals beschreven in Paragraaf 1.1, zodat ze gebruikt konden worden om de beoogde conceptuele begripsvorming te evalueren.

Er is voor gekozen om de *pre-* en *posttest* niet te laten verschillen om te voorkomen dat een van beide tests moeilijker zou zijn dan de andere en vanwege het beperkte aantal leerlingen dat kon deelnemen aan het onderzoek. Aan de deelnemende leerlingen werd niet verteld dat de *posttest* hetzelfde zou zijn als de *pretest* om te voorkomen dat ze specifiek op zoek zouden gaan naar de antwoorden op de test.

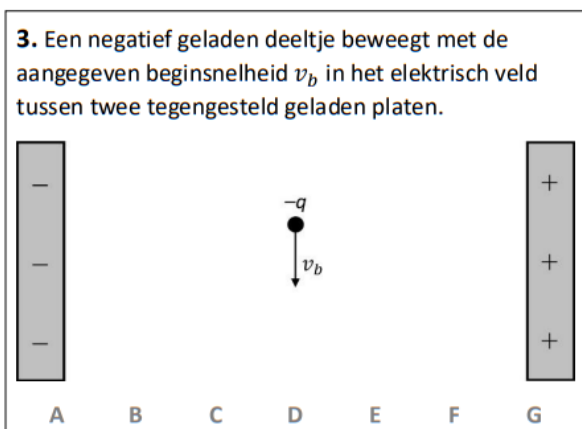
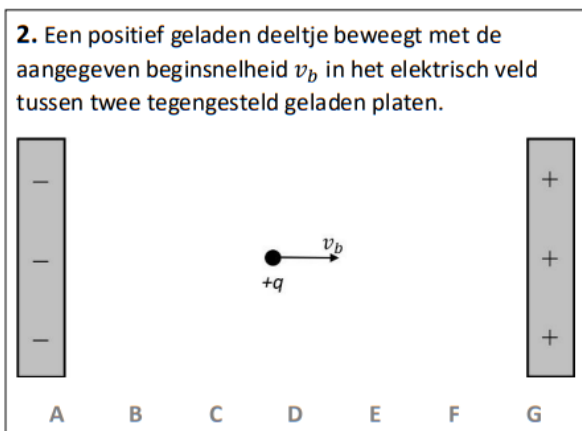
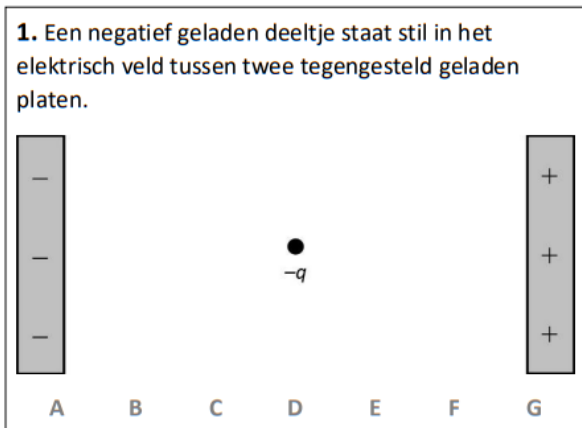
Het eerste deel van de *pre-* en *posttest*, zoals weergegeven in Figuur 13, peilt het conceptuele begrip van de leerlingen over de aard van elektrische en magnetische velden en het verschil hiertussen. De leerlingen worden gevraagd om in zes situaties de richting van de kracht aan te geven en het traject te tekenen. De drie situaties met elektrische velden zijn vergelijkbaar met de drie situaties met magnetische velden om te testen of leerlingen het verschil tussen elektrische en magnetische velden begrijpen. Dit deel van de *pre-* en *posttest* peilt daarnaast of leerlingen begrijpen dat: (a) de elektrische kracht op een positief geladen deeltje in de richting van het elektrisch veld werkt en de elektrische kracht op een negatief geladen deeltje tegen de richting van het elektrisch veld in werkt, (b) op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld geen (Lorentz)kracht werkt, (c) op een geladen deeltje dat evenwijdig aan het magnetisch veld beweegt geen Lorentzkracht werkt, (d) de Lorentzkracht loodrecht staat op zowel de bewegingsrichting als de richting van het magnetisch veld, (e) een elektrisch veld een kromlijnige beweging van een geladen deeltje kan veroorzaken en (f) een magnetisch veld een cirkelbeweging van een geladen deeltje kan veroorzaken. Daarnaast peilt de *pre-* en *posttest* of leerlingen de linkerhandregel kunnen toepassen om de richting van de Lorentzkracht op een bewegend geladen deeltje in een magnetisch veld te bepalen. Door tijdens de *pre-* en *posttest* te vragen of een beweging eenparig of eenparig versneld/vertraagd is en hoe de grootte en richting van de kracht verandert tijdens de beweging kan verder inzicht worden verkregen in het conceptuele begrip en of leerlingen de koppeling met de mechanica kunnen maken.

Het tweede deel van de *pre-* en *posttest*, zoals weergegeven in Figuur 14, peilt verder of leerlingen hun kennis over (het verschil tussen) elektrische en magnetische velden kunnen toepassen om te beredeneren welke soorten bewegingen van een geladen deeltje kunnen plaatsvinden in homogene elektrische en magnetische velden. Door tijdens de *pre-* en *posttest* te vragen hoe deze bewegingen kunnen plaatsvinden kan verder inzicht worden verkregen in het conceptuele begrip.

Elektrische velden

Beantwoord voor elk van de drie onderstaande situaties de volgende vragen:

- a. In welke richting werkt de kracht op de lading?
- A) Naar boven B) Naar beneden
 C) Naar links D) Naar rechts
 E) Uit het papier F) In het papier
 G) Er werkt geen kracht
- b. Welk traject legt het deeltje af?
 Schets dit in de figuur.

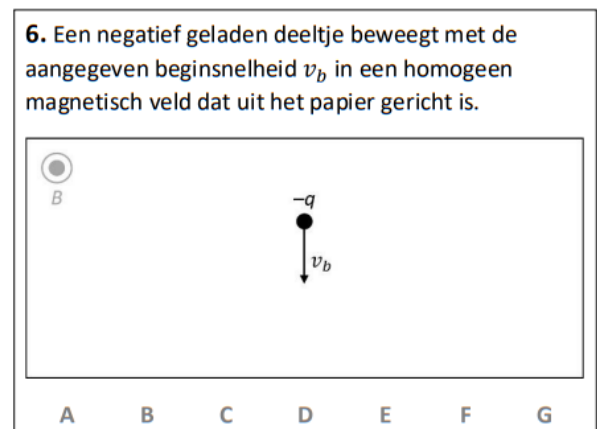
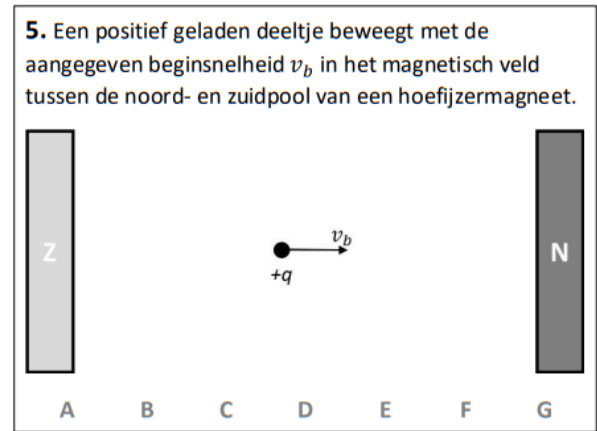
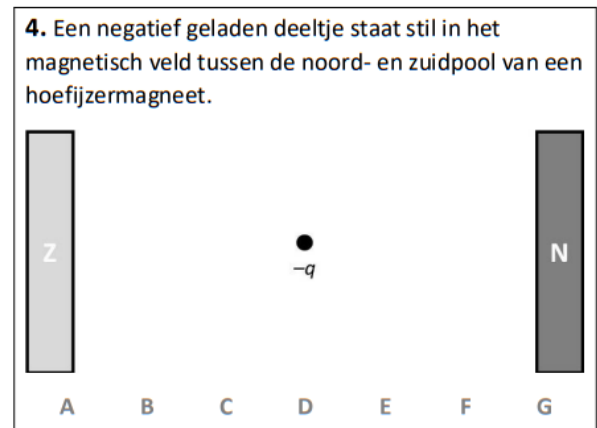


(a) Elektrische velden

Magnetische velden

Beantwoord voor elk van de drie onderstaande situaties de volgende vragen:

- a. In welke richting werkt de kracht op de lading?
- A) Naar boven B) Naar beneden
 C) Naar links D) Naar rechts
 E) Uit het papier F) In het papier
 G) Er werkt geen kracht
- b. Welk traject legt het deeltje af?
 Schets dit in de figuur.



(b) Magnetische velden

Figuur 13: Pre- en posttest – Deel 1

7. Welke van onderstaande bewegingen van een geladen deeltje kunnen in een homogeen **elektrisch veld** plaatsvinden?

Er zijn meerdere antwoorden mogelijk.

- A) Een eenparige rechtlijnige beweging
- B) Een eenparig versnelde rechtlijnige beweging
- C) Een kromlijnige beweging (zoals bij een horizontale worp)
- D) Een eenparige cirkelbeweging

(a) Elektrische velden

8. Welke van onderstaande bewegingen van een geladen deeltje kunnen in een homogeen **magnetisch veld** plaatsvinden?

Er zijn meerdere antwoorden mogelijk.

- A) Een eenparige rechtlijnige beweging
- B) Een eenparig versnelde rechtlijnige beweging
- C) Een kromlijnige beweging (zoals bij een horizontale worp)
- D) Een eenparige cirkelbeweging

(b) Magnetische velden

Figuur 14: Pre- en posttest – Deel 2

4.2 Leerlingreviews

De *leerlingreviews* zijn uitgevoerd zoals beschreven in de Methode in Paragraaf 2.2. In de bijlage is de uitgebreide uitwerking van elk van de *leerlingreviews* te vinden. Hieronder wordt het algemene beeld dat volgt uit deze *leerlingreviews* samengevat op vier verschillende onderdelen: (1) de effectiviteit op niveau 1 (*doen*), (2) de effectiviteit op niveau 2 (*leren*), (3) evaluatie van de simulatie en (4) algemene feedback.

4.2.1 Niveau 1 - Doen

Twee van de leerlingen bij de *individuele leerlingreviews* gebruikten de kaartjes in de volgorde 'Ontdekken', 'Voorspellen' en 'Maken'. De andere leerling had al goed begrip van elektrische en magnetische velden en besloot om eerst zelf te experimenteren met de simulatie alvorens 'Voorspellen' te doen. Omdat volgens de specificatie van de leeractiviteit de leerlingen zelf mochten kiezen óf en welke kaartjes ze wilden gebruiken en deze leerlingen goed konden inschatten wat voor hen nuttig was, was de leeractiviteit in dit opzicht effectief op het niveau van *doen*. Twee leerlingen volgden daarbij de juiste POE-aanpak waarbij ze voorspelden wat er zou gebeuren, dit testten met de simulatie, hiervoor een verklaring zochten en de verklaring op de achterkant lazen. De andere leerling moest regelmatig worden aangespoord om eerst te voorspellen en was vaak te gehaast om de verklaring op de achterkant te lezen. Voor deze leerling was de leeractiviteit dus minder effectief op het niveau van *doen* dan voor de andere twee leerlingen.

Bij de *klassikale leerlingreviews* is minder bekend over de effectiviteit op het niveau van *doen*. Wel is bekend dat de leeractiviteit voor één tweetal nauwelijks effectief was op het niveau van *doen*. Deze leerlingen gebruikten slechts één 'Ontdekken'-kaartje en enkele 'Maken'-kaartjes en experimenteerden daarna zelf met de simulatie zonder specifiek doel. Deze leerlingen dachten zelf dat ze al goed begrip hadden van elektrische en magnetische velden, maar uit de *pretest* bleek dat ze geen (duidelijk) onderscheid maakten tussen beide en zelfs enkele misconcepties hadden. Door de lage effectiviteit op het niveau van *doen* kwamen ze hier echter niet achter, waardoor de effectiviteit op het niveau van *leren* voor deze leerlingen ook beperkt was.

4.2.2 Niveau 2 - Leren

Uit de *pretest* bleek dat de meeste leerlingen voorafgaand aan de leeractiviteit al redelijk begrip hadden van elektrische velden, maar dat de meeste leerlingen magnetische velden nog niet goed begrepen of geen duidelijk onderscheid maakten tussen beide. Daarbij bestonden de misconcepties dat

een magnetisch veld geen invloed heeft op geladen deeltjes en dat een positief geladen deeltje wordt aangetrokken door de zuidpool van een magneet. Bij de meeste leerlingen heeft de leeractiviteit in enige mate bijgedragen aan de conceptuele begripsvorming over elektrische en met name magnetische velden.

De meeste leerlingen ontdekten dat op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld geen kracht werkt, hoewel niet iedereen dit inzicht vervolgens ook kon toepassen bij de *posttest*. Daarnaast ontwikkelden enkele leerlingen het begrip dat ook op een geladen deeltje dat evenwijdig aan het magnetisch veld beweegt geen magnetische kracht werkt. Verder heeft de leeractiviteit bij de meeste leerlingen bijgedragen aan hun begrip over welke soorten bewegingen een geladen deeltje kan uitvoeren in elektrische en magnetische velden, met name de kromlijnige beweging in een elektrisch veld en de eenparige cirkelbeweging in een magnetisch veld, hoewel dit begrip bij een groot deel nog niet volledig is.

Voor één leerling heeft de leeractiviteit daarnaast geholpen om inzicht te krijgen in de linkerhandregel en raketnotatie. Een andere leerling heeft geleerd dat de grootte en richting van de kracht op een bewegend geladen deeltje in een homogeen elektrisch veld constant blijven. Deze leerling heeft daarnaast een helderder beeld gekregen over de invloed die een magnetisch veld op een geladen deeltje heeft en dat een magneetveld niet alleen een kracht uitoefent op een magneet of stroomvoerende draad. Nog een andere leerling heeft een duidelijker beeld gekregen over het verschil tussen elektrische en magnetische velden.

Hoewel bovenstaande conceptuele begripsvorming heeft plaatsgevonden tijdens de leeractiviteit hebben zeker niet alle leerlingen volledig conceptueel begrip van elektrische en magnetische velden opgebouwd. Verder waren er twee tweetallen waarbij de resultaten van de *pre-* en *posttest* suggererden dat de effectiviteit op het niveau van *leren* erg laag was. Het ene tweetal was het hierboven beschreven tweetal waarbij de effectiviteit op het niveau van *doen* ook laag was. Over de oorzaak bij het andere tweetal is weinig bekend, omdat bij die *klassikale leerlingreview* geen scherm- of geluidsoptnamen zijn gemaakt.

4.2.3 Simulatie

Uit de *leerlingreviews* is gebleken dat de simulatie over het algemeen redelijk intuïtief is in het gebruik. Zo was het voor de meeste leerlingen bijvoorbeeld snel duidelijk hoe ze de massa en lading konden aanpassen en de elektrische en magnetische velden konden verplaatsen, vergroten/verkleinen, van richting en sterkte veranderen en aan- of uitzetten. Ook wanneer een geladen deeltje loodrecht op het scherm bewoog was het door de animatie voor de meeste leerlingen redelijk snel duidelijk wat er gebeurde, hoewel ze hier soms een korte toelichting bij nodig hadden. Verder was het niet storend dat door een programmeerfout een geladen deeltje soms naar de linkerbovenhoek sprong.

Uit de *leerlingreviews* bleek echter ook dat het over het algemeen niet vanzelfsprekend was dat een geladen deeltje verwijderd kon worden door deze terug naar de voorraad te slepen. Daarnaast was de functie van de sjablonen in eerste instantie niet duidelijk voor de meeste leerlingen en ook na instructie werden ze niet veel gebruikt. De keuzeknoppen om de krachten, snelheden, stroomsterktes en sporen weer te geven werden vaak wel na enige tijd ontdekt en aangezet, maar werden vervolgens meestal niet meer uitgezet.

Verder zijn er nog enkele verbeterpunten uit de *leerlingreviews* naar voren gekomen. Zo is het nuttig om de 'E' of 'B' boven de schuifknop te zetten in plaats van eronder, de instellingen van de velden pas te laten verschijnen wanneer op het veld wordt geklikt en bij klikken op de voorraad van elek-

trische of magnetische velden (in plaats van slepen) geen veld te creëren. Verder bleek dat er soms nog meerdere dingen tegelijk bediend worden met de muis wanneer deze zich onder elkaar bevinden, zoals de pijl voor het vergroten/verkleinen van de velden die soms over de schuifknop voor de veldsterkte staat. Ook kunnen de velden nu nog zo smal worden dat ze moeilijk te verwijderen zijn. Daarnaast blijven de vectorpijlen van de kracht en snelheid staan wanneer een deeltje met de muis versleept wordt, terwijl deze op dat moment zouden moeten verdwijnen. Een laatste verbeterpunt is dat de geladen deeltjes beter alleen uitgelijnd kunnen worden met andere stilstaande deeltjes en niet met bewegende deeltjes.

Ook zijn er enkele suggesties voor extra functies uit de *leerlingreviews* gekomen. Zo kan het interessant zijn om de mogelijkheid te hebben elektrische en magnetische velden te laten overlappen of om deeltjes met de muis een beginsnelheid te kunnen geven door ze te 'gooien'. Wanneer een veld ergens niet past kan het verder handig zijn om het veld gestippeld weer te geven, zodat duidelijk is waarom het veld niet op die plek past. Bovendien zou een pauze-functie toegevoegd kunnen worden, evenals de mogelijkheid om naast een schuifknop een exacte waarde in te vullen.

4.2.4 Algemeen

De meeste leerlingen gaven aan het leuk te vinden om de simulatie te gebruiken en de leeractiviteit uit te voeren en (bijna) allemaal gingen ze er actief mee aan de slag. Een van de leerlingen gaf daarbij expliciet aan dat ze het gebruik van het "kaartspel" een leuke toevoeging vond, omdat ze hierdoor meer ideeën had voor wat ze met de simulatie kon uitproberen. Een andere leerling was zelfs zo enthousiast dat ze graag nog even door wilde gaan: "O, ik speel graag verder." Verder gaven enkele leerlingen aan dat ze de simulatie duidelijk in het gebruik vonden en het gevoel hadden er iets van geleerd te hebben.

Wel werd de leeractiviteit voor enkele leerlingen na enige tijd saai. Bij één tweetal werd dit waarschijnlijk veroorzaakt doordat ze zelf het idee hadden alles al te weten over elektrische en magnetische velden en hierdoor de meeste kaartjes oversloegen. Wel maakten deze leerlingen actief gebruik van de simulatie en gaven ze aan vooral 'Maken' leuk te vinden. Bij de andere leerling werd het waarschijnlijk veroorzaakt doordat deze de linkerhandregel niet kende en hierdoor vastliep. Wel vond deze leerling het 'cool' dat de simulatie zelf was gemaakt.

5 Conclusie en discussie

Het doel van dit ontwerponderzoek was om een simulatie te ontwikkelen om conceptuele begripvorming over elektrische en magnetische velden te stimuleren. Hiertoe is allereerst het praktijkprobleem in kaart gebracht, waarna in de ontwerpfase een simulatie en bijbehorende leeractiviteit en docentenhandleiding zijn ontwikkeld. Vervolgens is de effectiviteit hiervan in de onderzoeksfase geëvalueerd aan de hand van *leerlingreviews*.

Het praktijkprobleem bleek te zijn dat leerlingen vaak geen operationeel onderscheid maken tussen elektrische en magnetische velden en de invloed die deze hebben op (bewegende) geladen deeltjes. Om dit praktijkprobleem aan te pakken moest de simulatie dus allereerst duidelijk dit verschil illustreren. Verdere voorwaarden waaraan de simulatie moest voldoen waren dat deze een actieve leerhouding zou stimuleren en intuïtief zou zijn in het gebruik. Tijdens de ontwerpfase is een simulatie ontwikkeld die voldoet aan deze ontwerpeisen. De docent die de *expertreview* uitvoerde gaf aan dat de eerste versie van de simulatie al duidelijk het verschil tussen elektrische en magnetische velden illustreerde en uit zowel de *expertreview* als de *functionaliteitenreview* bleek dat deze eerste versie intuïtief was in het gebruik. Wel zijn naar aanleiding van deze *reviews* nog enkele aanpassingen gedaan om de eindversie van de simulatie nog duidelijker en gebruiksvriendelijker te maken. Daarnaast bevat de uiteindelijke versie van de simulatie de elementen die volgens Adams et al. (2008a, 2008b) nodig zijn om een actieve leerhouding te stimuleren en de simulatie intuïtief in het gebruik te laten zijn.

In dit ontwerponderzoek is ervoor gekozen om met de simulatie vooral een actieve leerhouding te stimuleren en de sturing aan te bieden door middel van een bijbehorende leeractiviteit. Deze ontwikkelde leeractiviteit is gebaseerd op helder geformuleerde leerdoelen aan de hand van de OBIT-classificatie (Ebbens en Ettehoven, 2020) en biedt sturing aan in de vorm van een "kaartspel". De *Ontdekken*-kaartjes uit dit kaartspel laten de leerlingen de relevante concepten ontdekken en begrijpen. Aan de hand van de *Voorspellen*-kaartjes leren ze vervolgens de opgedane inzichten te integreren met hun kennis van de mechanica en dit toe te passen om in complexere situaties voorspellingen te doen. Ook bij de *Maken*-kaartjes passen leerlingen deze geïntegreerde kennis toe om het traject van een geladen deeltje te beïnvloeden door middel van elektrische en magnetische velden. De *Ontdekken*- en *Voorspellen*-kaartjes zijn gebaseerd op het POE-schema (Millar, 2010), waarbij leerlingen voorspellingen doen (*predict*), deze controleren met behulp van de simulatie (*observe*) en voor de waargenomen verschijnselen een verklaring zoeken (*explain*). Verder wordt tijdens de leeractiviteit ondersteuning aangeboden door de docent. Hiervoor is een docentenhandleiding ontwikkeld, waarin instructies voor het gebruik van de simulatie en het "kaartspel", de leerdoelen en aandachtspunten voor de docent zijn opgenomen.

Om de effectiviteit van het ontwikkelde materiaal te evalueren zijn in de onderzoeksfase *leerlingreviews* uitgevoerd, waarbij leerlingen de leeractiviteit aan de hand van de simulatie uitvoerden en hierbij ondersteund werden door een docent volgens de instructies in de docentenhandleiding. Vooraf en na afloop maakten leerlingen respectievelijk een *pre*- en *posttest* bestaande uit conceptuele vragen om het begrip over elektrische en magnetische velden te toetsen. Uit deze *leerlingreviews* bleek dat de ontwikkelde simulatie, in combinatie met het "kaartspel", inderdaad een actieve leerhouding stimuleert. Daarnaast gaven leerlingen aan de leeractiviteit leuk en duidelijk in het gebruik te vinden en het gevoel te hebben er iets van geleerd te hebben. Verder bleek uit de *leerlingreviews* dat de simulatie over het algemeen inderdaad intuïtief is in het gebruik. Met de meeste elementen in de simulatie konden de leerlingen snel overweg. Wel zijn er uit de *leerlingreviews* ook enkele verbeterpunten voor de simulatie naar voren gekomen die de simulatie effectiever of intuïtiever in het gebruik zouden

maken. Wanneer in de toekomst de simulatie verder zou worden ontwikkeld kunnen deze verbeterpunten worden verwerkt.

Tijdens de onderzoeksfase is verder aan de hand van de *leerlingreviews* de effectiviteit geëvalueerd op twee niveaus van Millar (2010). Allereerst is gekeken of leerlingen daadwerkelijk doen wat ze moeten doen (effectiviteit op het niveau van *doen*). De meeste leerlingen bleken redelijk goed te kunnen inschatten welke activiteit voor hen nuttig was, waarbij een leerling die de stof nog niet goed beheerste bij *Ontdekken* begon en een leerling die al goed begrip had van elektrische en magnetische velden juist zelf ging experimenteren en met name *Voorspellen* en *Maken* gebruikte. Wel was er ook een tweetal leerlingen dat dacht alles al te begrijpen, terwijl dit niet het geval was. Hierdoor voerden ze niet de activiteiten uit die voor hen het meest effectief zouden zijn, waardoor ze ook niet ontdekten dat hun conceptuele begrip onjuist/incompleteet was. Om dit in de toekomst te voorkomen zou een korte instaptoets kunnen worden ontwikkeld die een indicatie geeft bij welke kaartjes een leerling het best kan beginnen. Een ander alternatief is om leerlingen verplicht (enkele kaartjes van) *Ontdekken* te laten doen voordat ze door mogen gaan met *Voorspellen* of *Maken*. In beide gevallen zou meer sturing worden aangeboden, waardoor meer leerlingen de meest effectieve activiteiten uitvoeren en ze de kans krijgen om te ontdekken wat ze wel en niet begrijpen en op basis hiervan hun mentale modellen aan te passen of uit te breiden.

Het POE-schema werd door minder leerlingen op de juiste manier gevolgd, waarbij regelmatig het voorspellen (*predict*) of het zoeken naar een verklaring (*explain*) werd overgeslagen. Dit kan mogelijk verbeterd worden door als docent vooraf duidelijkere instructies hierover te geven en tijdens de leeractiviteit te controleren of leerlingen de POE-aanpak hebben begrepen en op de juiste manier uitvoeren en/of door visuele instructies (bijvoorbeeld in de vorm van symbolen) over de POE-aanpak aan de kaartjes toe te voegen. Op deze manier zouden de leerlingen waarschijnlijk meer gestimuleerd worden om de POE-aanpak te gebruiken, waardoor de effectiviteit op het niveau van *doen* verhoogd wordt, wat vervolgens ook de effectiviteit op het niveau van *leren* kan vergroten.

Ook de effectiviteit op het niveau van *leren* is geëvalueerd, waarbij is gekeken of leerlingen daadwerkelijk leren wat ze moeten leren. Bij de meeste leerlingen hebben de leeractiviteit en simulatie in enige mate bijgedragen aan de conceptuele begripsvorming, met name bij de leerlingen bij wie de effectiviteit op het niveau van *doen* ook hoog was. Bij deze leerlingen zijn zeker enkele misconcepties verholpen en is het conceptuele begrip uitgebreid of versterkt. Bij de leerlingen die niet de juiste activiteiten uitvoerden heeft de simulatie ook geen effect gehad op de conceptuele begripsvorming. Verder hebben de leerlingen door de leeractiviteit en simulatie niet volledig conceptueel begrip opgebouwd. Dit kan ook niet verwacht worden van een enkele leeractiviteit, omdat conceptuele begripsvorming zelden op een enkel moment plaatsvindt (Millar, 2010). Wel kan een leeractiviteit zo effectief mogelijk worden ingericht, zodat het een zo groot mogelijke bijdrage levert aan de conceptuele begripsvorming. De resultaten suggereren dan ook dat de simulatie en leeractiviteit een effectief onderdeel van een lessenserie over elektromagnetisme zouden kunnen zijn.

Bij de interpretatie van bovenstaande resultaten en conclusies moet er rekening mee worden gehouden dat er slechts een beperkt aantal leerlingen heeft deelgenomen aan het onderzoek en dat er geen gebruik is gemaakt van een controlegroep. Daarnaast verschilden de *pre-* en *posttest* niet van elkaar. Dit kan mogelijk invloed gehad hebben op de resultaten, omdat leerlingen bij de *posttest* de vragen herkenden en hierdoor mogelijk dezelfde antwoorden gaven als bij de *pretest*, ondanks dat ze in de simulatie iets anders hadden waargenomen.

In een vervolgonderzoek zou kunnen worden onderzocht of de simulatie (eventueel in combinatie

met de leeractiviteit) ook effectief is in een andere context. Zo zou de simulatie ingezet kunnen worden in een lessenserie bij vwo 5 of kan de simulatie worden gebruikt als demonstratie in plaats van als leerlingpracticum. Ook zou in een vervolgonderzoek kunnen worden geëvalueerd of de docentenhandleiding duidelijk is voor een docent die nog niet bekend is met de simulatie en leeractiviteit. In dit onderzoek zijn namelijk wel de instructies uit de docentenhandleiding gevolgd zoals deze bedoeld waren, maar het is onbekend of een andere docent dit ook op deze manier zou uitvoeren. Een ander vervolgonderzoek zou de effectiviteit van de simulatie op de lange termijn kunnen evalueren, omdat in dit onderzoek alleen is geëvalueerd of de simulatie en leeractiviteit op de korte termijn bijdragen aan de conceptuele begripsvorming over elektrische en magnetische velden.

Verder zouden in de toekomst de simulatie, leeractiviteit en docentenhandleiding verder ontwikkeld kunnen worden. Hierbij kunnen de bovengenoemde verbeterpunten worden verwerkt om de effectiviteit op zowel het niveau van *doen* als het niveau van *leren* te verhogen. Naast het verbeteren van de omgeving *Lab* kan verder de omgeving *Game* worden ontwikkeld.

Literatuur

- Adams, W., Reid, S., LeMaster, R., Mckagan, S., Perkins, K., Dubson, M., & Wieman, C. (2008a). A Study of Educational Simulations Part I - Engagement and Learning. *Journal of Interactive Learning Research, 19*.
- Adams, W., Reid, S., LeMaster, R., Mckagan, S., Perkins, K., Dubson, M., & Wieman, C. (2008b). A Study of Educational Simulations Part II - Interface Design. *Journal of Interactive Learning Research, 19*.
- Arons, A. (1997). Electromagnetism. In *Teaching Introductory Physics* (pp. 218–233). Wiley.
- Berg, E. van den, & Bunin, J. (1994). Practicum: leren ze er wat? *NVOX, 19*(6), 245–249.
- Ebbens, S., & Ettekoven, S. (2020). *Effectief Leren* (5th ed.). Noordhoff.
- Kortland, K., Mooldijk, A., & Poorthuis, H. (2017). *Handboek natuurkundendidactiek*. Epsilon Uitgaven.
- Millar, R. (2010). Analysing practical science activities to assess and improve their effectiveness. The Association for Science Education.
- Rutten, N., van Joolingen, W., & Veen, J. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education, 58*, 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>

Bijlage – Leerlingreviews

In totaal hebben aan de *leerlingreviews* tien leerlingen deelgenomen, drie aan de *individuele leerlingreviews* en zeven aan de *klassikale leerlingreviews*. De resultaten van elk van de *leerlingreviews* zijn hieronder verder uitgewerkt en onderverdeeld in een evaluatie van de effectiviteit op niveau 1 (*doen*) en niveau 2 (*leren*), een evaluatie van de simulatie en een algemene evaluatie. Om de anonimiteit van de deelnemende leerlingen te waarborgen wordt naar elk van de leerlingen verwezen met 'ze/haar'.

Individuele leerlingreviews

Leerling 1

Deze *leerlingreview* is individueel uitgevoerd en hierbij zijn geluidsopnamen gemaakt.

Niveau 1 - Doen

Ze begon met 'Ontdekken', vervolgens 'Voorspellen' en probeerde daarna nog een aantal kaartjes van 'Maken'. Voor haar was deze volgorde waarschijnlijk het meest nuttig, omdat ze van tevoren nog niet alles van 'Ontdekken' goed begreep. Ze ging echter redelijk gehaast door de kaartjes heen, waarbij ze nauwelijks de tijd nam om te voorspellen wat er zou gebeuren alvorens de simulatie te gebruiken en niet vaak de achterkant van de kaartjes las. Vooral tot het voorspellen moest ze regelmatig worden aangespoord.

Niveau 2 - Leren

Door het uitvoeren van de leeractiviteit heeft deze leerling het volgende begrip ontwikkeld:

- Op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld werkt geen kracht.
 - *Pretest*: Bij vraag 4 van de *pretest* gaf ze weliswaar aan dat het geladen deeltje stil zou blijven staan, maar dit kwam door de misconceptie dat een magnetisch veld helemaal geen invloed heeft op een geladen deeltje: "Er werkt geen kracht, want hij wordt niet echt aangetrokken door een magnetisch veld, want er zit geen elektrisch veld bovenop."
 - *Leeractiviteit*: Door het eerste 'Ontdekken'-kaartje over magnetische velden kwam ze tot het inzicht dat op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld geen kracht werkt door een waarneming te doen die niet overeenkwam met haar verwachting dat het deeltje zou gaan bewegen in de richting van het magnetisch veld (een voorspelling die niet consistent is met het idee dat een magnetisch veld geen invloed heeft op geladen deeltjes). Vervolgens kon ze met hulp de waarneming koppelen aan de formule voor de Lorentzkracht en een consistente conclusie trekken.
 - *Leeractiviteit*: Bij latere kaartjes kon ze haar opgedane inzicht toepassen: "Er gebeurt nu niks, [want] hij staat stil in een magnetisch veld."
 - *Posttest*: Bij vraag 4 van de *posttest* gaf ze aan: "Deze blijft stilstaan, want er werkt geen kracht. Er staat geen elektrisch veld op, alleen een magnetisch veld, en hij heeft geen snelheid."

Daarnaast heeft ze tijdens de leeractiviteit ontdekt dat de linkerhandregel niet werkt wanneer de bewegingsrichting van een geladen deeltje evenwijdig is aan de richting van het magnetisch veld en dat er dan geen kracht op het geladen deeltje werkt. Hierover heeft ze verder uitleg gekregen.

Vervolgens kon ze het inzicht beperkt toepassen, maar het is geen operationele kennis geworden.

Het uitvoeren van de leeractiviteit heeft vooral bijgedragen aan haar inzicht in de soorten bewegingen van een geladen deeltje die kunnen plaatsvinden in elektrische en magnetische velden. Ze heeft het volgende begrip ontwikkeld:

- Een geladen deeltje kan een kromlijnige beweging uitvoeren in een elektrisch veld.
 - *Pretest*: Bij vraag 3 van de *pretest* tekende ze een schuine rechte lijn in plaats van een paraboolvorm. Bij vraag 7 dacht ze dat een kromlijnige beweging niet kan plaatsvinden in een elektrisch veld.
 - *Leeractiviteit*: Bij 'Ontdekken' heeft ze waargenomen dat een kromlijnige beweging plaatsvond en heeft de onderzoeker dit toegelicht en gekoppeld aan de 'horizontale worp'. Bij 'Voorspellen' kon ze dit vervolgens toepassen en ook bij 'Maken' wist ze dat voor de paraboolvorm elektrische velden nodig waren.
 - *Posttest*: Bij vraag 3 van de *posttest* tekende ze het juiste traject en noemde ze de 'horizontale worp'. Bij vraag 7 gaf ze aan dat een kromlijnige beweging kan plaatsvinden in een elektrisch veld.
- Een geladen deeltje kan een eenparige cirkelbeweging uitvoeren in een magnetisch veld.
 - *Pretest*: Bij vraag 6 van de *pretest* kon ze niet de juiste richting van de Lorentzkracht bepalen (ze gebruikte niet de linkerhandregel) en wist ze niet dat het deeltje een cirkelbeweging zou maken. Bij vraag 8 gaf ze ook niet aan dat een eenparige cirkelbeweging kon plaatsvinden in een magnetisch veld.
 - *Leeractiviteit*: Tijdens de leeractiviteit kwam ze tot het inzicht dat een eenparige cirkelbeweging kan plaatsvinden in een magnetisch veld door een waarneming te doen die niet overeenkwam met haar verwachting dat het deeltje een kromlijnige beweging zoals in een elektrisch veld zou maken. Dit kon ze vervolgens koppelen aan bekende theorie: "Ik weet dat de Lorentzkracht soms als middelpuntzoekende kracht werkt." Bij de andere kaartjes kon ze dit inzicht vervolgens consistent toepassen, zoals bij de cirkelbewegingen bij 'Maken'.
 - *Posttest*: Bij vraag 6 van de *posttest* wist ze na enige twijfel dat het deeltje een eenparige cirkelbeweging zou maken. Ook bij vraag 8 gaf ze aan dat een eenparige cirkelbeweging kan plaatsvinden in een magnetisch veld.
- Een geladen deeltje kan niet een eenparige rechte beweging uitvoeren in een elektrisch veld.
 - *Pretest*: Bij vraag 7 van de *pretest* gaf ze aan dat een eenparige rechte beweging kan plaatsvinden in een elektrisch veld, waarbij ze suggereerde dat het deeltje buiten het veld zou worden aangetrokken door het veld en daarbij met een constante snelheid richting het veld zou bewegen.
 - *Posttest*: Bij vraag 7 van de *posttest* gaf ze aan dat een eenparige rechte beweging niet kan plaatsvinden in een elektrisch veld: "[...] omdat hij altijd versnelt wordt, omdat hij wordt aangetrokken."

Verder heeft ze door de leeractiviteit een duidelijker beeld gekregen van het verschil tussen elektrische en magnetische velden. Bij vraag 8 van de *pretest* gaf ze bijvoorbeeld aan dat elektrische en magnetische velden een vergelijkbaar effect hebben op geladen deeltjes: "Eigenlijk dezelfde redenering als net voor [vraag 7]." Bij de vraag of elektrische en magnetische velden hetzelfde zijn gaf ze

aan: "Nee, maar ze hebben wel dezelfde eigenschappen, qua aantrekken en, zeg maar, snelheid." Bij het eerste deel van de *pretest* leek ze juist te denken dat een magnetisch veld helemaal geen invloed heeft op een geladen deeltje. Na afloop van de leeractiviteit kon ze beter onderscheid maken tussen elektrische en magnetische velden. Dit bleek met name uit vraag 7 en 8 van de *posttest* die ze correct beantwoordde. Bij vraag 6 van de *posttest* bleek echter ook dat ze nog wel enige moeite had met het onderscheid, omdat ze in eerste instantie zei: "Er is niet echt een elektrisch veld, dus er kan niet echt een Lorentzkracht op werken, toch?" Vervolgens corrigeerde ze zichzelf en begreep ze dat het geladen deeltje een cirkelbeweging zou maken.

Simulatie

De resultaten van deze *leerlingreview* suggereren dat onderstaande conclusies kunnen worden getrokken over de simulatie.

- Schuifknoppen voor lading en massa:
 - Het gebruik van de schuifknoppen is snel duidelijk en wordt veel toegepast.
 - Er wordt regelmatig net naast de schuifknop geklikt, waardoor enkele pogingen nodig zijn om de schuifknop te verslepen.
- Velden creëren:
 - Het gebeurt regelmatig dat op de voorraad wordt geklikt, in plaats van een veld ervan-
daan te slepen, waardoor een veld bovenop de voorraad ontstaat.
- Instellingen velden:
 - Doordat de grootte (E of B) onder de schuifknop voor de veldsterkte staat is het niet
intuïtief dat je de schuifknop omhoog moet schuiven om de veldsterkte te vergroten.
- Velden vergroten en verkleinen:
 - Het vergroten/verkleinen van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden van richting veranderen:
 - Het veranderen van de richting van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden aan-/uitzetten:
 - Het aan-/uitzetten van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Klikken en verslepen:
 - Het pijltje om een veld te vergroten staat soms over de schuifknop heen waarmee de veld-
sterkte kan worden aangepast. Hierdoor worden beide soms aangepast door de muis te
slepen.
- Geladen deeltje naar linkerbovenhoek:
 - Het is niet storend dat een geladen deeltje soms naar de linkerbovenhoek springt.
- Geladen deeltje verwijderen:
 - Het is niet vanzelfsprekend dat je een stilstaand geladen deeltje kan verwijderen door deze
terug te slepen naar de voorraad.

- Geladen deeltje beweegt uit scherm:
 - Het is duidelijk wat er gebeurt wanneer een deeltje in/uit het scherm beweegt.
- Keuzeknoppen:
 - De keuzeknoppen om de krachten/snelheden/stroomsterktes/sporen weer te geven worden na instructie aangezet, maar worden vervolgens niet meer uitgezet.
- Sjablonen:
 - De sjablonen zijn niet direct vanzelfsprekend, maar na erop te wijzen worden ze af en toe gebruikt.

Algemeen

Deze leerling ging actief aan de slag met de simulatie en leeractiviteit. Tijdens het gebruik van de simulatie gaf ze aan dat ze het "kaartspel" bij de simulatie leuk vond om te gebruiken: "Ik vind die kaartjes echt wel leuk. Je hebt heel veel simulaties wel van dingen, maar dan is het meestal van: 'Oja, speel er maar gewoon mee en zie maar wat er gebeurt.' Maar zelf zou ik dit bijvoorbeeld niet proberen."

Verder gaf ze over het algemeen nog aan: "Ik vond het ook echt wel leuk, want je kan het zo echt zien en namaken."

Leerling 2

Deze *leerlingreview* is individueel uitgevoerd en hierbij zijn geluidsopnamen gemaakt.

Niveau 1 - Doen

Deze leerling koos er bij het uitvoeren van de leeractiviteit voor om te beginnen met 'Ontdekken', dan 'Voorspellen' te doen en vervolgens nog een aantal kaartjes van 'Maken' te doen. Zoals de bedoeling was voorspelde ze bij de meeste kaartjes eerst wat er zou gebeuren door de vraag te beantwoorden, testte ze dit met de simulatie en las ze vervolgens de verklaring op de achterkant alvorens verder te gaan naar het volgende kaartje. Wanneer ze zeker was wat er zou gebeuren controleerde ze haar voorspelling niet met de simulatie, maar bekeek ze nog wel de achterkant van het kaartje.

Niveau 2 - Leren

Voorafgaand aan het uitvoeren van de leeractiviteit wist deze leerling al veel over elektrische en magnetische velden en kon ze hiertussen redelijk onderscheid maken. Zelf gaf ze ook aan het begrip wel te hebben, maar juist moeite te hebben met het gebruiken en omschrijven van formules. Toch blijkt uit deze *leerlingreview* dat de leeractiviteit heeft bijgedragen aan de conceptuele begripsvorming van deze leerling. Tijdens het uitvoeren van de leeractiviteit heeft ze het volgende begrip (gedeeltelijk) ontwikkeld:

- De grootte (en richting) van de elektrische kracht op een geladen deeltje in een homogeen elektrisch veld is constant en onafhankelijk van de beweging van het deeltje.
 - *Pretest*: Nadat ze bij vraag 2 van de *pretest* werd gevraagd of de grootte en richting van de kracht verandert gaf ze aan dat de richting van de kracht hetzelfde blijft, maar dat ze niet wist of de grootte van de kracht constant is: "O, dat is een goede. Dat weet ik niet zo goed eigenlijk."

- *Posttest*: Bij de *posttest* gaf ze bij vraag 2 aan dat zowel de grootte als de richting van de kracht niet verandert.
- Een magnetisch veld kan niet alleen een kracht uitoefenen op een magneet of stroomvoerende draad, maar ook op een bewegend geladen deeltje.
 - *Pretest*: Bij vraag 4 van de *pretest* gaf ze aan: "Het is een homogeen magnetisch veld, dus er gebeurt niks." Bij de andere vragen wist ze echter wel dat er een Lorentzkracht zou werken.
 - *Leeractiviteit*: Bij het eerste 'Ontdekken'-kaartje over magnetische velden zei ze: "Een magnetisch veld doet alleen wat met magneten." Verder kon ze zich hierbij alleen de formule voor de Lorentzkracht op een stroomvoerende draad herinneren en niet die voor de Lorentzkracht op een bewegend geladen deeltje.
 - *Posttest*: Bij vraag 4 van de *posttest* lichtte ze toe: "Het is een magneetveld. En daar gebeurt alleen iets in als het deeltje beweegt."

Daarnaast heeft deze leerling door het uitvoeren van de leeractiviteit een duidelijker beeld gekregen van de soorten bewegingen van een geladen deeltje die kunnen plaatsvinden in elektrische en magnetische velden:

- Kromlijnige beweging in een elektrisch veld:
 - *Pretest*: Bij vraag 3 van de *pretest* had ze niet helder wat er gebeurt met de verticale snelheidscomponent. In eerste instantie dacht ze dat het deeltje terug omhoog buigt. Nadat ze werd gevraagd of de kracht constant naar rechts gericht blijft, tekende ze ongeveer een paraboolvorm, maar daarbij gaf ze aan dat het deeltje uiteindelijk precies horizontaal zou gaan bewegen.
 - *Leeractiviteit*: Tijdens het uitvoeren van de leeractiviteit vroeg ze: "Gaat het deeltje uiteindelijk parallel aan de veldlijnen of blijft het zeg maar zo krom?" Hierna kon ze haar opgedane kennis over de kromlijnige beweging toepassen bij de 'Voorspellen'-kaartjes en ook bij het 'Maken' van de paraboolvormen begreep ze dat er elektrische velden nodig waren.
 - *Posttest*: Bij vraag 3 van de *posttest* gaf ze aan dat het deeltje een paraboolvorm maakt en de verticale snelheidscomponent daarbij niet verandert.
- Eenparige cirkelbeweging in een magnetisch veld:
 - *Pretest*: In eerste instantie tekende ze bij vraag 6 van de *pretest* hetzelfde traject als bij vraag 3 (een paraboolvorm). Nadat ze werd gevraagd of de kracht constant naar rechts gericht blijft, bedacht ze zich dat de richting van de Lorentzkracht verandert en tekende ze de juiste cirkelbeweging. Hierbij maakte ze niet de koppeling met de middelpuntzoekende kracht.
 - *Leeractiviteit*: Bij het eerste 'Ontdekken'-kaartje waarbij een eenparige cirkelbeweging plaatsvindt, voorspelde ze de richting van de Lorentzkracht juist, maar was ze verbaasd dat het deeltje een cirkelbeweging maakte. Hier vond ze vervolgens zelf een verklaring voor en na een vraag over cirkelbewegingen kon ze ook de koppeling maken met de middelpuntzoekende kracht. Deze kennis kon ze vervolgens consistent toepassen bij de andere kaartjes, zoals het 'Maken' van een serie cirkelbewegingen: "Dit is volgens mij hetzelfde, maar dan met een magnetisch veld. Het zijn gewoon rondjes."

- *Posttest*: Bij vraag 6 van de *posttest* tekende ze meteen de juiste cirkelbeweging en kon daarbij de linkerhandregel correct toepassen en de koppeling met de middelpuntzoekende kracht maken om uit te leggen waardoor de cirkelbeweging wordt veroorzaakt.

Simulatie

De resultaten van deze *leerlingreview* suggereren dat onderstaande conclusies kunnen worden getrokken over de simulatie.

- Velden overlappen:
 - “Kan je ook twee velden in elkaar doen?” – Leuk? – “Ja, maar ik weet dan niet zo goed wat er gebeurt.”
 - Het kan interessant zijn om te kunnen experimenteren met wat er gebeurt als een elektrisch veld en magnetisch veld overlappen.
- Velden vergroten en verkleinen:
 - Het vergroten/verkleinen van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden van richting veranderen:
 - Het veranderen van de richting van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden aan-/uitzetten:
 - Het aan-/uitzetten van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Veldsterkte aanpassen:
 - Het aanpassen van de veldsterkte is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Geladen deeltje naar linkerbovenhoek:
 - “Nou, maar het is wel duidelijk wat er gebeurt.”
 - Het is niet storend dat een geladen deeltje soms naar de linkerbovenhoek springt.
- Geladen deeltje verwijderen:
 - Het is niet vanzelfsprekend dat je een stilstaand geladen deeltje kan verwijderen door deze terug te slepen naar de voorraad.
- Geladen deeltje beweegt uit het scherm:
 - Het in/uit het scherm bewegen van een deeltje is in eerste instantie niet helemaal duidelijk, maar bij de tweede keer wel.
- Sjablonen:
 - De sjablonen zijn niet direct vanzelfsprekend, maar na erop te wijzen worden ze af en toe gebruikt.

Algemeen

Deze leerling vond het leuk om deel te nemen aan het onderzoek en daarbij de simulatie te gebruiken en nam hierbij een actieve leerhouding aan.

Leerling 3

Deze leerling kon bij de *pretest* alle vragen al juist beantwoorden en kon hierbij ook de juiste toelichting geven en passende terminologie gebruiken. Deze *leerlingreview* gaf dus weinig inzicht in de effectiviteit van de leeractiviteit bij de conceptuele begripsvorming. Wel gaf deze *leerlingreview* de mogelijkheid om de gebruiksvriendelijkheid van de simulatie te testen en op inhoudelijk niveau de simulatie te evalueren.

Niveau 1 - Doen

Deze leerling begon met het uitproberen van de simulatie en zelf experimenteren. Hierna heeft ze alleen de kaartjes van 'Voorspellen' en één kaartje van 'Maken' gebruikt. Voor deze leerling was dit een goede keuze, omdat ze al goed begrip had van elektrische en magnetische velden en ze dit kon verifiëren en uitbreiden door zelf te experimenteren. Zo heeft ze (1) geprobeerd een sinusbeweging in elektrische velden te laten herhalen door het geladen deeltje met behulp van magnetische velden terug te laten keren naar het beginpunt, (2) een cyclotron nagemaakt en (3) een vierpuntige "ster" geprobeerd te maken. Omdat volgens de specificatie van de leeractiviteit leerlingen zelf konden kiezen óf en welke kaartjes ze wilden gebruiken en deze leerling goed kon inschatten wat voor haar het meest nuttig zou zijn, was de leeractiviteit in dit geval effectief op het niveau van *doen*.

Niveau 2 - Leren

De simulatie heeft weinig invloed gehad op de conceptuele begripsvorming van deze leerling, omdat ze al goed inzicht had in (het verschil tussen) elektrische en magnetische velden en de mogelijke misconcepties bij deze leerling niet voorkwamen. Mogelijk is haar mentale model van elektrische en magnetische velden wel versterkt en uitgebreid door de interactie met de simulatie en het waarnemen van de beweging van de geladen deeltjes.

Bij het uitproberen van de simulatie ontdekte deze leerling dat de massa geen invloed heeft op (de vorm van) het traject bij een kromlijnige in een elektrisch veld. Hieruit concludeerde ze later dat ook de lading geen effect zou hebben: "Ik heb in ieder geval de lading groter gemaakt. Dat zou er dan ook geen effect op moeten hebben."

Daarnaast ontdekte deze leerlingen enkele verschijnselen in de simulatie die natuurkundig gezien niet correct zijn. Zo verdwijnt een geladen deeltje soms plotseling naar de linkerbovenhoek ("Dat gebeurt normaal gesproken niet, toch?") en "er is geen interactie tussen de deeltjes".

Simulatie

De resultaten van deze *leerlingreview* suggereren dat onderstaande conclusies kunnen worden getrokken over de simulatie.

- Schuifknoppen voor lading en massa:
 - "Dat is op zich wel een slim idee om de verschillende ladingen aan te geven."
 - Het is duidelijk welke schuifknop voor de lading is en welke voor de massa. Door het veranderen van de grootte van het deeltje of de dikte van het symbool is het duidelijk welke invloed de schuifknoppen hebben.
- Waarden bij schuifknoppen:

- “Misschien zou een waarde handig zijn.”
- Het kan handig zijn om ook de optie te hebben een exacte waarde in te vullen naast een schuifknop. Dit is met name handig wanneer de gebruiker een waarde nauwkeurig wil aanpassen of een opgave wil namaken met de simulatie. Voor de standaard leeractiviteit is het echter niet nodig en kan het zelfs afleiden.
- Geladen deeltjes snelheid geven met muis:
 - “Kan je ze al een snelheid geven?”
 - Het is niet mogelijk om een geladen deeltje in een veld te ‘gooien’, terwijl dit soms handig kan zijn.
- Pauze:
 - “Is er een pauzeer-functie?” – “Maar de pijl blijft nog wel toch?”
 - Een pauzeknop is niet toegevoegd, omdat het de suggestie zou wekken dat geladen deeltjes stil kunnen staan in een elektrisch veld. Een pauzeknop kan echter wel nuttig zijn om te kijken wat er op een bepaald moment precies gebeurt. Door de bewegingsrichting met een pijl aan te geven kan de pauzefunctie toch wel worden toegevoegd.
- Velden verplaatsen (als ze niet passen):
 - “Ik zou het zelf fijner vinden als ik gewoon zie waar [het veld] niet mag staan. Dat hij dan gewoon aangeeft ‘Okee, hij mag hier niet staan’, maar dat ik wel gewoon zie waar hij is.”
 - Het veld verslepen gaat soms moeizaam wanneer velden botsen. Door het veld rood of gestippeld te maken wanneer het veld ergens niet past kan je toch zien waar het veld zou zijn en dus waardoor het veld niet kan verplaatsen.
- Velden overlappen:
 - “Magnetische en elektrische velden kunnen dus niet overlappen?”
 - Het kan interessant zijn om te kunnen experimenteren met wat er gebeurt als een elektrisch veld en magnetisch veld overlappen.
- Instellingen velden:
 - “Het zou iets fijner zijn als het menu pas komt als je er nog een keer op klikt. Dan kan je [het veld] verplaatsen zonder dat [het menu] in de weg zit.”
 - Het menu van de velden zit soms in de weg. Door het menu pas te laten verschijnen wanneer wordt geklikt op het veld kan dit verholpen worden. Wel kan het dan minder duidelijk zijn hoe je de instellingen van het veld kan aanpassen.
- Velden vergroten en verkleinen:
 - Het vergroten/verkleinen van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden van richting veranderen:
 - Het veranderen van de richting van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden aan-/uitzetten:
 - Het aan-/uitzetten van de velden wordt regelmatig gebruikt na erop te wijzen.

- Veldsterkte aanpassen:
 - Het aanpassen van de veldsterkte is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Klikken en verslepen:
 - Soms worden meerdere dingen tegelijk versleept of aangeklikt wanneer deze onder elkaar staan. Dit is wel al verholpen bij geladen deeltjes in een veld, maar bijvoorbeeld nog niet bij de pijlen om het veld te vergroten/verkleinen die soms over de schuifknop voor de veldsterkte staan (hierdoor wordt het veld soms opeens heel smal).
- Uittlijnen:
 - Het uittlijnen gebeurt nu met zowel stilstaande als bewegende deeltjes. Het is handiger om het alleen te laten gebeuren bij stilstaande deeltjes, omdat je anders een deeltje niet nauwkeurig kan plaatsen wanneer veel andere deeltjes in de buurt bewegen.
- Geladen deeltje naar linkerbovenhoek:
 - “Dat gebeurt normaal gesproken niet, toch?” – “Je kunt er ook een feature van maken. Dan kun je als een van de moeilijke vragen doen: ‘Waar klopt de simulatie niet?’.”
 - Het is niet storend dat een geladen deeltje soms naar de linkerbovenhoek springt.
- Geen interactie tussen deeltjes:
 - “Er is geen interactie tussen de deeltjes.” - “Dat is op zich voor het leren kennen van elektrische en magnetische velden niet heel erg.”
 - De ontbrekende interactie tussen de deeltjes lijkt niet voor misconcepties te zorgen.
- Keuzeknoppen:
 - Het aanzetten en langer/korter maken van het spoor wordt pas gebruikt na erop te wijzen.
- Sjablonen:
 - De sjablonen zijn niet intuïtief in het gebruik.

Algemeen

De leerling gaf aan het leuk te vinden om de simulatie te gebruiken en ermee te experimenteren. Bij de keuze om nog even door te gaan gaf ze tweemaal aan: “O, ik speel graag verder.” Aan het eind van de *leerlingreview* zei ze: “Ik vond het leuk om mee te doen.”

Klassikale leerlingreviews

Leerlingen 4 en 5

Bij deze *leerlingreview* zijn scherm- en geluidsopnamen gemaakt tijdens de leeractiviteit. Beide leerlingen hebben zowel bij de *pretest* als de *posttest* vrijwel dezelfde antwoorden gegeven.

Niveau 1 - Doen

Deze leerlingen gaven aan dat ze elektriciteit en magnetisme voorafgaand aan de leeractiviteit al begrepen. Om deze reden deden ze alleen het eerste 'Ontdekken'-kaartje en gingen ze daarna door naar 'Maken', waarvan ze ook slechts enkele kaartjes hebben gebruikt. Verder hebben ze zelf geëxperimenteerd met de simulatie, maar wat ze probeerden had weinig effect. Omdat uit de *pre-* en *posttest* bleek dat deze leerlingen geen duidelijk onderscheid maakten tussen elektrische en magnetische velden (maar ze zelf dachten dat ze alles al wisten), was het voor deze leerlingen effectiever geweest om de 'Ontdekken'-kaartjes eerst te gebruiken, met name die over magnetische velden.

Bij het gebruiken van het ene 'Ontdekken'-kaartje voorspelden ze wel eerst wat er zou gebeuren alvorens dit te testen met de simulatie. De achterkanten van de kaartjes bekeken ze slechts incidenteel, mogelijk ook omdat ze dachten dat ze het al wisten. Door 'Ontdekken' over te slaan en de verklaringen niet te lezen, kwamen ze er echter ook niet achter dat hun mentale modellen onjuist of incompleet waren. De effectiviteit op niveau 1 bij deze *leerlingreview* was dus laag.

Niveau 2 - Leren

Door de lage effectiviteit op niveau 1 was ook de effectiviteit op niveau 2 laag bij deze *leerlingreview*. Zelf vonden ze dat ze de stof al beheersten, zoals ze na afloop aangaven en zoals bleek uit de keuze om te beginnen met 'Maken', omdat dat het moeilijkst was. Uit de *pretest* bleek echter dat ze wel goed begrip hadden van elektrische velden, maar niet van magnetische velden. Zo hadden ze de misvatting dat een negatief geladen deeltje wordt aangetrokken door een noordpool: "Noordpool is +, - wordt aangetrokken door +." Bovendien gaven ze bij vraag 6 aan dat ze "geen idee" hadden en ze hadden dus geen goed begrip van de Lorentzkracht en de linkerhandregel. De antwoorden die ze gaven op de *posttest* waren grotendeels hetzelfde.

Ondanks dat de leeractiviteit weinig effectief was bij de conceptuele begripsvorming van deze leerlingen kunnen er toch enkele leermomenten worden aangewezen over de volgende onderwerpen:

- Stilstaan in een magnetisch veld:
 - *Pretest*: Bij vraag 4 van de *pretest* gaven ze allebei aan dat het stilstaande negatief geladen deeltje zou worden aangetrokken door de noordpool.
 - Leeractiviteit: Tijdens het gebruik van de simulatie ontdekten ze dat een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld niet gaat bewegen: "Ik kan letterlijk niks met deze." Later zei een van de leerlingen: "Maar er gebeurt niks in een magnetisch veld als een deeltje geen snelheid heeft."
 - *Posttest*: Bij vraag 4 van de *posttest* gaven ze nog steeds hetzelfde antwoord als bij de *pretest*.
- Eenparige cirkelbeweging in een magnetisch veld:
 - *Pretest*: Bij vraag 8 van de *pretest* gaven ze aan dat in een magnetisch veld wel een kromlijnige beweging kan plaatsvinden, maar niet een eenparige cirkelbeweging.

- Leeractiviteit: Tijdens de leeractiviteit probeerden ze cirkelbewegingen te 'Maken', maar dit probeerden ze in eerste instantie met elektrische velden. Een van beide leerlingen bedacht al wel vrij snel dat ze magnetische velden nodig hadden en na enige tijd kregen ze dan ook het juiste traject. Hierbij wisten ze de koppeling te maken met de middelpuntzoekende kracht. Ook konden ze na een korte uitleg (een afleiding van de formule van de straal) de straal van de cirkelbeweging vergroten.
- *Posttest*: Bij vraag 6 van de *posttest* wist een van de leerlingen nog steeds niet het antwoord en schetste de ander iets wat leek op een cirkelbeweging zonder hierbij de linkerhandregel te gebruiken. Bij vraag 8 gaven ze nu wel allebei aan dat een eenparige cirkelbeweging kan plaatsvinden in een magnetisch veld.

Het is opmerkelijk dat ze wel enkele nieuwe inzichten hebben opgedaan tijdens de leeractiviteit, maar dit niet konden toepassen bij de *posttest*. Dit werd mogelijk veroorzaakt doordat de *posttest* hetzelfde was als de *pretest* en ze de juiste antwoorden dus al dachten te kennen. Een andere mogelijke oorzaak is dat ze niet inzagen dat de magneet in de *posttest* een homogeen magneetveld veroorzaakte zoals dat in de simulatie en ze dus niet de koppeling konden maken met wat ze in de simulatie hadden gezien.

Simulatie

De resultaten van deze *leerlingreview* suggereren dat onderstaande conclusies kunnen worden getrokken over de simulatie.

- Schuifknoppen voor lading en massa:
 - Het gebruik van de schuifknoppen is snel duidelijk en wordt veel toegepast.
- Velden overlappen:
 - "Volgens mij kan je niet overlappen."
 - Het kan interessant zijn om te kunnen experimenteren met wat er gebeurt als een elektrisch veld en magnetisch veld overlappen.
- Velden vergroten en verkleinen:
 - Het vergroten/verkleinen van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Velden van richting veranderen:
 - Het veranderen van de richting van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
- Klikken en verslepen:
 - Doordat de pijl voor het vergroten van de velden soms overlapt met de schuifknop om de veldsterkte aan te passen worden de velden soms heel smal, waarna ze moeilijk te verwijderen zijn.
- Geladen deeltje naar linkerbovenhoek:
 - Het is niet storend dat een geladen deeltje soms naar de linkerbovenhoek springt.
- Geladen deeltje verwijderen:

- Het verwijderen van een geladen deeltje door deze naar de voorraad te slepen gaat automatisch goed.
- Geladen deeltje beweegt uit het scherm:
 - Het is ongeveer duidelijk wat er gebeurt wanneer een deeltje in/uit het scherm beweegt, maar in welke richting het deeltje beweegt is niet vanzelfsprekend.
- Keuzeknoppen:
 - De keuzeknoppen om de krachten/snelheden/stroomsterktes/sporen weer te geven worden relatief laat aangezet en worden vervolgens niet meer uitgezet.
- Sjablonen:
 - De sjablonen zijn snel duidelijk en worden af en toe gebruikt.

Algemeen

Doordat deze leerlingen het idee hadden dat ze elektriciteit en magnetisme al beheersten en daarom veel kaartjes oversloegen werd het na enige tijd saai voor ze, zoals ze tijdens de leeractiviteit tegen klasgenoten zeiden: "Het duurt best wel lang, we hebben alle kaartjes al gehad." Ook nadat de docent vroeg of ze het leuk vonden, gaven ze aan: "Ja ja ja, alleen na tien kaartjes verveelt het wel, maar het is wel leuk."

Uit de opname bleek verder wel dat ze het leuk vonden om met de simulatie te experimenteren en met name de 'Maken'-kaartjes te gebruiken: "Kom, we gaan er nog eentje maken. 'Maken' is leuk."

Leerlingen 6 en 7

Bij deze *leerlingreview* zijn geen scherm- en geluidsopnamen gemaakt op verzoek van een van de leerlingen. Over deze *leerlingreview* is dus beperkte informatie beschikbaar. Daarnaast hebben beide leerlingen bij zowel de *pretest* als de *posttest* dezelfde antwoorden gegeven.

Niveau 1 - Doen

Deze leerlingen gaven aan dat ze bij 'Ontdekken' begonnen waren en daarna een aantal kaartjes van 'Maken' hadden gedaan. Wel bleek dat ze bij 'Maken' niet op de achterkant hadden gekeken nadat ze het zelf hadden geprobeerd, terwijl het ze niet was gelukt de juiste trajecten na te maken. In dit opzicht was de leeractiviteit dus nauwelijks effectief op niveau 1. Later bij 'Voorspellen' voorspelden ze wel eerst wat er zou gebeuren alvorens de simulatie te gebruiken. Het is onbekend of ze later ook naar de verklaring op de achterkant hebben gekeken.

Niveau 2 - Leren

Doordat ze bij 'Maken' niet op de achterkant keken (lage effectiviteit op niveau 1) ontdekten ze niet dat hun trajecten net niet klopten en hierdoor leerden ze niet welke soorten bewegingen kunnen plaatsvinden in elektrische en magnetische velden (lage effectiviteit op niveau 2).

De antwoorden op de *pre-* en *posttest* die deze leerlingen gaven waren vrijwel hetzelfde, wat suggereert dat de leeractiviteit niet of nauwelijks heeft bijgedragen aan de conceptuele begripsvorming. Bij beide leerlingen was de misconceptie aanwezig dat een positief geladen deeltje wordt aangetrokken door een zuidpool. Daarnaast bleek dat ze de linkerhandregel niet konden toepassen, dat ze

niet wisten welke soorten bewegingen van een geladen deeltje in een elektrisch en magnetisch veld kunnen plaatsvinden en dat ze de misvatting hadden dat een negatief geladen deeltje de andere kant op beweegt dan de bewegingsrichting. Dit leek niet verholpen te zijn door de leeractiviteit. Het is echter mogelijk dat ze de opgedane inzichten bij de *posttest* niet konden toepassen vanwege eerdergenoemde redenen (zie *Leerlingen 4 en 5*). Zo hebben ze tijdens de leeractiviteit bijvoorbeeld wel met hulp bedacht dat een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld niet zal gaan bewegen. Verder konden ze na een uitleg over kromlijnige bewegingen en cirkelbewegingen aan de hand van 'Maken' deze kennis toepassen bij 'Voorspellen'.

Simulatie

Deze leerlingen gaven na afloop aan dat de simulatie duidelijk was in het gebruik. Verder zijn er uit deze *leerlingreview* geen gegevens gekomen over de gebruiksvriendelijkheid van de simulatie.

Algemeen

Deze leerlingen gaven na afloop aan dat ze zelf wel het gevoel hadden iets geleerd te hebben van het gebruik van de simulatie. Tijdens de leeractiviteit waren ze daarnaast actief bezig.

Leerlingen 8 en 9

Bij deze *leerlingreview* zijn geen scherm- en geluidsopnamen gemaakt op verzoek van beide leerlingen. Over deze *leerlingreview* is dus beperkte informatie beschikbaar.

Niveau 1 - Doen

Over de effectiviteit op niveau 1 is in dit geval weinig bekend. De leerlingen gaven aan alle standaard kaartjes van 'Ontdekken' te hebben gedaan en waren hier snel doorheen gegaan. Vervolgens zijn ze bezig geweest met 'Maken'. Of ze ook steeds hebben voorspeld, dit gecontroleerd hebben met de simulatie, een verklaring hebben gezocht en de verklaring op de achterkant hebben gelezen is onbekend. Ook is onbekend of ze zelf hebben geëxperimenteerd met de simulatie.

Niveau 2 - Leren

De ene leerling heeft door het uitvoeren van de leeractiviteit het volgende begrip ontwikkeld:

- Op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld werkt geen kracht.
 - *Pretest*: Bij vraag 4 van de *pretest* gaf ze aan dat het deeltje een kromlijnige beweging zou maken, met als toelichting dat ze hiervoor de linkerhandregel had gebruikt.
 - *Posttest*: Bij vraag 4 van de *posttest* kon ze aangeven dat het deeltje stil zou blijven staan met een juiste toelichting aan de hand van de formule voor de Lorentzkracht.
- Op een geladen deeltje dat evenwijdig aan het magnetisch veld beweegt werkt geen kracht.
 - *Pretest*: Bij vraag 5 van de *pretest* gaf ze aan dat het deeltje een cirkelbeweging uit het papier zou maken, met als toelichting dat ze hiervoor de linkerhandregel had gebruikt.
 - *Posttest*: Bij vraag 5 van de *posttest* gaf ze aan dat het deeltje geen traject zou afleggen, ondanks de beginsnelheid. Wel gaf ze als toelichting dat het magneetveld en de stroomrichting niet loodrecht op elkaar staan en daarom de Lorentzkracht nul is.

Daarnaast gaf ze tijdens de leeractiviteit aan dat een geladen deeltje in een magnetisch veld een cirkelbeweging zou uitvoeren en kon ze dit toepassen bij 'Maken'. Dit inzicht kon ze echter niet toepassen bij de *posttest*.

De andere leerling heeft door het uitvoeren van de leeractiviteit het volgende begrip ontwikkeld:

- Op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld werkt geen kracht.
 - *Pretest*: Bij vraag 1 van de *pretest* gaf ze aan dat op een stilstaand geladen deeltje in een elektrisch veld geen kracht werkt. Bij vraag 4 van de *pretest* gaf ze aan dat het negatief geladen deeltje wordt aangetrokken door de noordpool.
 - *Posttest*: Bij vraag 1 van de *posttest* dat op het stilstaande negatief geladen deeltje een kracht naar rechts werkt en deze naar rechts gaat bewegen. Bij vraag 4 van de *posttest* kon ze aangeven dat op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld geen kracht werkt.
- Een geladen deeltje kan een eenparig versnelde rechtlijnige beweging en een kromlijnige beweging maken in een elektrisch veld.
 - *Pretest*: Bij vraag 7 de *pretest* koos ze alle mogelijke antwoorden en gaf ze aan dat dit een gok was.
 - *Posttest*: Bij vraag 7 van de *posttest* lichtte ze toe dat een elektrisch veld kan versnellen en afbuigen.

Verder wist ze bij de *pretest* ook niet welke soorten bewegingen mogelijk zijn in een magnetisch veld. Bij de *posttest* gaf ze aan dat een kromlijnige beweging en cirkelbeweging mogelijk zijn met als toelichting dat een magnetisch veld geen rechtlijnige beweging kan maken. Het begrip over magnetische velden is dus niet helemaal juist ontwikkeld.

Daarnaast is de misconceptie dat een positief geladen deeltje wordt aangetrokken door de zuidpool niet verholpen, hoewel ze bij vraag 5 de *posttest* juist aangaf dat een positief deeltje van zuid naar noord gaat.

Simulatie

Bij de *leerlingreview* zijn geen gegevens over de (gebruiksvriendelijkheid van) de simulatie.

Algemeen

Een van beide leerlingen gaf aan de simulatie duidelijk in het gebruik te vinden en het idee te hebben er iets van geleerd te hebben. Wat de andere leerling van de leeractiviteit vond is onbekend.

Leerling 10

Bij deze *leerlingreview* zijn scherm- en geluidsopnamen gemaakt. De leerling voerde de leeractiviteit alleen uit en kreeg ongeveer halverwege uitleg van de lesgevende docent over de linkerhandregel.

Niveau 1 - Doen

Doordat de onderzoeker tijdens de *klassikale leerlingreviews* niet bij alle leerlingen tegelijk kon observeren, er alleen scherm- en geluidsopnamen zijn gemaakt en deze leerling de review individueel deed, is het onzeker in hoeverre de leeractiviteit effectief was op niveau 1. Op basis van de scherm- en geluidsopname kan wel worden geconcludeerd dat deze leerling eerst grotendeels 'Ontdekken' volgde en na advies van de onderzoeker ook de extra oefenkaartjes over de linkerhandregel gebruikte. Het is onbekend welke kaartjes ze precies gebruikte en of ze bijvoorbeeld eerst voorspelde (en wat de voorspelling was) en na afloop de verklaring op de achterkant las. Omdat deze leerling de linkerhandregel niet bleek te kennen is het echter aannemelijk dat ze de situaties op de kaartjes wel namaakte, maar niet voorspelde wat er zou gebeuren en ook de waarnemingen niet kon verklaren. De leeractiviteit was dus waarschijnlijk in eerste instantie nauwelijks effectief op niveau 1.

Niveau 2 - Leren

Uit vraag 4 en 5 van *pretest* bleek dat bij deze leerling de misconceptie aanwezig was dat een positief geladen deeltje wordt aangetrokken door een zuidpool en een negatief geladen deeltje wordt aangetrokken door een noordpool. Dit heeft ermee te maken dat deze leerling geen (duidelijk) onderscheid kon maken tussen elektrische en magnetische velden. Door het uitvoeren van de leeractiviteit is deze misconceptie verholpen en heeft ze het volgende begrip ontwikkeld:

- Op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld werkt geen kracht.
 - *Pretest*: Bij vraag 4 van de *pretest* gaf ze aan dat het negatief geladen deeltje zou worden aangetrokken door de noordpool.
 - *Leeractiviteit*: Door het uitvoeren van de leeractiviteit ontdekte ze dat op een stilstaand geladen deeltje in een magnetisch veld geen kracht werkt en dit kon ze later toepassen: "Dan gebeurt er niks, want hij heeft geen snelheid."
 - *Posttest*: Bij vraag 4 van de *posttest* gaf ze aan dat het geladen deeltje stil zou blijven staan met de juiste toelichting erbij.
- Op een geladen deeltje dat evenwijdig aan het magnetisch veld beweegt werkt geen kracht.
 - *Pretest*: Bij vraag 5 van de *pretest* gaf ze aan dat het positief geladen deeltje zou worden aangetrokken door de zuidpool.
 - *Leeractiviteit*: Tijdens de leeractiviteit legde de onderzoeker uit waarom er geen kracht werkt op een geladen deeltje dat evenwijdig beweegt aan het magnetisch veld. Dit kon ze later toepassen wanneer het magnetisch veld werd omgedraaid. Na uitleg door de docent over de linkerhandregel ontdekte ze daarnaast dat het bij een beweging evenwijdig aan het magnetisch veld niet mogelijk is om de linkerhandregel toe te passen.
 - *Posttest*: Bij vraag 5 van de *posttest* gaf ze aan dat het geladen deeltje een eenparige rechtlijnige beweging zou maken met de juiste toelichting erbij.

Uit de *pretest* bleek daarnaast dat bij deze leerling de misconceptie aanwezig was dat de richting van de kracht gelijk moet zijn aan de bewegingsrichting. Omdat ze op de *posttest* vergeten is de richting van de kracht aan te geven, is het onbekend of deze misconceptie is verholpen.

De leeractiviteit heeft daarnaast bijgedragen aan de begripsvorming over de volgende onderwerpen:

- Linkerhandregel:
 - *Pretest*: Bij vraag 6 van de *pretest* kon ze de linkerhandregel niet juist toepassen.

- Leeractiviteit: Tijdens de leeractiviteit gaf ze aan dat ze de linkerhandregel niet kende: "Eerlijk gezegd gebruik ik nooit de linkerhandregel."
 - Leeractiviteit: Na uitleg van de onderzoeker over de linkerhandregel kon ze met enige hulp de richting van de kracht juist voorspellen, maar hier had ze nog wel moeite mee. Nadat de docent de linkerhandregel nogmaals (uitgebreider) had uitgelegd kon ze in verschillende situaties de richting van de kracht juist voorspellen.
 - *Posttest*: Bij vraag 6 van de *posttest* kon ze de linkerhandregel niet juist toepassen, mogelijk door een verschil in weergave tussen de test en de simulatie.
- Raketnotatie:
 - Vooraf wist ze niet hoe de raketnotatie werkte en dus ook niet in welke richting de velden stonden. Na uitleg door de onderzoeker en de docent begreep ze de raketnotatie en kon ze dit toepassen bij het voorspellen.

Simulatie

De resultaten van deze *leerlingreview* suggereren dat onderstaande conclusies kunnen worden getrokken over de simulatie.

- Schuifknoppen voor lading en massa:
 - Het gebruik van de schuifknoppen is snel duidelijk en wordt veel toegepast.
- Geladen deeltjes snelheid geven met muis:
 - Tijdens het begeleiden van deze leerling bij de leeractiviteit probeerde de lesgevende docent een geladen deeltje met de muis een snelheid te geven.
 - Het is niet mogelijk om een geladen deeltje in een veld te 'gooien', terwijl dit soms handig kan zijn.
- Geladen deeltje beweegt uit scherm:
 - "Ik dacht dat hij explodeerde."
 - Na uitleg over de raketnotatie was het helder wat er gebeurt wanneer een geladen deeltje in/uit het scherm beweegt.
- Instellingen velden:
 - Het aanpassen van de richting van de velden is snel duidelijk en wordt veel gebruikt.
 - De veldsterkte wordt niet aangepast.
 - Het is niet duidelijk dat velden uit- en aangezet kunnen worden.
- Keuzeknoppen:
 - De keuzeknoppen om de krachten/snelheden/stroomsterktes/sporen weer te geven worden wel aangezet, maar vervolgens niet meer uitgezet.
- Sjablonen:
 - De sjablonen worden regelmatig gebruikt.
 - De sjablonen worden soms verward met de voorraden elektrische en magnetische velden, waardoor soms onbedoeld alle velden verdwijnen bij het aanklikken van een sjabloon.

- Vectorpijlen:
 - Wanneer een geladen deeltje met de muis wordt versleept blijven de vectorpijlen staan, terwijl deze tijdens het verslepen zouden moeten verdwijnen.

Algemeen

Doordat deze leerling de linkerhandregel nog niet kende en deze niet werd toegelicht op de kaartjes werd de leeractiviteit na enige tijd saai voor deze leerling: "Ik had wat 'Ontdekken' gedaan en toen werd het saai en toen ging ik naar 'Voorspellen', maar dat werd toen ook saai." Wel was deze leerling actief bezig met de simulatie en gaf ze aan het 'cool' te vinden dat de simulatie zelf is gemaakt:

Leerling: "Heeft ze het zelf gemaakt?"

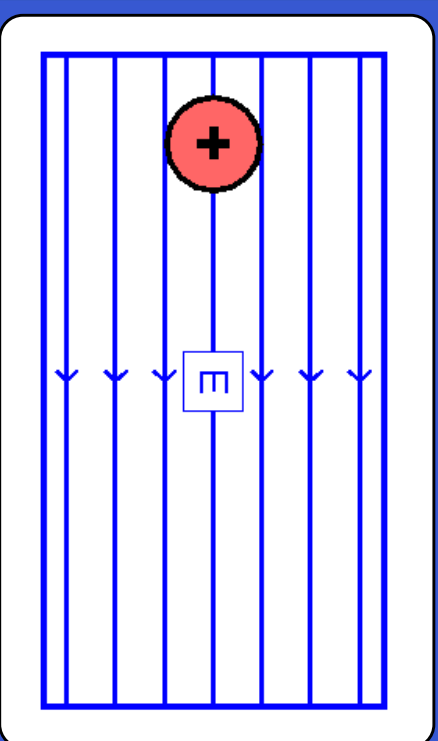
Docent: "Ja."

Leerling: "O, cool!"

Bijlage – Leeractiviteit

Het "kaartspel" hieronder kan geprint worden op (dik) A4-papier en vervolgens gesneden of geknipt. Hou bij het printen rekening met de zijde waarlangs wordt afgedrukt ('omslaan langs lange zijde'), zodat de voor- en achterkanten juist op de kaartjes komen te staan.

Ontdekken

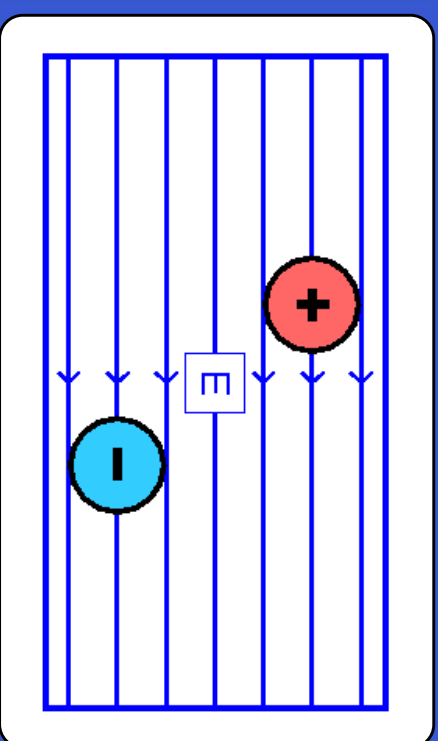


Oefenen 1

Welk **soort beweging** voert het deeltje uit?

Hoe zie je dit aan het **spoor**?

Ontdekken

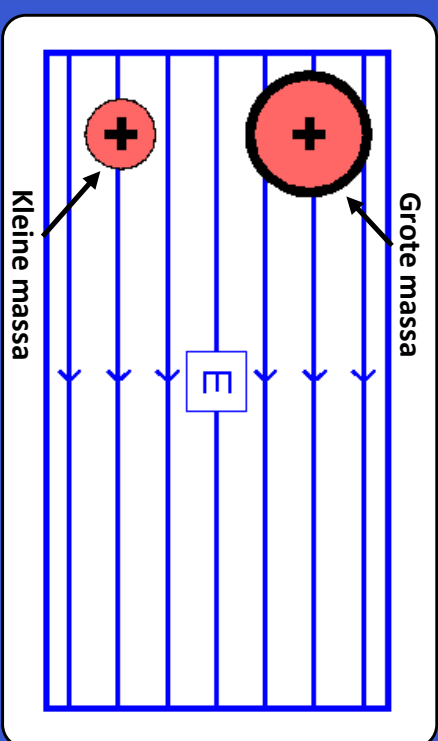


Oefenen 2

In welke **richting** werkt de **kracht** op beide geladen deeltjes?

En in welke **richting** gaan ze **bewegen**?

Ontdekken

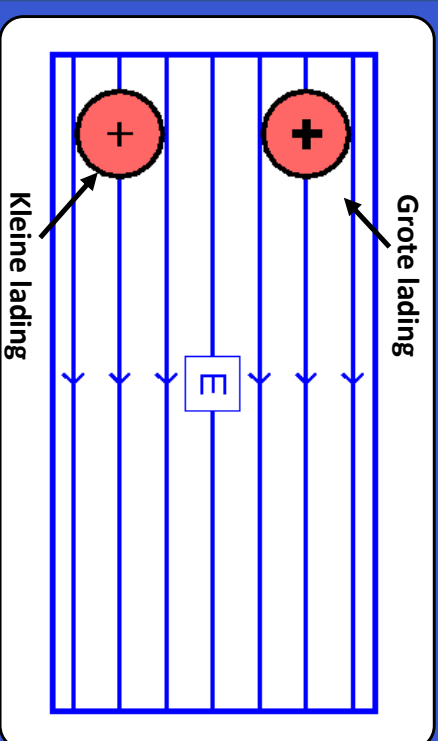


Oefenen 3

Op welk deeltje werkt de **grootste kracht**?

Welk deeltje ondergaat de **grootste versnelling**?

Ontdekken

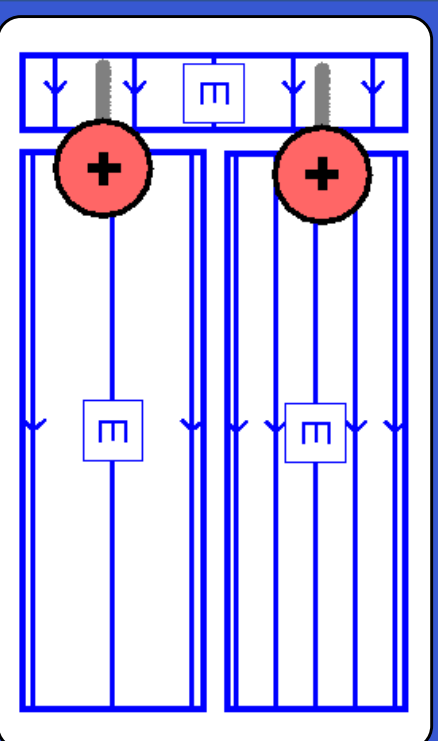


Oefenen 4

Op welk deeltje werkt de **grootste kracht**?

Welk deeltje ondergaat de **grootste versnelling**?

Ontdekken

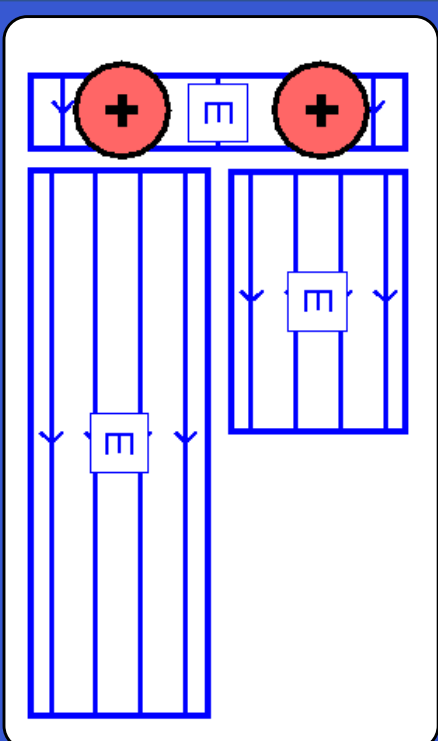


Oefenen 5

Op welk deeltje werkt de **grootste kracht**?

Welk deeltje ondergaat de **grootste versnelling**?

Ontdekken



Oefenen 6

Welk deeltje bereikt de **hoogste eindsnelheid**?

Omdat beide deeltjes **dezelfde lading** hebben, werkt op beide deeltjes een **gelijke kracht**.

Het deeltje met de **kleinste massa** ondergaat de **grootste versnelling**.

Op beide deeltjes werkt **dezelfde kracht**.

Op het **onderste deeltje** werkt deze kracht langer. Dit deeltje kan dus **langer versnellen**.

Het onderste deeltje bereikt dus de **hoogste eindsnelheid**.

De kracht op een **positief** geladen deeltje werkt in de richting van het elektrisch veld.

De kracht op een **negatief** geladen deeltje werkt tegen de richting van het elektrisch veld in.

Op het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** de **grootste versnelling**.

De **kracht** hangt niet af van de snelheid en is dus **constant**.

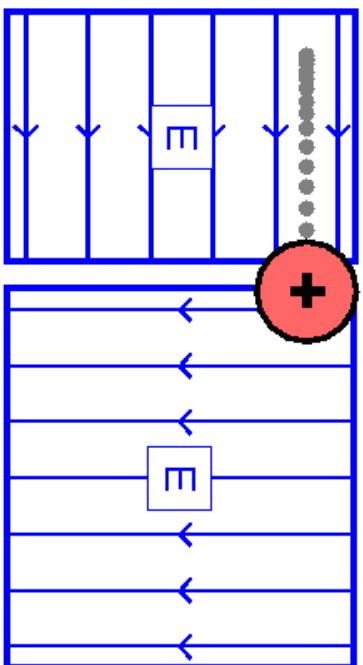
Het deeltje voert daarom een **eenparig versnelde rechtlijnige beweging** uit.

De afstand tussen de punten van het spoor wordt steeds **groter**.

Op het deeltje met de **grootste lading** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje met de **grootste lading** de **grootste versnelling**.

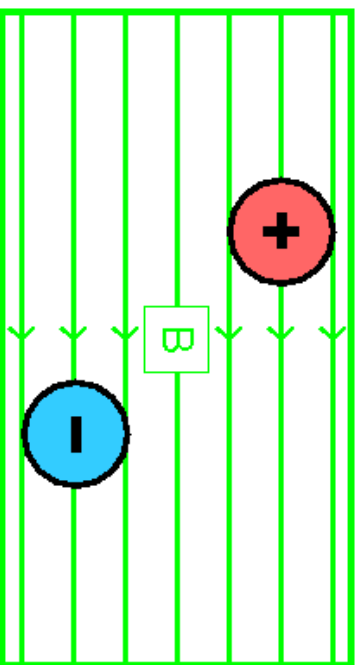
Ontdekken



In welke richting werkt de **kracht**?
En even later?
Welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 7

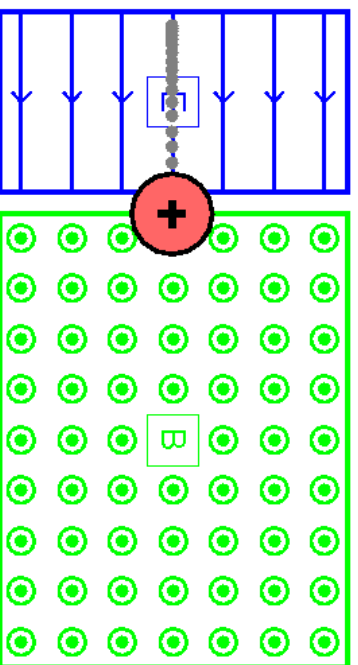
Ontdekken



Wat is de grootte en richting van de **kracht** op beide deeltjes?
En welk **traject** volgen de deeltjes?

Oefenen 8

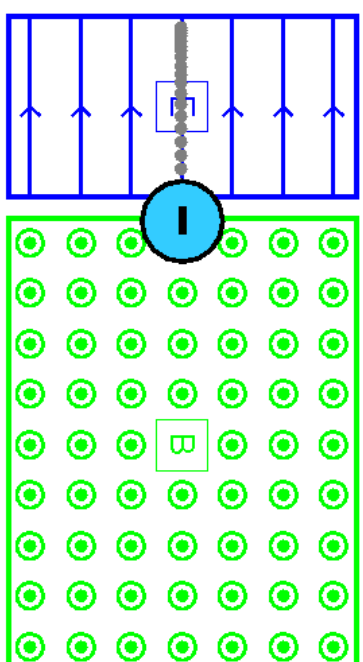
Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 9

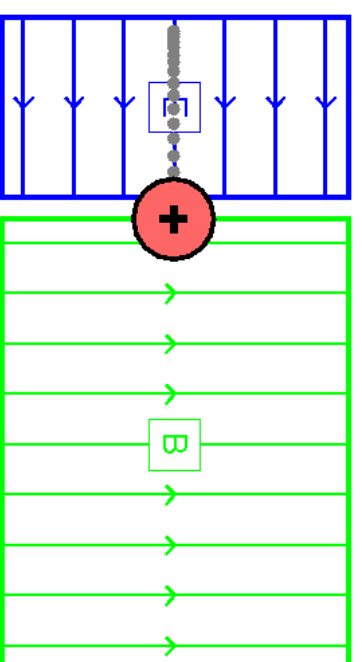
Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 9

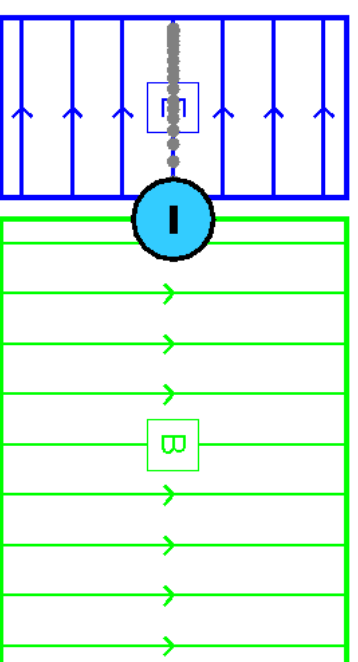
Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 10

Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 10

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **negatief** geladen deeltje is de stroomrichting **tegengesteld** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging** en beweegt daarbij van je af.

De deeltjes **bewegen niet** in het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op de deeltjes.

De deeltjes blijven hierdoor **stilstaan**.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging** en beweegt daarbij naar je toe.

De kracht werkt **in de richting van het elektrisch veld**.

De kracht is onafhankelijk van de snelheid en de bewegingsrichting. De kracht **verandert dus niet**.

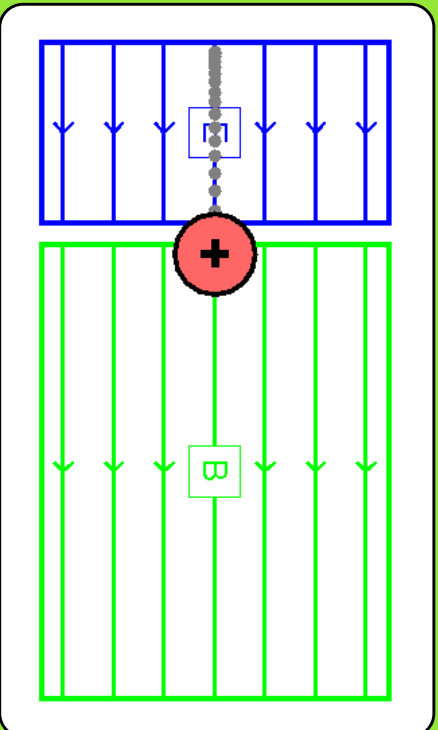
Het traject van het deeltje is een **kromlijnige beweging**, zoals bij een horizontale worp.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **negatief** geladen deeltje is de stroomrichting **tegengesteld** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

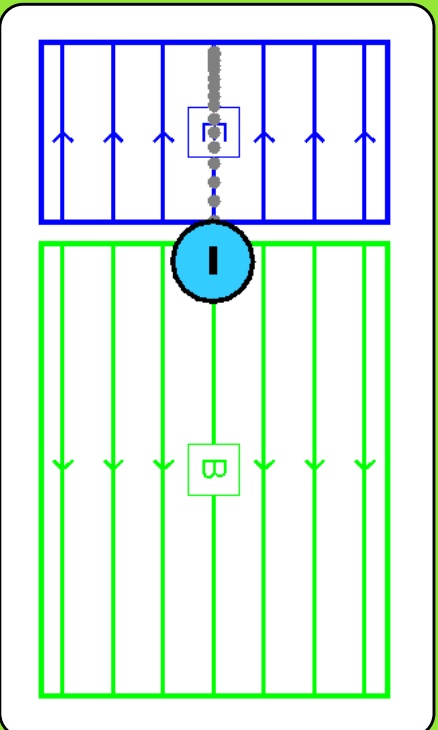
Ontdekkeren



Wat is de grootte en richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 11

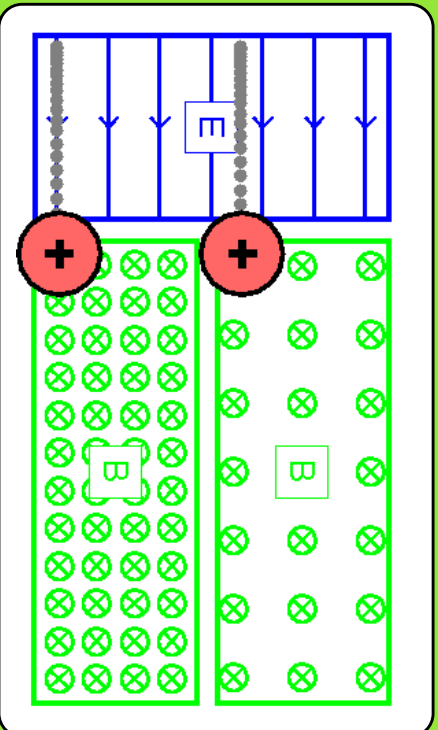
Ontdekkeren



Wat is de grootte en richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 11

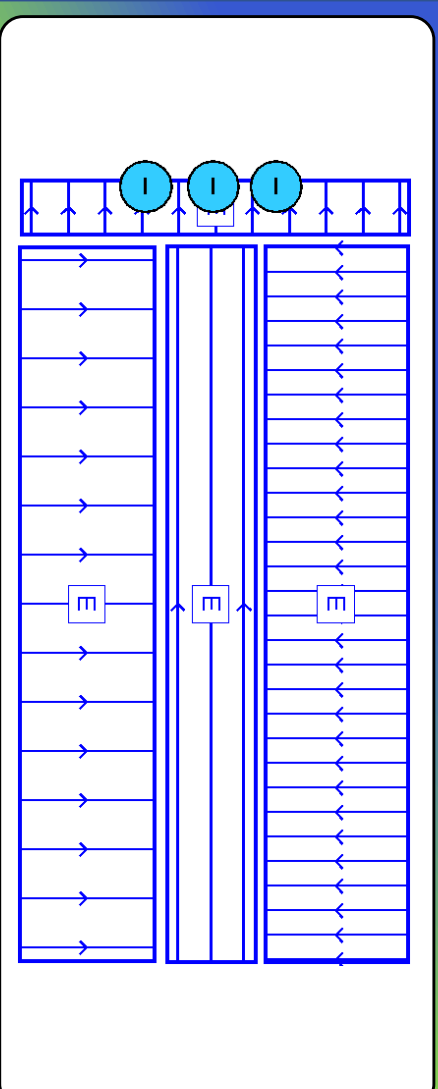
Ontdekkeren



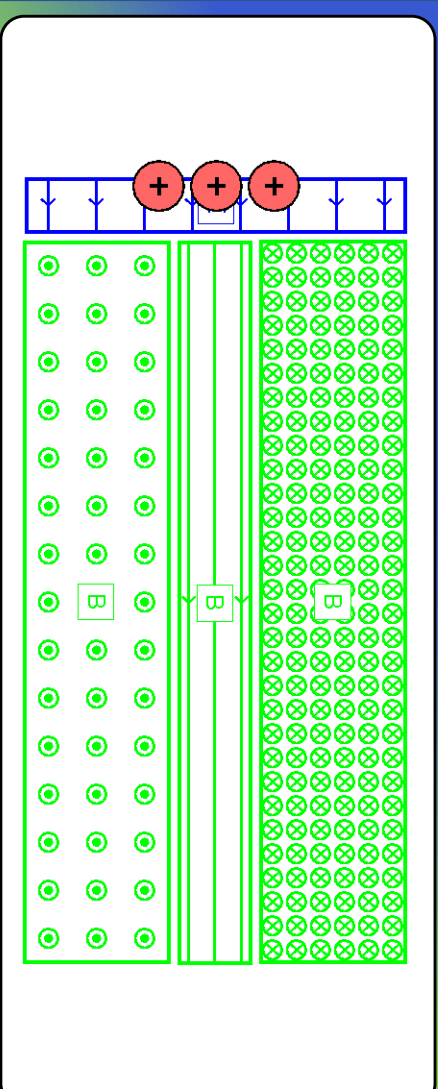
Op welk deeltje werkt een grotere **kracht**?
Hoe beïnvloedt dit het **traject**?

Oefenen 12

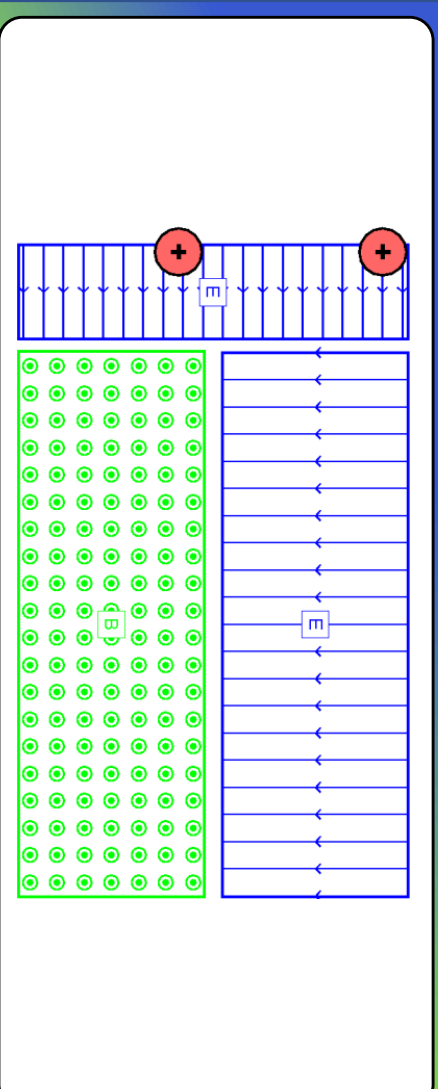
Voorstellen



Voorstellen



Voorstellen



Het onderste deeltje beweegt door een **sterker magnetisch veld**. De **kracht** op dit deeltje is dus **groter**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa en snelheid hebben, is de **straal** van de cirkelbeweging van het onderste deeltje **kleiner**.

De bewegingsrichting is **evenwijdig** aan de richting van het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op het deeltje.

Het traject van het deeltje is een **eenparige beweging**.

De bewegingsrichting is **evenwijdig** aan de richting van het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op het deeltje.

Het traject van het deeltje is een **eenparige beweging**.

Beide deeltjes ondergaan eerst een **eenparig versnelde rechtlijnige beweging**.

De elektrische kracht op het bovenste deeltje werkt vervolgens in verticale richting. Het deeltje maakt hierdoor een **kromlijnige beweging** zoals bij een horizontale worp.

De magnetische kracht op het onderste deeltje staat loodrecht op de bewegingsrichting. Het deeltje maakt hierdoor een **eenparige cirkelbeweging**.

Het middelste deeltje maakt een **eenparige rechtlijnige beweging**.

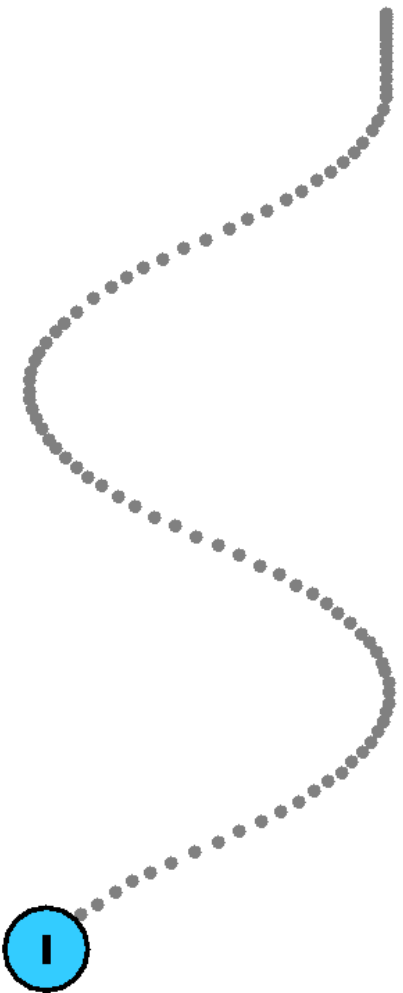
Het bovenste en onderste deeltjes maken een **cirkelbeweging**. De bewegingsrichting vind je met de **linkerhandregel**. Het bovenste magnetische veld is sterker. De straal van de cirkelbeweging van het bovenste deeltje is dus kleiner.

Het middelste deeltje maakt een **eenparig versnelde rechtlijnige beweging**.

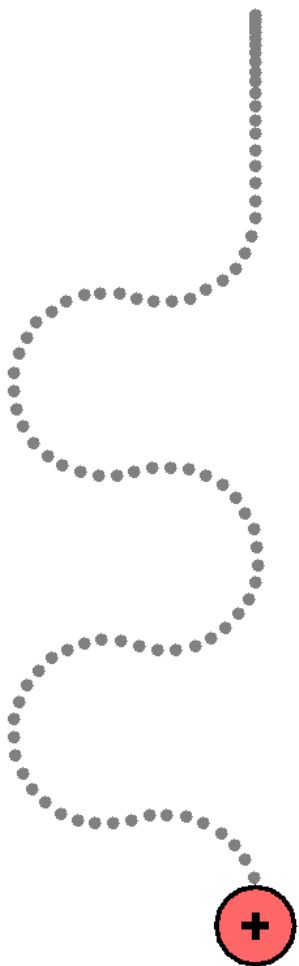
Het bovenste en onderste deeltjes maken een **kromlijnige beweging** zoals bij een horizontale worp. De deeltjes hebben dezelfde snelheid in horizontale richting. De kracht in verticale richting op het bovenste deeltje is groter. Dit deeltje wordt dus sterker afgebogen.



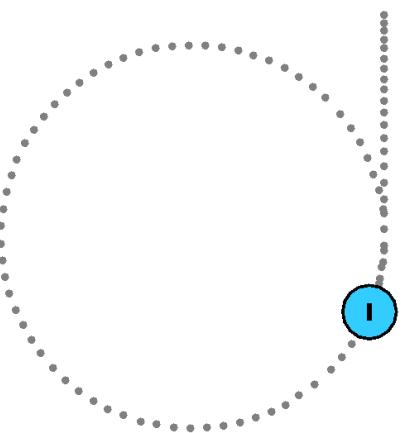
Maken



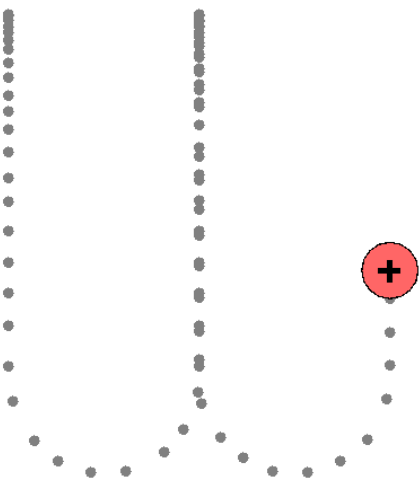
Maken



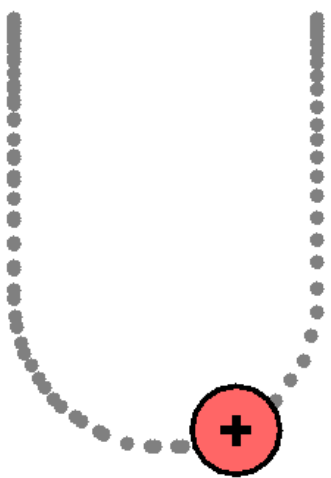
Maken



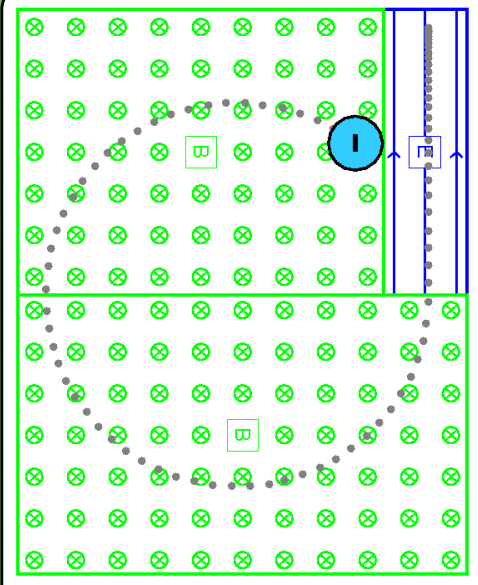
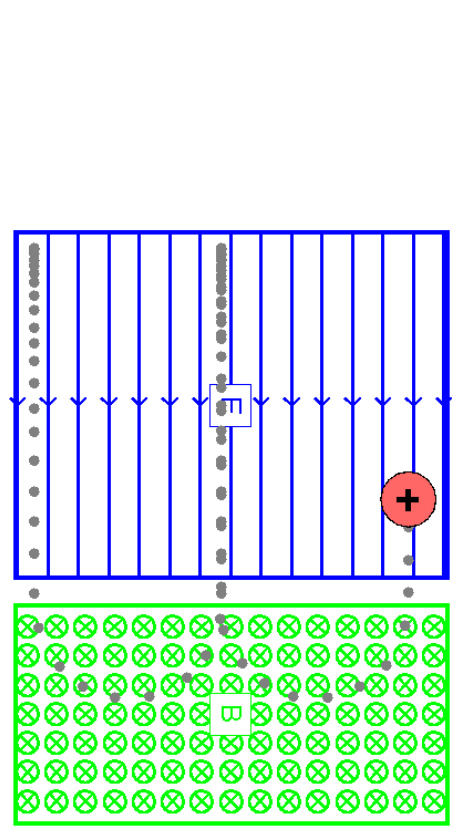
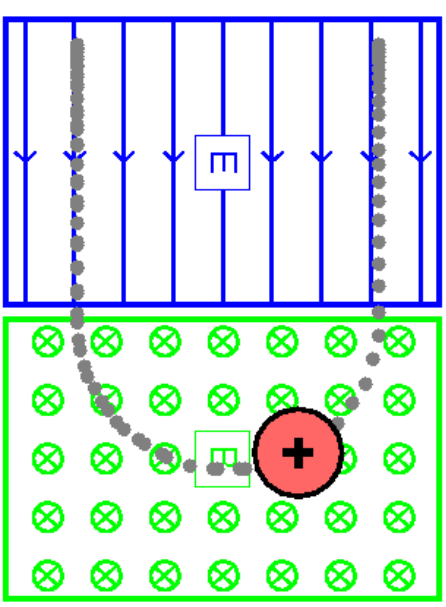
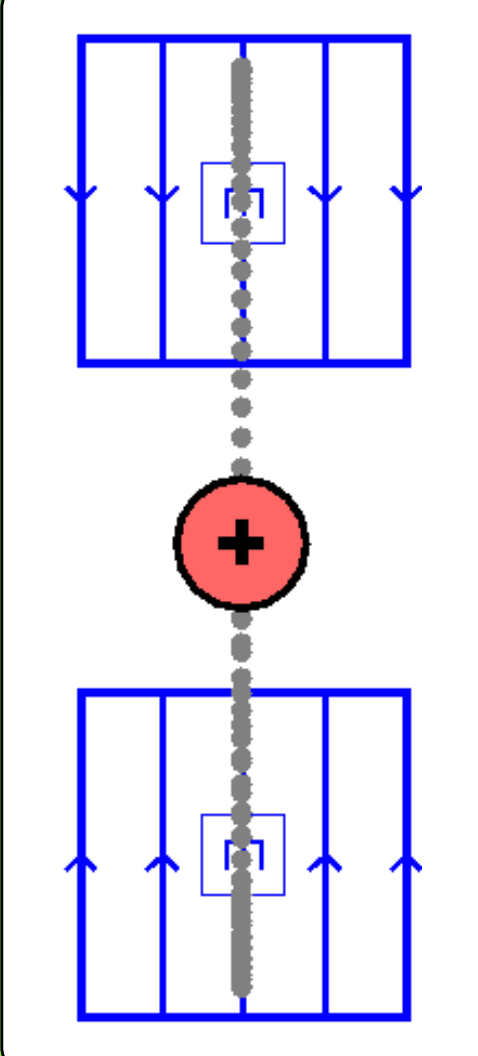
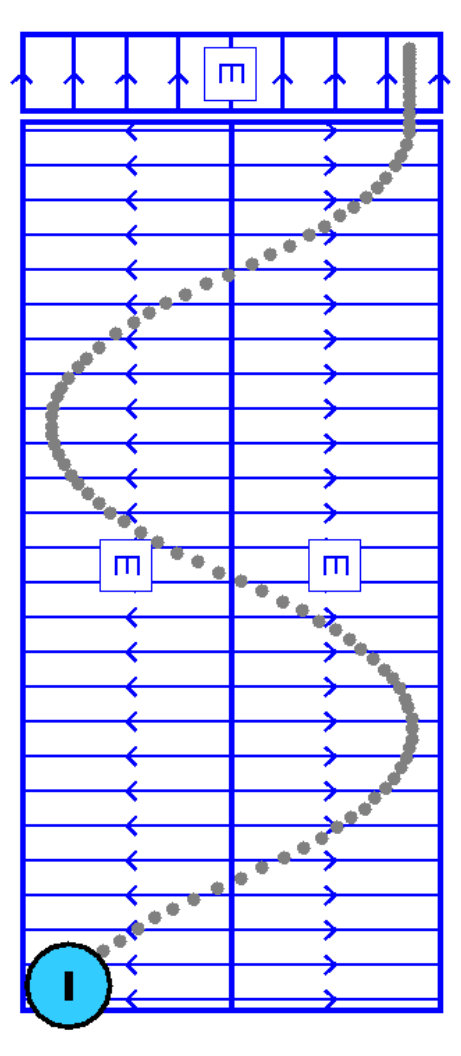
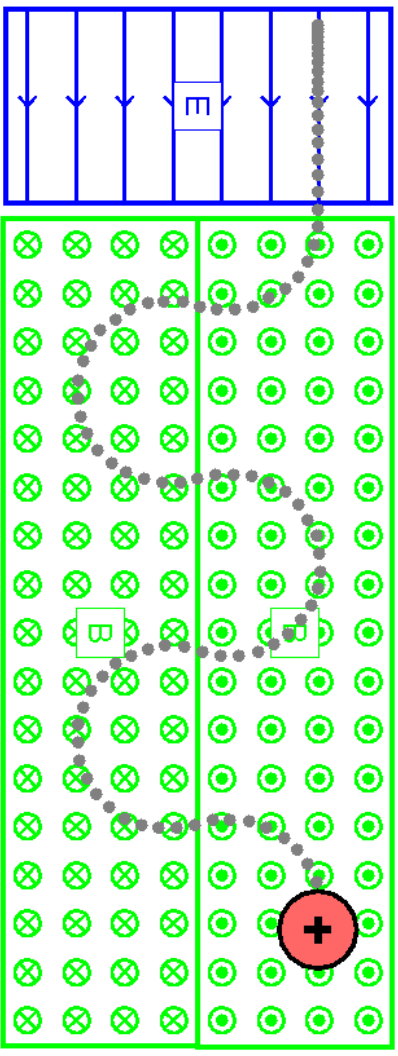
Maken



Maken

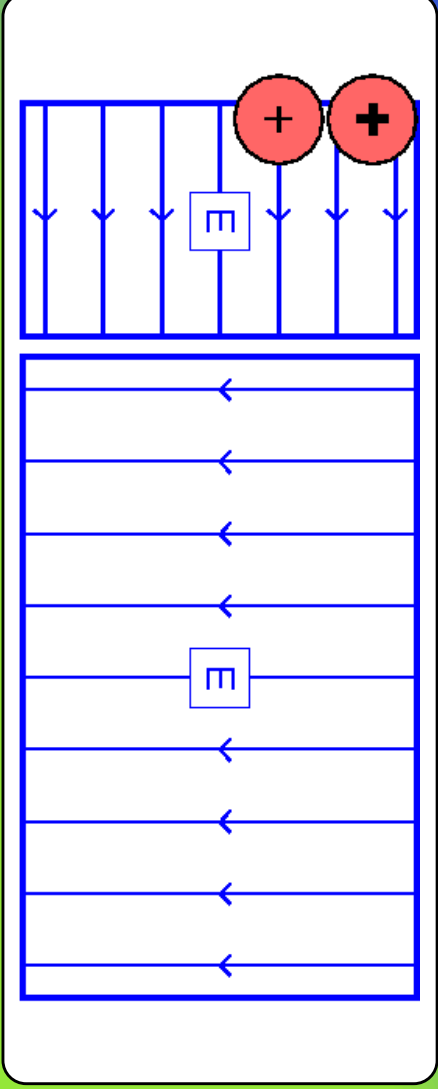


Maken



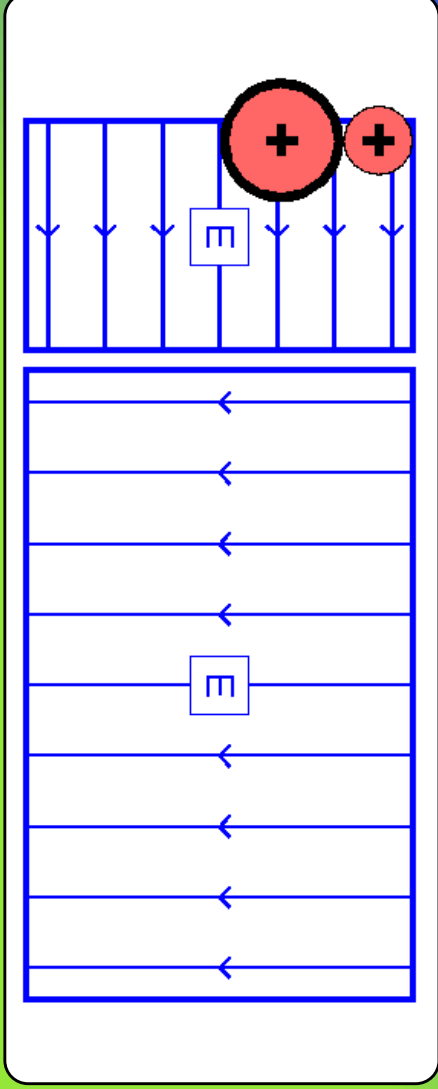
Verander de richting van het magnetisch veld om de lading heen en weer te laten bewegen.

Verwijder op tijd het elektrisch veld om de cirkelbeweging af te maken.



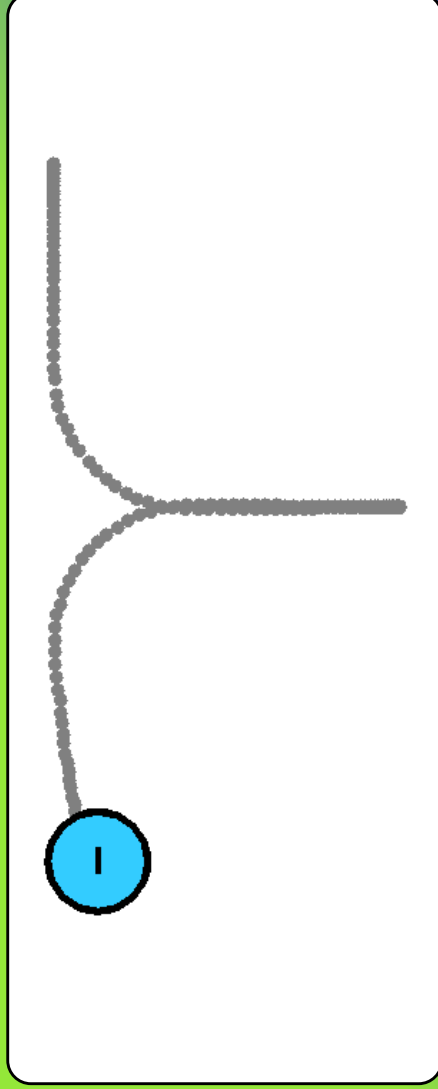
Voorstellen

Verdiepen

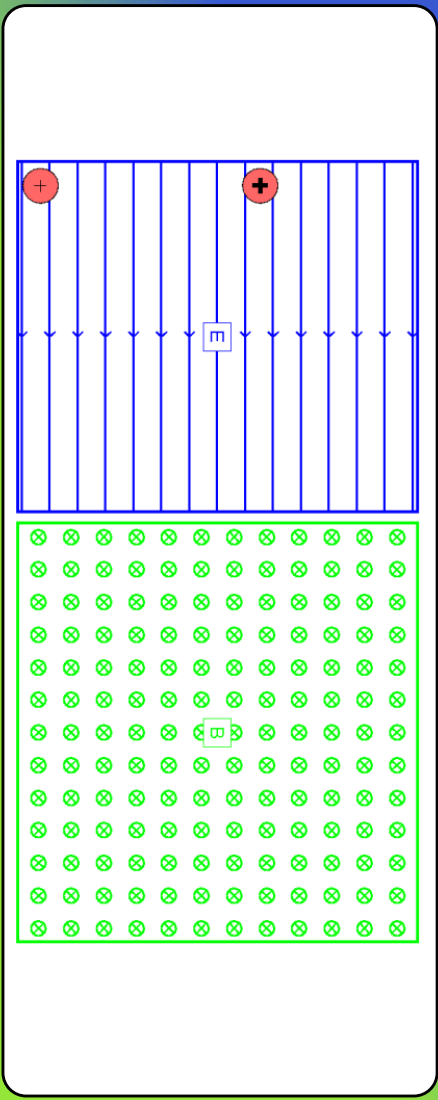


Voorstellen

Verdiepen

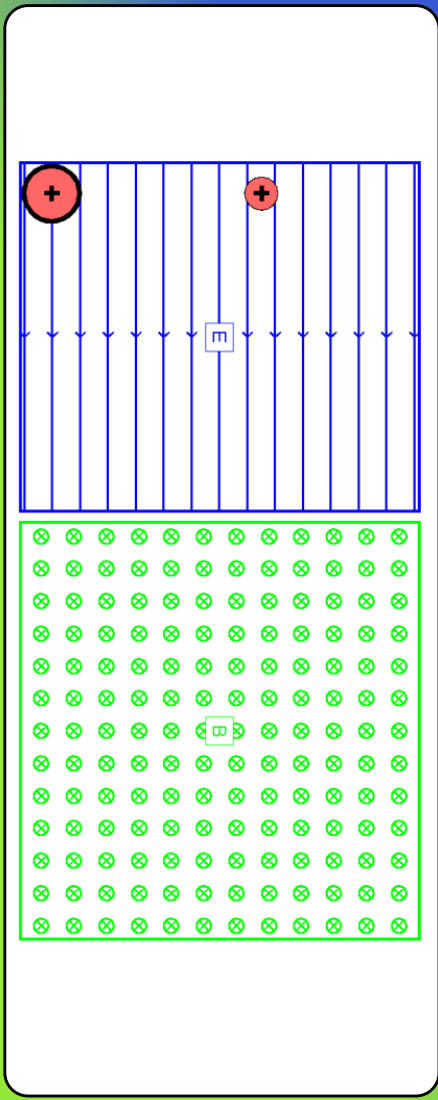


Maken



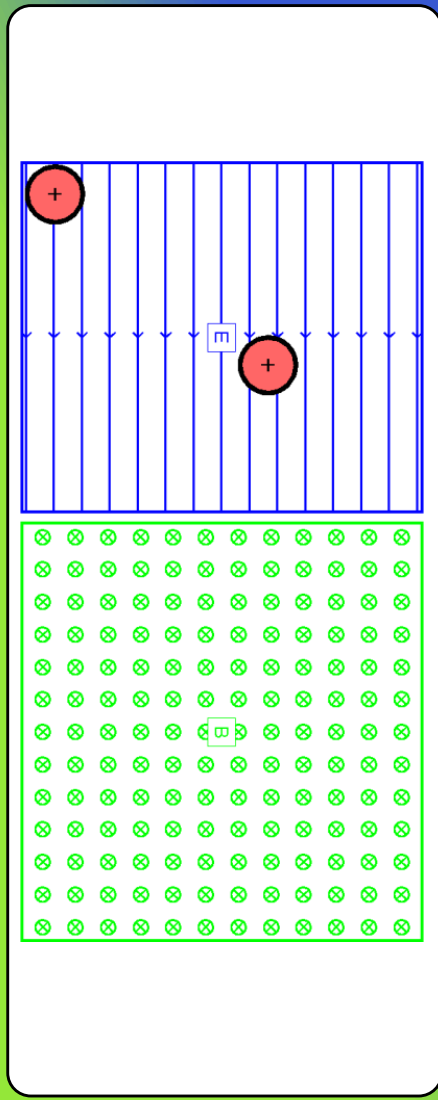
Voorstellen

Verdiepen



Voorstellen

Verdiepen



Voorstellen

Verdiepen

Beide deeltjes volgen **hetzelfde traject**. Het deeltje met de **kleine lading** doet hier echter **langer** over.

Kun je dit verklaren met behulp van formules?

Het deeltje met de **grootste lading** komt met een **hogere snelheid** het magnetisch veld binnen. Toch heeft de cirkelbeweging van het deeltje met de **grootste lading** de **kleinste straal**.

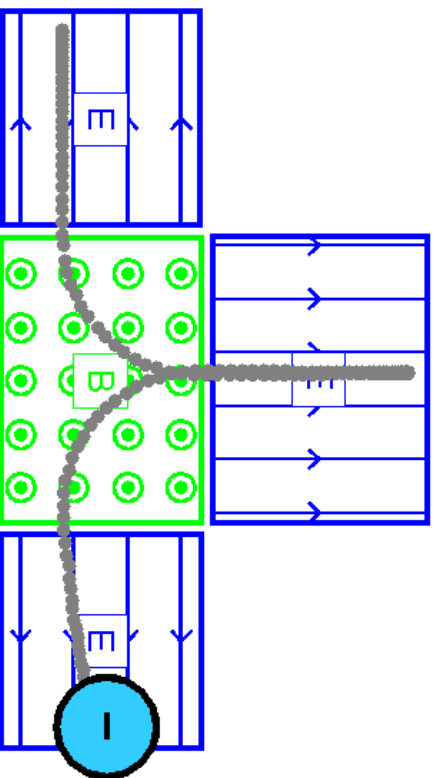
Kun je dit verklaren met behulp van formules?

Beide deeltjes volgen **hetzelfde traject**. Het deeltje met de **grote massa** doet hier echter **langer** over.

Kun je dit verklaren met behulp van formules?

Het deeltje met de **grootste massa** komt met een **lagere snelheid** het magnetisch veld binnen. Toch heeft de cirkelbeweging van het deeltje met de **grootste massa** de **grootste straal**.

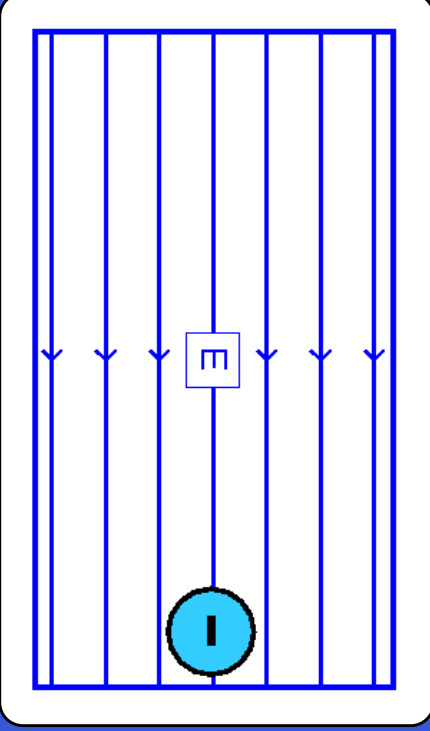
Kun je dit verklaren met behulp van formules?



Het **onderste deeltje** komt met een **hogere snelheid** het magnetisch veld binnen. De cirkelbeweging van dit **snelste deeltje** heeft de **grootste straal**.

Kun je dit verklaren met behulp van formules?

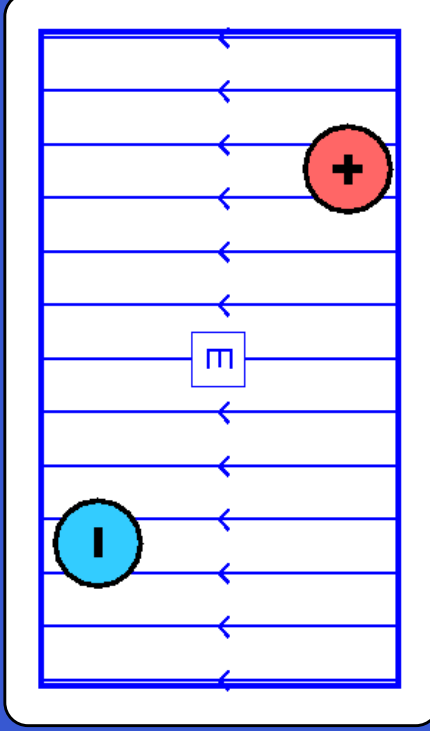
Ontdekken



Oefenen 1

Welk **soort beweging** voert het deeltje uit?
Hoe zie je dit aan het **spoor**?

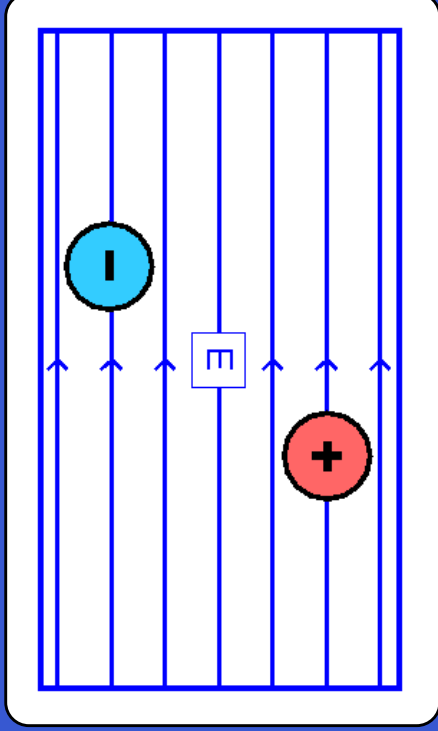
Ontdekken



Oefenen 1

Welk **soort beweging** voeren de deeltjes uit?
Hoe zie je dit aan het **spoor**?

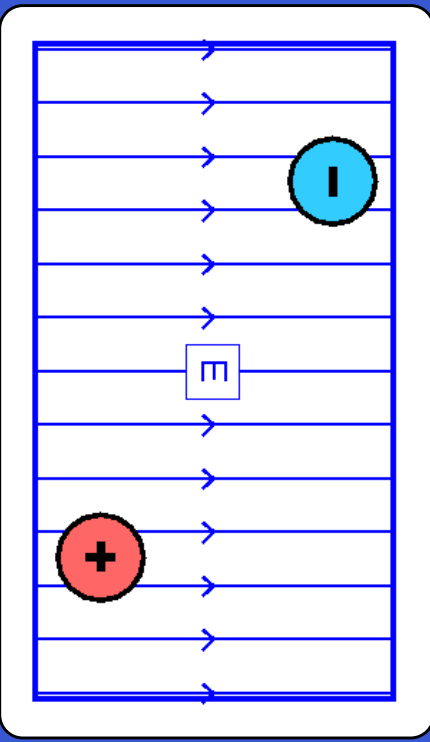
Ontdekken



Oefenen 2

In welke richting werkt de **kracht** op beide geladen deeltjes?
En in welke richting gaan ze **bewegen**?

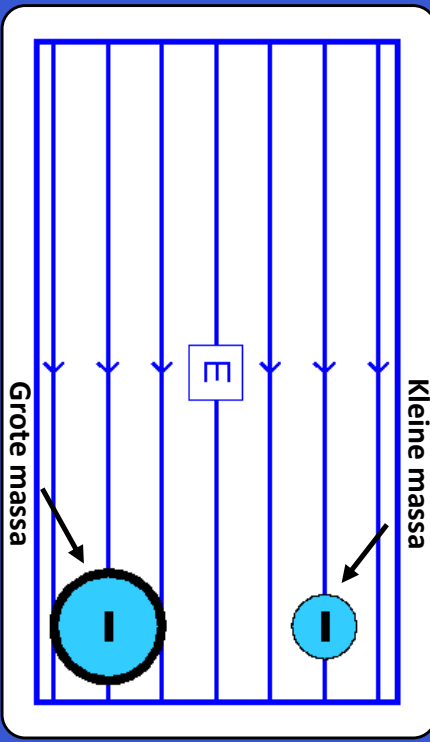
Ontdekken



Oefenen 2

In welke richting werkt de **kracht** op beide geladen deeltjes?
En in welke richting gaan ze **bewegen**?

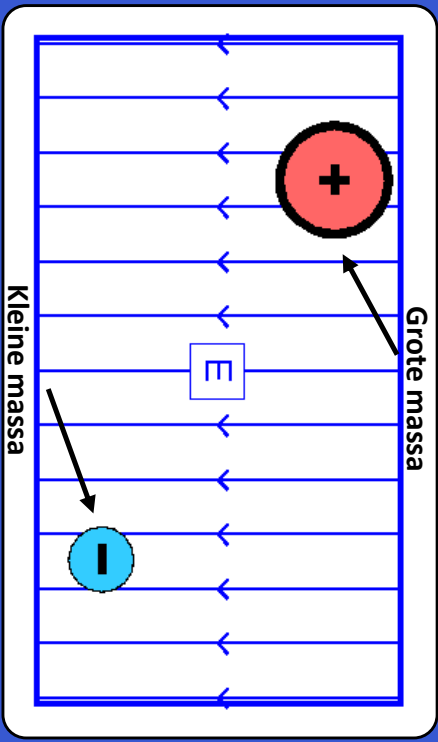
Ontdekken



Oefenen 3

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?
Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

Ontdekken



Oefenen 3

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?
Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

De kracht op een **positief** geladen deeltje werkt in de richting van het elektrisch veld.

De kracht op een **negatief** geladen deeltje werkt tegen de richting van het elektrisch veld in.

Omdat beide deeltjes **dezelfde** (tegengestelde) **lading** hebben, is de grootte van de **kracht** op beide deeltjes **gelijk**.

Het deeltje met de **kleinste massa** ondergaat de **grootste versnelling**.

De **kracht** hangt niet af van de snelheid en is dus **constant**.

De deeltjes voeren daarom een **eenparig versnelde rechtlijnige beweging** uit.

De afstand tussen de punten van het spoor wordt steeds **groter**.

Omdat beide deeltjes **dezelfde lading** hebben, werkt op beide deeltjes een **gelijke kracht**.

Het deeltje met de **kleinste massa** ondergaat de **grootste versnelling**.

De **kracht** hangt niet af van de snelheid en is dus **constant**.

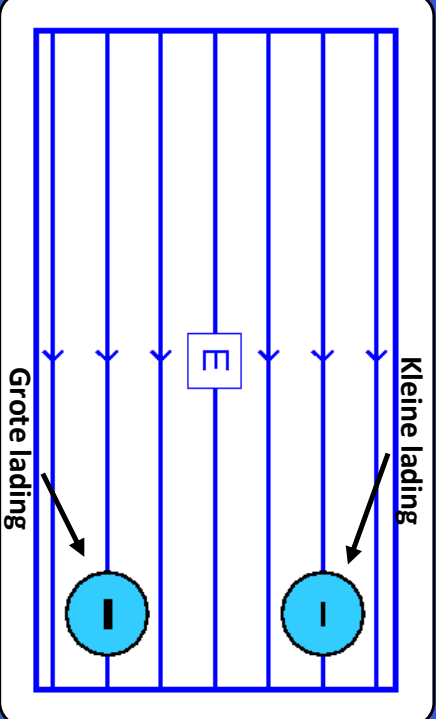
Het deeltje voert daarom een **eenparig versnelde rechtlijnige beweging** uit.

De afstand tussen de punten van het spoor wordt steeds **groter**.

De kracht op een **positief** geladen deeltje werkt in de richting van het elektrisch veld.

De kracht op een **negatief** geladen deeltje werkt tegen de richting van het elektrisch veld in.

Ontdekken

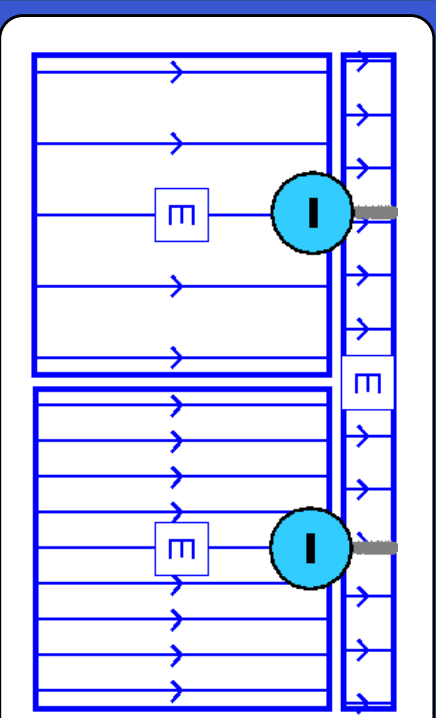


Oefenen 4

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?

Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

Ontdekken

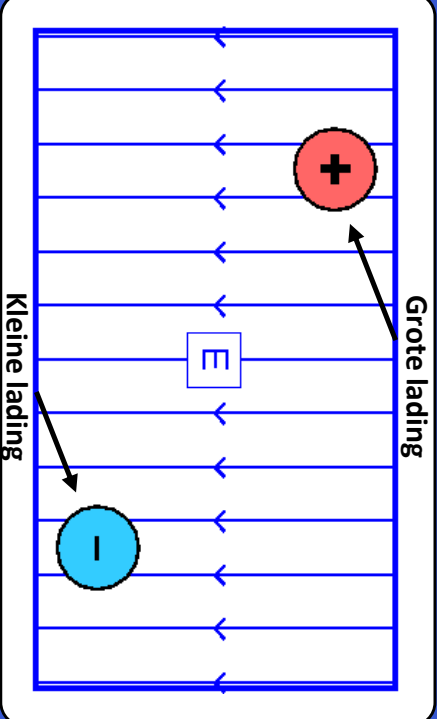


Oefenen 5

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?

Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

Ontdekken

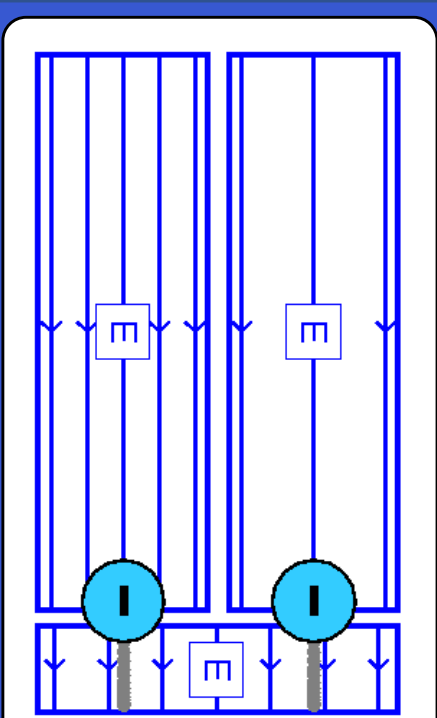


Oefenen 4

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?

Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

Ontdekken

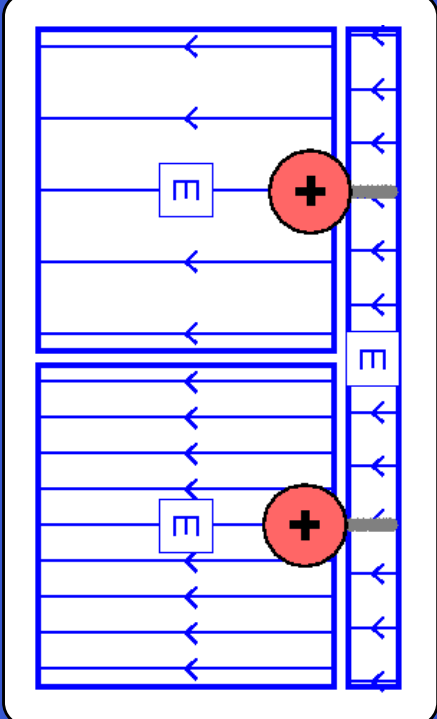


Oefenen 5

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?

Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

Ontdekken

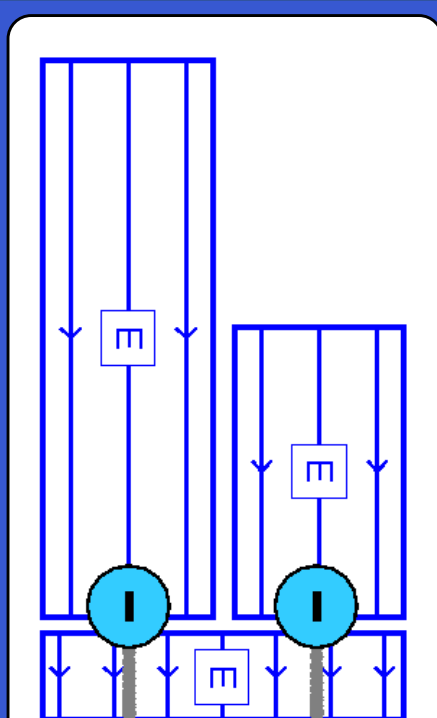


Oefenen 5

Op welk deeltje werkt de grootste **kracht**?

Welk deeltje ondergaat de grootste **versnelling**?

Ontdekken



Oefenen 6

Welk deeltje bereikt de hoogste **eindsnelheid**?

Op het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** de **grootste versnelling**.

Op beide deeltjes werkt **dezelfde kracht**.

Op het **onderste deeltje** werkt deze kracht langer. Dit deeltje kan dus **langer versnellen**.

Het onderste deeltje bereikt dus de **hoogste eindsnelheid**.

Op het deeltje met de **grootste lading** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje met de **grootste lading** de **grootste versnelling**.

Op het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** de **grootste versnelling**.

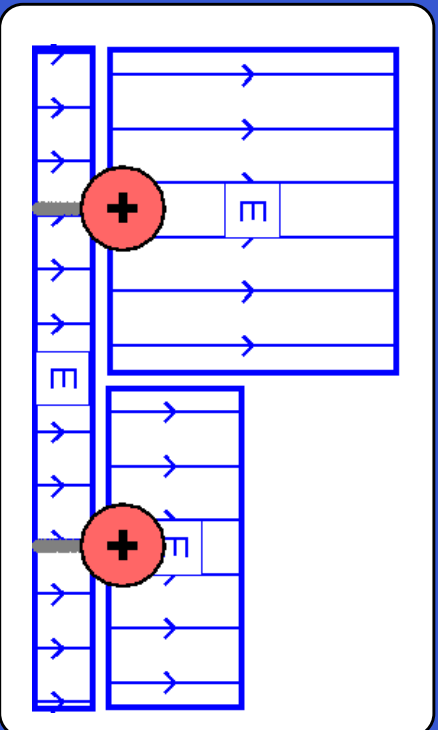
Op het deeltje met de **grootste lading** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje met de **grootste lading** de **grootste versnelling**.

Op het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** werkt de **grootste kracht**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa hebben, ondergaat het deeltje in het veld met de **grootste elektrische veldsterkte** de **grootste versnelling**.

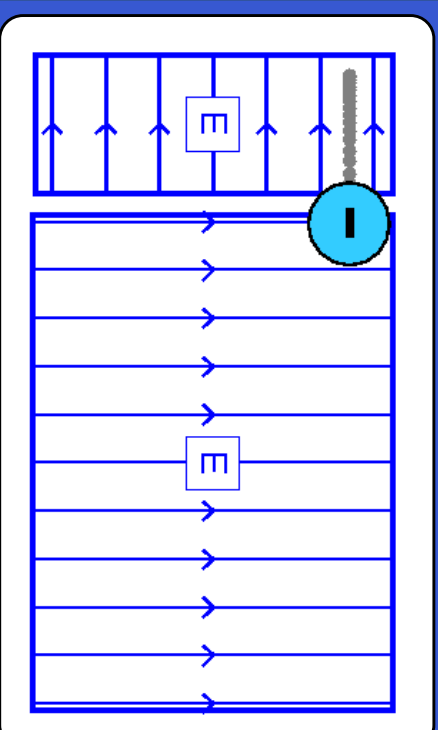
Ontdekken



Oefenen 6

Welk deeltje bereikt de hoogste **eindsnelheid**?

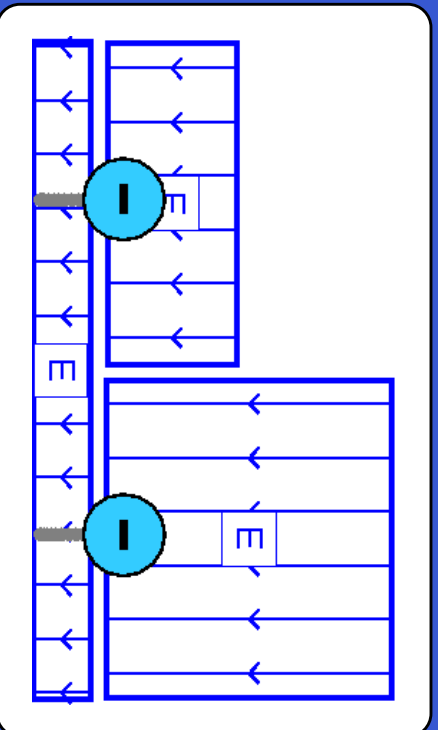
Ontdekken



Oefenen 7

In welke richting werkt de **kracht**? En even later? Welk **traject** volgt het deeltje?

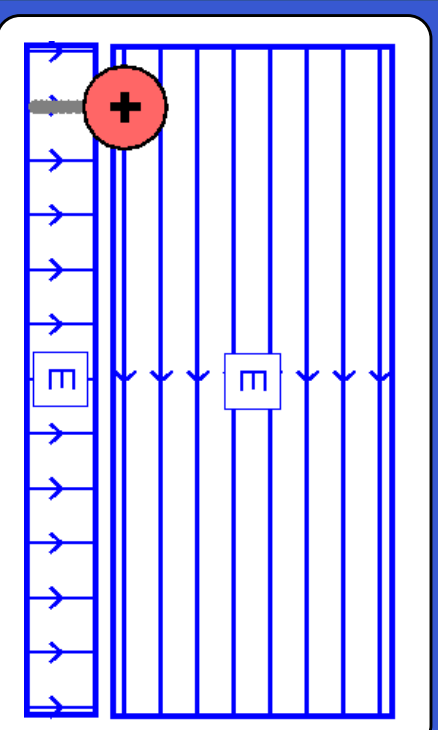
Ontdekken



Oefenen 6

Welk deeltje bereikt de hoogste **eindsnelheid**?

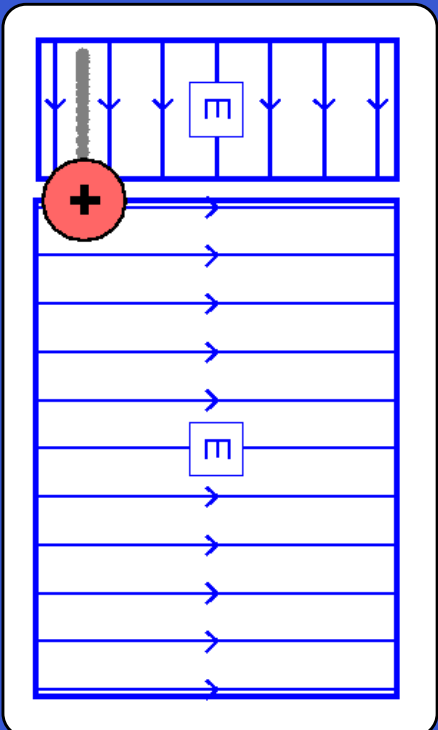
Ontdekken



Oefenen 7

In welke richting werkt de **kracht**? En even later? Welk **traject** volgt het deeltje?

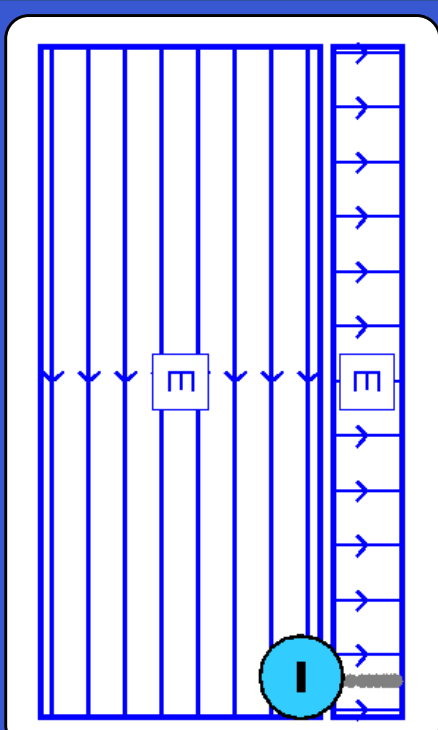
Ontdekken



Oefenen 7

In welke richting werkt de **kracht**? En even later? Welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken



Oefenen 7

In welke richting werkt de **kracht**? En even later? Welk **traject** volgt het deeltje?

De kracht werkt **in de richting van het elektrisch veld**.

De kracht is onafhankelijk van de snelheid en de bewegingsrichting. De kracht **verandert dus niet**.

Het traject van het deeltje is een **kromlijnige beweging**, zoals bij een horizontale worp.

De kracht werkt **in de richting van het elektrisch veld**.

De kracht is onafhankelijk van de snelheid en de bewegingsrichting. De kracht **verandert dus niet**.

Het traject van het deeltje is een **kromlijnige beweging**, zoals bij een horizontale worp.

Op beide deeltjes werkt **dezelfde kracht**.

Op het **rechter deeltje** werkt deze kracht langer. Dit deeltje kan dus **langer versnellen**.

Het rechter deeltje bereikt dus de **hoogste eindsnelheid**.

De kracht werkt **in de richting van het elektrisch veld**.

De kracht is onafhankelijk van de snelheid en de bewegingsrichting. De kracht **verandert dus niet**.

Het traject van het deeltje is een **kromlijnige beweging**, zoals bij een horizontale worp.

Op beide deeltjes werkt **dezelfde kracht**.

Op het **linker deeltje** werkt deze kracht langer. Dit deeltje kan dus **langer versnellen**.

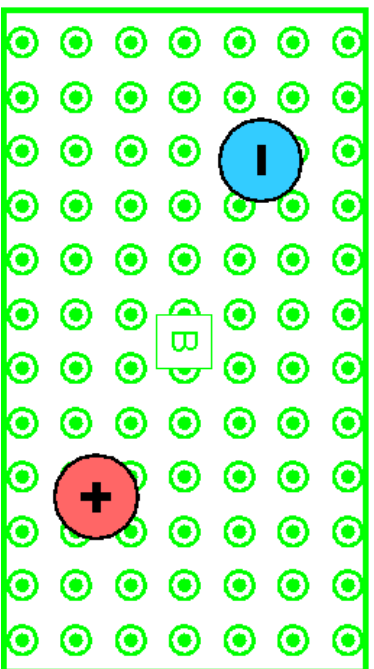
Het linker deeltje bereikt dus de **hoogste eindsnelheid**.

De kracht werkt **in de richting van het elektrisch veld**.

De kracht is onafhankelijk van de snelheid en de bewegingsrichting. De kracht **verandert dus niet**.

Het traject van het deeltje is een **kromlijnige beweging**, zoals bij een horizontale worp.

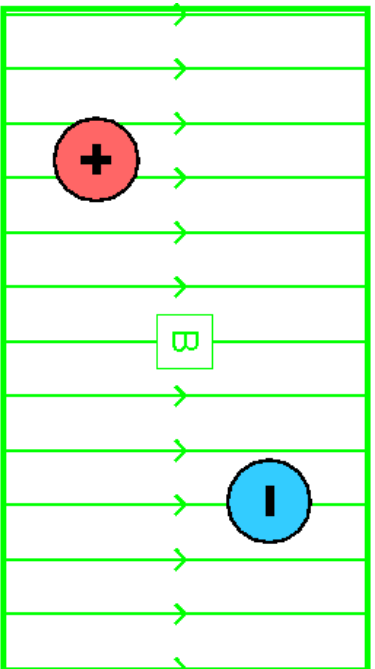
Ontdekken



Wat is de grootte en richting van de **kracht** op beide deeltjes?
En welk **traject** volgen de deeltjes?

Oefenen 8

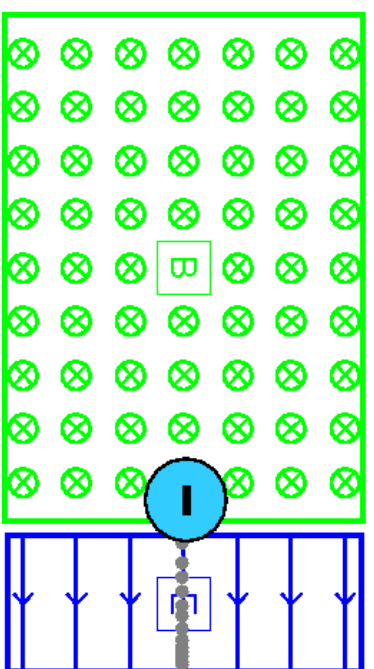
Ontdekken



Wat is de grootte en richting van de **kracht** op beide deeltjes?
En welk **traject** volgen de deeltjes?

Oefenen 8

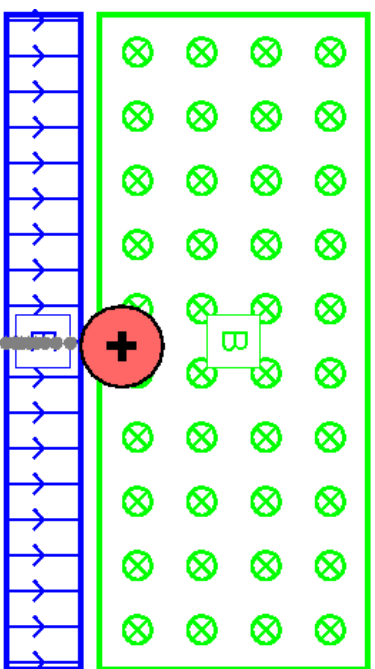
Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 9

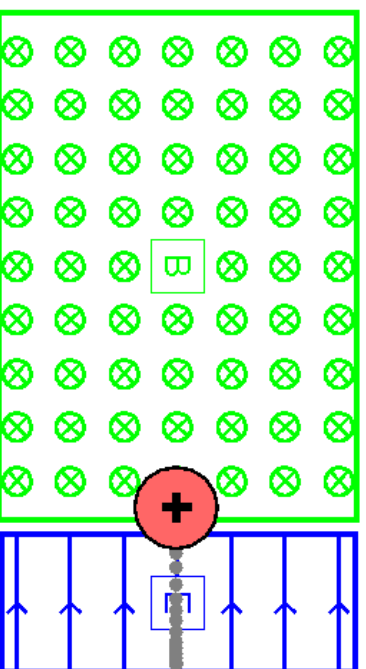
Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 9

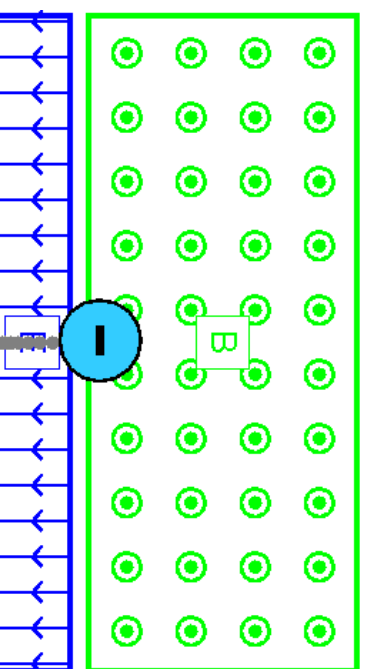
Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 9

Ontdekken



Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Oefenen 9

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **negatief** geladen deeltje is de stroomrichting **tegengesteld** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

De deeltjes **bewegen niet** in het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op de deeltjes.

De deeltjes blijven hierdoor **stilstaan**.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

De deeltjes **bewegen niet** in het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op de deeltjes.

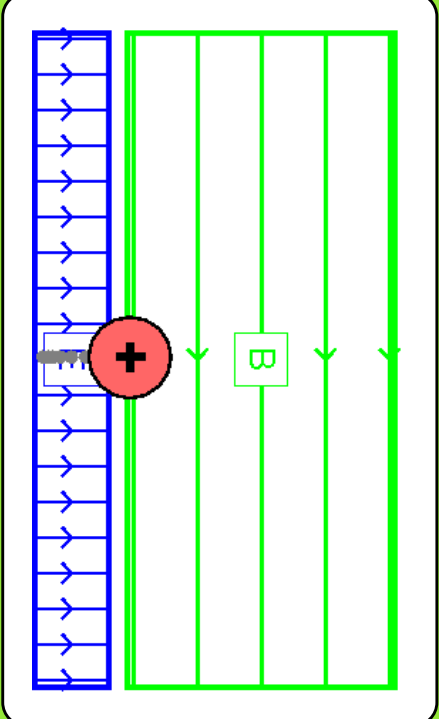
De deeltjes blijven hierdoor **stilstaan**.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **negatief** geladen deeltje is de stroomrichting **tegengesteld** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging**.

Ontdekken

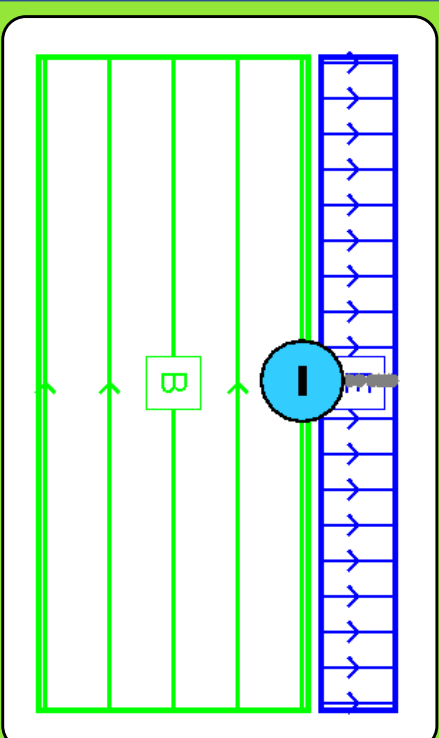


Oefenen 10

Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken

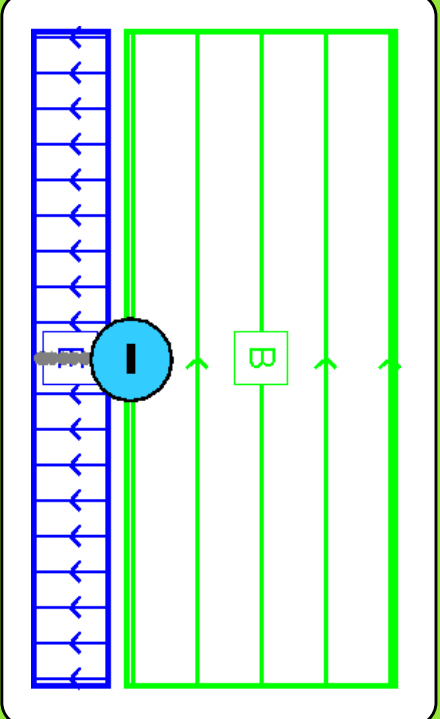


Oefenen 10

Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken

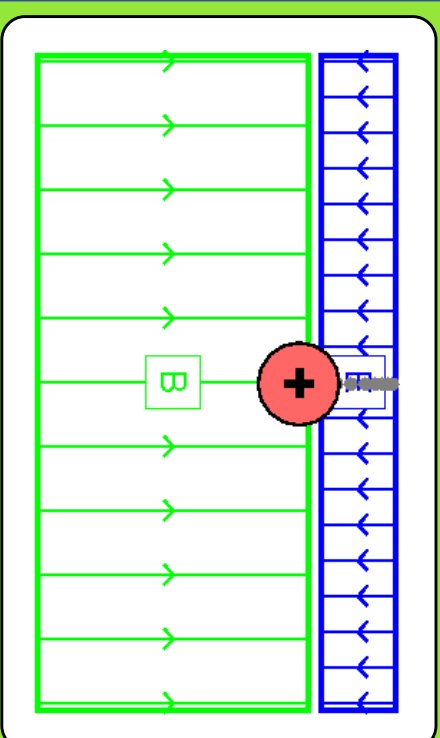


Oefenen 10

Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken

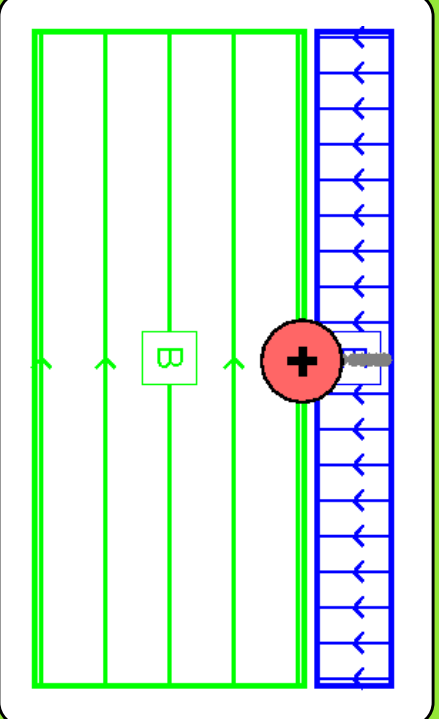


Oefenen 11

Wat is de grootte en richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken

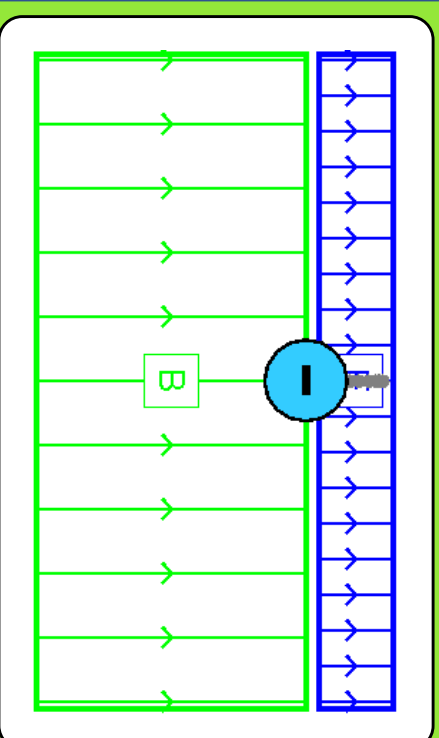


Oefenen 10

Wat is de richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken



Oefenen 11

Wat is de grootte en richting van de **kracht** op het deeltje?

En welk **traject** volgt het deeltje?

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging** en beweegt daarbij van je af.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **negatief** geladen deeltje is de stroomrichting **tegengesteld** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging** en beweegt daarbij van je af.

De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **positief** geladen deeltje is de stroomrichting **gelijk** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging** en beweegt daarbij van je af.

De bewegingsrichting is **evenwijdig** aan de richting van het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op het deeltje.

Het traject van het deeltje is een **eenparige beweging**.

De bewegingsrichting is **evenwijdig** aan de richting van het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op het deeltje.

Het traject van het deeltje is een **eenparige beweging**.

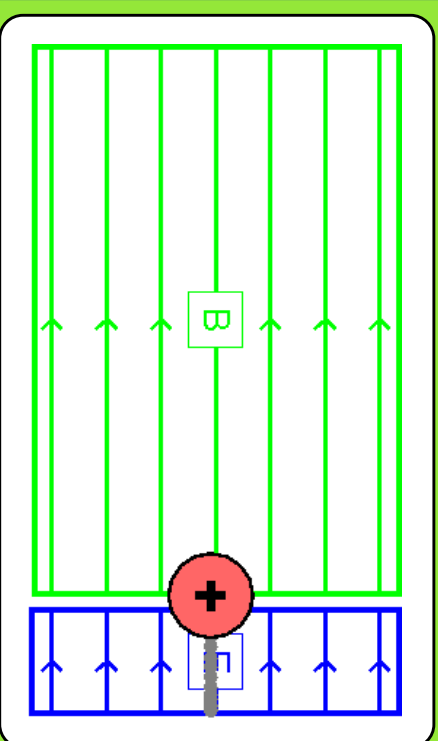
De richting van de **kracht** vind je met de **linkerhandregel**. De kracht staat **loodrecht** op de stroomrichting en de richting van het magnetisch veld.

Bij een **negatief** geladen deeltje is de stroomrichting **tegengesteld** aan de bewegingsrichting.

Het deeltje maakt een **eenparige cirkelbeweging** en beweegt daarbij naar je toe.

Ontdekken

Oefenen 11



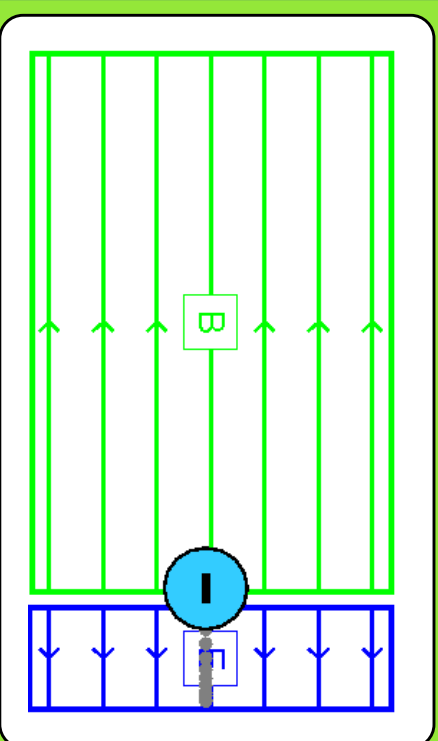
Wat is de grootte en richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Ontdekken

Bekijk de situatie en probeer te **voorspellen** wat er zal gebeuren door de vraag te beantwoorden.
Controleer dit vervolgens met de simulatie.
Probeer eerst zelf het verschijnsel te **verklaren**.
Bekijk daarna de verklaring op de achterkant.
Oefen eventueel verder met de extra oefen-kaartjes die rechtsboven zijn aangegeven.

Ontdekken

Oefenen 11



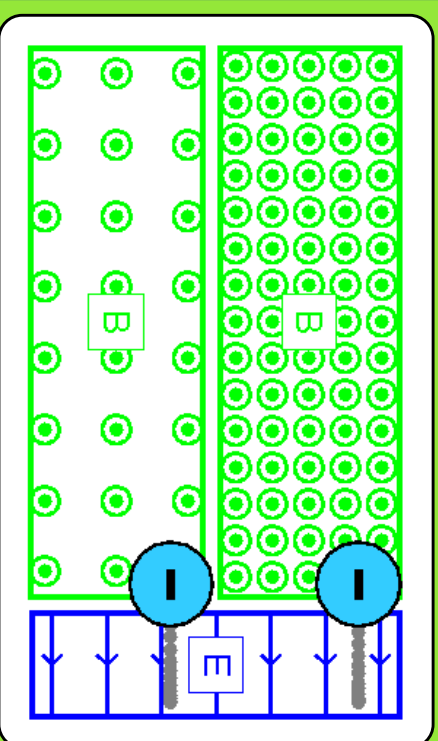
Wat is de grootte en richting van de **kracht** op het deeltje?
En welk **traject** volgt het deeltje?

Voorspellen

Bekijk de situatie en probeer te **voorspellen** wat er zal gebeuren. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de grootte en richting van de kracht, de snelheid of het traject.
Controleer dit vervolgens met de simulatie.
Probeer eerst zelf het verschijnsel te **verklaren**.
Bekijk daarna de verklaring op de achterkant.

Ontdekken

Oefenen 12



Op welk deeltje werkt een grotere **kracht**?
Hoe beïnvloedt dit het **traject**?

Maken

Probeer het **traject** na te **maken** met behulp van de simulatie.
Op de achterkant van het kaartje staat hoe je dit zou kunnen doen. Bekijk de achterkant niet meteen.

Het bovenste deeltje beweegt door een **sterker magnetisch veld**. De **kracht** op dit deeltje is dus **groter**.

Omdat beide deeltjes dezelfde massa en snelheid hebben, is de **straal** van de cirkelbeweging van het bovenste deeltje **kleiner**.

De bewegingsrichting is **evenwijdig** aan de richting van het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op het deeltje.

Het traject van het deeltje is een **eenparige beweging**.

De bewegingsrichting is **evenwijdig** aan de richting van het magnetisch veld. Er werkt dus **geen kracht** op het deeltje.

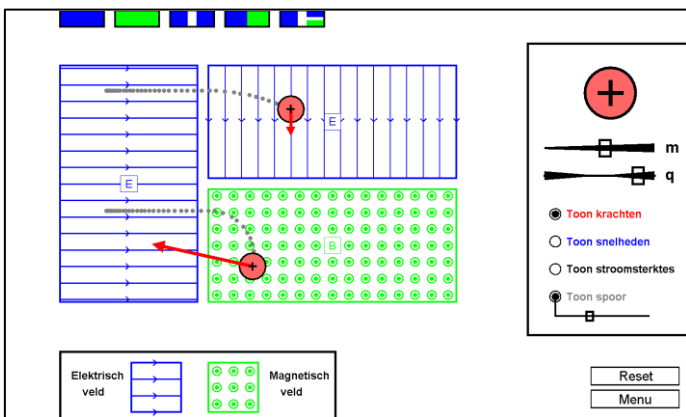
Het traject van het deeltje is een **eenparige beweging**.

Elektrische en Magnetische Velden

Simulatie & Leeractiviteit

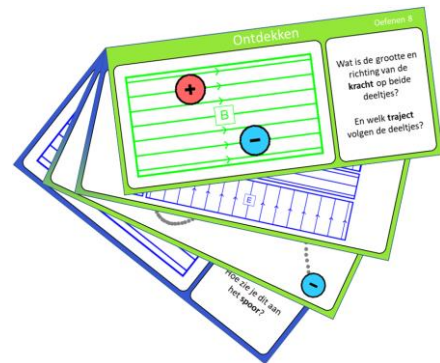
Docentenhandleiding

Thema:	Elektriciteit en magnetisme
Onderwerp:	Geladen deeltjes in homogene elektrische en magnetische velden
Niveau:	Vwo
Leerjaar:	5/6



Simulatie

In de interactieve omgeving *Lab* kunnen leerlingen experimenteren met (bewegende) geladen deeltjes in homogene elektrische en magnetische velden.



Leeractiviteit

Aan de hand van het kaartspel ontdekken leerlingen stap voor stap de belangrijkste concepten en leren ze deze toe te passen bij het voorspellen en beïnvloeden van de trajecten van geladen deeltjes.

Algemene informatie

Concepten:

De volgende inzichten over elektriciteit en magnetisme komen aan bod:

- De kracht op een geladen deeltje in een homogeen elektrisch veld ...
 - o ... werkt in de richting van het elektrisch veld;
 - o ... hangt af van de lading van het deeltje en de sterkte van het elektrisch veld;
 - o ... is onafhankelijk van de snelheid en bewegingsrichting van het deeltje.
- De kracht op een geladen deeltje in een homogeen magnetisch veld ...
 - o ... staat loodrecht op de bewegingsrichting en loodrecht op de richting van het magnetisch veld en de richting kan worden bepaald met de linkerhandregel;
 - o ... hangt af van de lading en snelheid van het deeltje en de sterkte van het magnetisch veld;
 - o ... is afhankelijk van de snelheid en bewegingsrichting van het deeltje: er werkt geen kracht als het deeltje stilstaat of beweegt in de richting van het magnetisch veld.
- Een elektrisch veld is in staat om een geladen deeltje zowel af te buigen als te versnellen.
- Een magnetisch veld is in staat om een geladen deeltje af te buigen, maar niet om een geladen deeltje te versnellen.

Dit wordt geïntegreerd met de volgende concepten uit de mechanica:

- Eenparige rechtlijnige bewegingen;
- Eenparig versnelde rechtlijnige bewegingen;
- Kromlijnige bewegingen (zoals bij een horizontale worp);
- Eenparige cirkelbewegingen.

Voorkennis:

Voorafgaand aan het gebruik van de simulatie en leeractiviteit dienen de bovenstaande concepten uit de mechanica uitgebreid behandeld te zijn.

Daarnaast is het de bedoeling dat de genoemde inzichten over elektriciteit en magnetisme in de les minstens een keer aan bod zijn gekomen, zodat de leerlingen enigszins bekend zijn met het onderwerp. De simulatie en leeractiviteit worden dan ingezet om het conceptuele begrip hierbij verder te ontwikkelen.

Leerdoelen:

Na het uitvoeren van de leeractiviteit aan de hand van de simulatie kan de leerling ...

... de inzichten over elektriciteit en magnetisme integreren met de concepten uit de mechanica ...

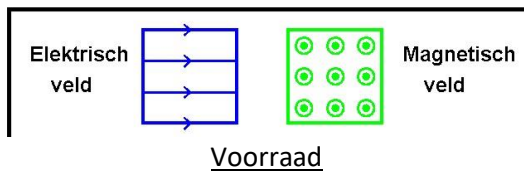
en

... dit toepassen om ...

- o ... voor een (bewegend) geladen deeltje in een homogeen elektrisch of magnetisch veld te *voorspellen* ...
 - ... wat de richting en (relatieve) grootte van de kracht is;
 - ... welk traject het deeltje aflegt.
- o ... het traject van een geladen deeltje te *beïnvloeden* met behulp van homogene elektrische en magnetische velden.

Gebruiksaanwijzing simulatie

Elektrische en magnetische velden



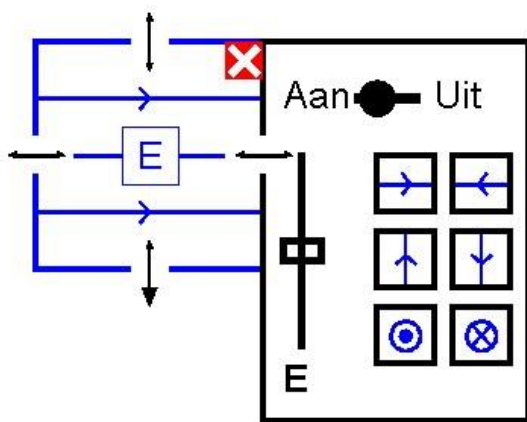
Veld maken: Sleep vanuit de voorraad een veld naar de gewenste positie.

Veld verplaatsen: Versleep het bestaande veld naar de gewenste positie.

Standaard configuratie van velden instellen:
Klik op een van de sjablonen.



Sjablonen



Opties

Opties openen: Beweeg de muis over het veld.

Veld verwijderen: Klik op het kruisje.

Veld vergroten/verkleinen: Versleep de pijltjes aan de rand van het veld.

Veldsterkte aanpassen: Versleep de schuifknop in het opties-menu.

Richting veld aanpassen: Klik op de gewenste richting in het opties-menu.

Veld aan-/uitzetten: Klik op de aan-/uitknop in het opties-menu.

Geladen deeltjes



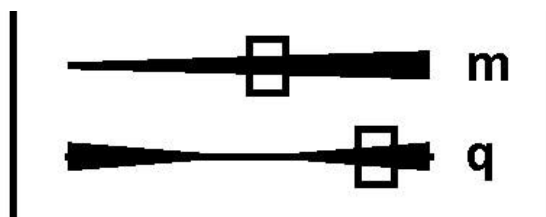
Geladen deeltje maken: Sleep vanuit de voorraad een geladen deeltje naar de gewenste positie.

Geladen deeltje verplaatsen: Versleep het bestaande deeltje naar de gewenste positie.

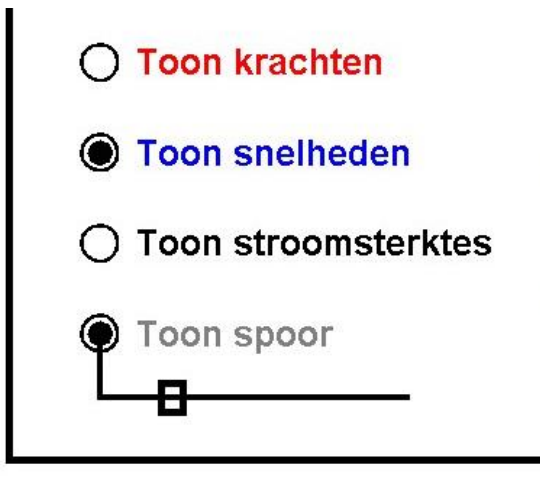
Geladen deeltje verwijderen: Plaats het geladen deeltje terug in de voorraad.

Massa van geladen deeltjes in voorraad aanpassen: Versleep de schuifknop voor de massa.

Lading van geladen deeltjes in voorraad aanpassen: Versleep de schuifknop voor de lading.



Schuifknoppen



Selectieknoppen

Krachten tonen: Selecteer 'toon krachten'.

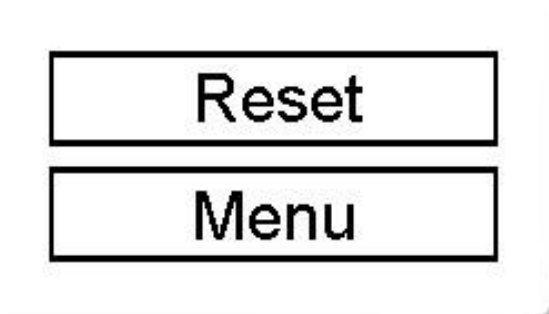
Snelheden tonen: Selecteer 'toon snelheden'.

Richting van stroomsterktes tonen: Selecteer 'toon stroomsterktes'.

Sporen tonen: Selecteer 'toon spoor'.

Lengte van spoor aanpassen: Versleep de schuifknop onder 'toon spoor'.

Knoppen



Knoppen

Terug naar standaardinstellingen: Klik op 'Reset'.

Terug naar hoofdmenu: Klik op 'Menu'.

Gebruiksaanwijzing leeractiviteit

Inhoud

3 zwarte instructie-kaarten

- 1 instructie-kaart 'Ontdekken'
- 1 instructie-kaart 'Voorspellen'
- 1 instructie-kaart 'Maken'

25 blauwe 'Ontdekken'-kaarten over elektrische velden

- 7 standaard kaarten
- 18 extra oefenkaarten

23 groene 'Ontdekken'-kaarten over magnetische velden

- 8 standaard kaarten
- 15 extra oefenkaarten
- 8 blauw-met-groene 'Voorspellen'-kaarten
- 3 standaard kaarten
- 5 extra verdieppingskaarten
- 7 blauw-met-groene 'Maken'-kaarten
- 7 standaard kaarten

Ontdekken

De blauwe 'Ontdekken'-kaartjes gaan over elektrische velden. De groene 'Ontdekken'-kaartjes gaan over magnetische velden.

Ieder 'Ontdekken'-kaartje behandelt een enkel concept.

Instructie

Ontdekken

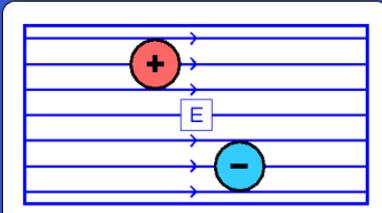
Bekijk de situatie en probeer te **voorspellen** wat er zal gebeuren door de vraag te beantwoorden.

Controleer dit vervolgens met de simulatie.

Probeer eerst zelf het verschijnsel te **verklaren**.
Bekijk daarna de verklaring op de achterkant.

Oefen eventueel verder met de extra oefen-kaartjes die rechtsboven zijn aangegeven.

Voorbeeld

<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"><h4 style="text-align: center; margin: 0;">Ontdekken</h4></div>	<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"><h4 style="text-align: center; margin: 0;">Oefenen 2</h4><p>In welke richting werkt de kracht op beide geladen deeltjes?</p><p>En in welke richting gaan ze bewegen?</p></div>	<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"><p>De kracht op een positief geladen deeltje werkt in de richting van het elektrisch veld.</p><p>De kracht op een negatief geladen deeltje werkt tegen de richting van het elektrisch veld in.</p></div>
---	---	---

Differentiatie

Wanneer leerlingen moeite hebben met het concept dat op een bepaald kaartje wordt behandeld, kunnen ze oefenen met de extra oefenkaartjes. Rechtsboven op het kaartje is aangegeven welke oefenkaartjes ze hiervoor kunnen gebruiken. Deze oefenkaartjes behandelen hetzelfde concept in een (net) andere situatie.

Voorspellen

De 'Voorspellen'-kaartjes gaan over zowel elektrische als magnetische velden.

Leerlingen gebruiken de opgedane inzichten uit de 'Ontdekken'-kaartjes om in complexere situaties te voorspellen wat er zal gebeuren.

Instructie

Voorspellen

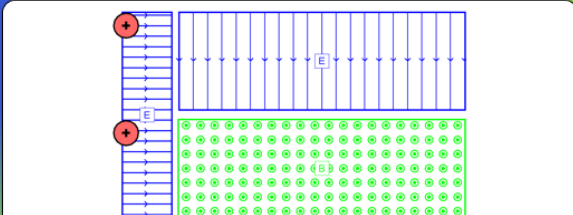
Bekijk de situatie en probeer te **voorspellen** wat er zal gebeuren. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de grootte en richting van de kracht, de snelheid of het traject.

Controleer dit vervolgens met de simulatie.

Probeer eerst zelf het verschijnsel te **verklaren**.
Bekijk daarna de verklaring op de achterkant.

Voorbeeld

Voorspellen



Beide deeltjes ondergaan eerst een **eenparig versnelde rechtlijnige beweging**.

De elektrische kracht op het bovenste deeltje werkt vervolgens in verticale richting. Het deeltje maakt hierdoor een **kromlijnige beweging** zoals bij een horizontale worp.

De magnetische kracht op het onderste deeltje staat loodrecht op de bewegingsrichting. Het deeltje maakt hierdoor een **cirkelbeweging**.

Differentiatie

Leerlingen die zich verder willen verdiepen in de stof kunnen gebruikmaken van de verdiepingskaartjes. Op deze kaartjes staat rechtsboven 'Verdiepen'. De situaties op deze kaartjes zijn complexer en om te kunnen voorspellen wat er gebeurt moeten leerlingen meerdere formules combineren.

Maken

De 'Maken'-kaartjes gaan over zowel elektrische als magnetische velden.

Leerlingen gebruiken de opgedane inzichten uit de 'Ontdekken'- en 'Voorspellen'-kaartjes om zelf het traject van een geladen deeltje te beïnvloeden.

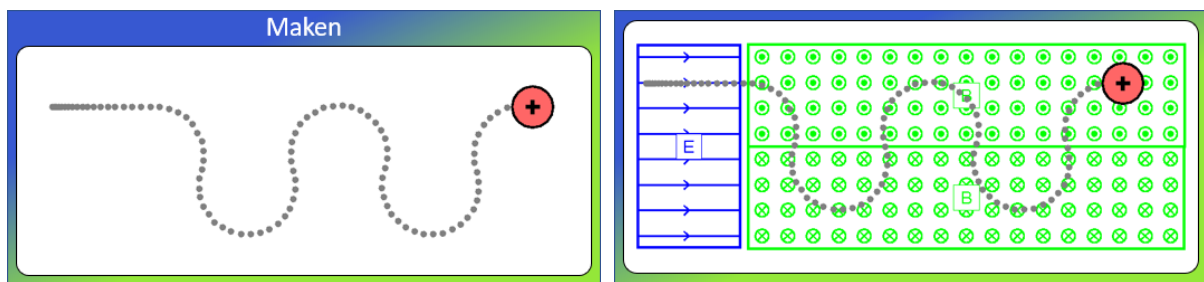
Instructie

Maken

Probeer het **traject** na te **maken** met behulp van de simulatie.

Op de achterkant van het kaartje staat hoe je dit zou kunnen doen. Bekijk de achterkant niet meteen.

Voorbeeld



Differentiatie

Leerlingen kunnen zelf kiezen in welke volgorde ze de kaartjes willen gebruiken en hoeven niet alle kaartjes te behandelen. Ze kunnen bij 'Maken' ook zelf een traject bedenken om te maken of kleine aanpassingen doen aan de kaartjes.

Aandachtspunten voor de docent

Vooraf

- Geef een korte instructie over het gebruik van de simulatie:
 - o Laat zien hoe je een elektrisch veld ...
 - ... maakt;
 - ... vergroot;
 - ... sterker maakt;
 - ... van richting verandert.
 - o Laat zien hoe je een geladen deeltje ...
 - ... maakt;
 - ... loslaat in een elektrisch veld.

Laat de leerlingen de andere functionaliteiten zelf ontdekken tijdens de leeractiviteit.

- Geef instructie over het gebruik van de kaartjes:
 - o Laat een 'Ontdekken'-kaartje zien en licht de volgende stappen toe:
 - Voorspellen;
 - Observeren;
 - Verklaren;
 - Eventueel extra oefenen.
 - o Laat een 'Voorspellen'-kaartje zien en licht de volgende stappen toe:
 - Voorspellen;
 - Observeren;
 - Verklaren.
- Laat de extra verdiepingskaartjes zien.
- o Laat een 'Maken'-kaartje zien en licht het doel toe.
 - o Geef aan dat leerlingen de kaartjes kunnen gebruiken als 'suggesties':
 - Ze mogen ook zelf experimenteren;
 - Ze hoeven de kaartjes niet op volgorde te gebruiken, maar het is aan te raden met 'Ontdekken' te beginnen.

Tijdens

Praktisch

- Controleer of leerlingen tijdens het gebruik van de simulatie de volgende functionaliteiten ontdekken en geef eventueel aanvullende instructie:
 - o Elektrische velden kunnen aan- en uitgezet worden, zodat eerst meerdere geladen deeltjes in een elektrisch/magnetisch veld geplaatst kunnen worden. Deze deeltjes lijnen automatisch uit wanneer ze boven/naast elkaar worden geplaatst;
 - o De massa en lading van de geladen deeltjes kan worden ingesteld door middel van de schuifknoppen;
 - o Met behulp van de selectieknoppen kunnen de krachten, snelheden, stroomsterktes of sporen worden weergegeven.
- Controleer of leerlingen de kaartjes op de juiste manier gebruiken:
 - o Stimuleer leerlingen om ...
 - ... zelf te voorspellen wat er zal gebeuren alvorens de simulatie te gebruiken;
 - ... zelf te verklaren wat er gebeurt alvorens op de achterkant van het kaartje te kijken.
 - o Wijs leerlingen eventueel op ...
 - ... de extra oefenkaartjes bij 'Ontdekken';
 - ... de extra verdiepingskaartjes bij 'Voorspellen'.

Leerproces

- Wijs leerlingen tijdens het gebruik van de simulatie eventueel op het volgende:
 - o De kleuren en symbolen geven visuele aanwijzingen:
 - Elektrische velden zijn blauw, magnetische velden groen;
 - Positieve lading is rood, negatieve lading lichtblauw;
 - De massa van een geladen deeltje wordt weergegeven door de grootte van het deeltje en de dikte van de rand;
 - De lading van een geladen deeltje wordt weergegeven door de dikte van de '+' of '-';
 - De kleuren van de krachten, snelheden, stroomsterktes en sporen komen overeen met de kleuren van de teksten 'Toon ...';
 - De richtingen van de elektrische/magnetische velden worden weergegeven met raketnotatie.
 - o Wanneer een deeltje loodrecht op het scherm beweegt zal het 'kapotgaan':
 - Het deeltje verdwijnt;
 - Er ontstaat een ster op het scherm;
 - De lading van het verdwenen deeltje wordt aangegeven met een kleur;
 - De bewegingsrichting van het verdwenen deeltje wordt aangegeven met een symbool in raketnotatie.
Dit verdwijnt na enkele seconden.
 - o De deeltjes oefenen in de simulatie onderling geen kracht op elkaar uit.
Ga hierover met leerlingen in gesprek wanneer ze dit ontdekken.
 - o Deeltjes kunnen in de simulatie nét meer energie krijgen, waardoor ze verder terugkomen in een elektrisch veld na omdraaien in een magnetisch veld.
Ga hierover met leerlingen in gesprek wanneer ze dit ontdekken.
- Stel eventueel de volgende verdiepende vragen:
 - o *Wat zou er gebeuren als ...*
 - ... de lading groter/kleiner/negatief/positief zou zijn?
 - ... de massa groter/kleiner zou zijn?
 - ... de veldsterkte groter/kleiner zou zijn?
 - ... de richting van het veld zou veranderen?
 - o *Hoe kan je ervoor zorgen dat ...*
 - ... de versnelling groter/kleiner wordt?
 - ... het deeltje vertraagt/versnelt?
 - ... het deeltje van richting verandert?
 - ... de kracht op het deeltje groter/kleiner wordt?
 - ... de straal van de cirkelbeweging groter/kleiner wordt?
 - ... het deeltje een cirkelbeweging maakt naar ...?
 - ... het deeltje niet wordt afgebogen door het magnetisch veld?

Achteraf

- Sluit de les (klassikaal) af door te vragen wat leerlingen geleerd hebben en de belangrijkste inzichten kort samen te vatten.

Bijlage – Simulatie

De simulatie kan worden verkregen bij Merel Wevers of Henk Pol.