

Ioniserende Stralen Practicum: Zes verschillende open experimenten getest in 6VWO en 5HAVO

Enja Blasse
Universiteit Utrecht
Begeleid door Koos Kortland

28 juli 2011

Samenvatting

In dit onderzoek zijn zes verschillende open experimenten van het Ioniserende Stralen Practicum getest door vijftien leerlingen en drie begeleidende docenten. Uit deze tests bleek dat de open experimenten door de leerlingen als uitdagender, leerzamer en moeilijker werden ervaren. Wel vonden zij open experimenten onduidelijker. Docenten zijn van mening dat leerlingen door de open experimenten op twee manieren leren: ten eerste leren zij over ioniserende straling door begrippen als halfwaardetijd en dracht in experimentele context waar te nemen. Dit gebeurt ook in de gesloten experimenten. Ten tweede is er iets dat docenten ‘anders leren’ noemen; leerlingen moeten zelfstandiger werken dan bij de gesloten experimenten, en hun eigen werkplan opstellen en uitvoeren. In de open experimenten worden daardoor meer practicumvaardigheden getraind.

De werkplannen van de leerlingen waren redelijk, en docenten waren aan de hand van een handleiding in staat om de werkplannen te bespreken. Verbeterpunten zijn aandacht voor meetnauwkeurigheid en gericht vragen naar de metingen die leerlingen uit willen voeren. Tijdens het uitvoeren van de experimenten gingen leerlingen goed om met veiligheid, op het gebied van resultatenverwerking en meetnauwkeurigheid is nog winst te behalen. De open experimenten veroorzaakten voor de practicumleider geen problemen, omdat er maar een klein aantal leerlingen tegelijkertijd een open experiment uitvoerde.

De open experimenten zijn niet geschikt voor docenten zonder ervaring met het ISP. Ook is gebleken dat één open experiment per tweetal, aangevuld met gesloten experimenten, organisatorisch het beste is: dit beperkt de tijdsinvestering van docenten, en beperkt de werkdruk op de practicumleider.

Omdat de open experimenten maar door een kleine groep leerlingen zijn getest, is vervolgonderzoek nodig om de leeropbrengst van het open practicum te bepalen. Daarnaast moet nog bekeken worden hoe werkplanbesprekingen verlopen wanneer de docent deze zonder aanwezigheid van een waarnemer of onderzoeker uitvoert, of de leerlingen in staat zijn om aan de hand van hun resultaten vragen op de handleiding te beantwoorden, en of zij een goed meetrapport op kunnen stellen.

Inhoudsopgave

1	Introductie	3
1.1	Wat is het ISP? Wat is het doel?	3
1.2	Hoe is het ISP in zijn huidige vorm opgezet?	4
1.3	Waarom is er behoefte aan een open variant?	5
1.3.1	Theoretisch kader	5
1.3.2	Haalbaarheidsonderzoek	6
1.4	Hoe ziet zo'n open experiment eruit?	6
2	Onderzoeksopzet	8
2.1	Onderzoeksvragen	8
2.2	Onderzoeksinstrumenten	9
3	Uitvoering	11
3.1	Welke experimenten?	11
3.2	Aantal deelnemers	11
3.3	Invulling door de scholen	14
3.4	Beschikbare gegevens	15
4	Resultaten	17
4.1	Wat vinden docenten en leerlingen vooraf en achteraf van het open practicum?	17
4.1.1	Docenten over open en gesloten ISP	17
4.1.2	Behoeftte aan open practicum	18
4.1.3	Anders leren	19
4.1.4	Leerlingen over open en gesloten ISP	19
4.1.5	Vergelijking leerlingen en docenten	20
4.1.6	Conclusie	20
4.2	Hoeveel tijd kost een open experiment?	21
4.2.1	Docenten	21
4.2.2	Leerlingen	21
4.2.3	Conclusie	22
4.3	Waarop en in welke fase ondervinden leerlingen problemen? Welke verschillen zijn er tussen HAVO, VWO, gemiddelde leerlingen, goede leerlingen?	23
4.3.1	Algemeen	23
4.3.2	Opmerkingen per experiment	25
4.3.3	Conclusie	27
4.4	Hebben docenten extra kennis en/of begeleidingsvaardigheid nodig om de werkplannen goed te kunnen bespreken?	27
4.4.1	Gebruik handleiding	27
4.4.2	Ervaring met ISP	28
4.4.3	Verloop van de werkplangesprekken	29

4.4.4	Conclusie	29
4.5	Is de leeropbrengst van het open practicum voldoende?	30
4.5.1	Vragenlijst leerlingen	30
4.5.2	Observaties verslagen	31
4.5.3	Plaats binnen theoretisch kader	32
4.5.4	Conclusie	33
4.6	Hoe verandert de rol van de practicumleider bij het overgaan op een open variant?	33
4.6.1	Gevolg van open experimenten voor de practicumleider	33
4.6.2	Conclusie	34
5	Discussie	35
5.1	Vervolgonderzoek	35
5.1.1	Scholen benaderen	35
5.1.2	Werkplangesprekken	35
5.1.3	Gebruik aanwijzingen op practicumhandleidingen	35
5.1.4	Open practicum met de hele klas	36
5.1.5	Leeropbrengst	36
5.1.6	Overig	36
5.2	Advies aan het ISP	37
5.2.1	Documenten uitbreiden of aanpassen	37
5.2.2	Opzetten van open practicum	38
5.2.3	Advies van deelnemers	39
6	Referenties	40
7	Bijlages	41
7.1	Onderzoeksinstrumenten	41
7.2	Gebruikte documenten	57
7.3	Werkplannen en verslagen	69
7.4	Aangepaste documenten	74

1 Introductie

Op vrijwel iedere middelbare school worden in de natuurkundeles practica gebruikt, zo ook bij de lesstof over radioactiviteit. Docenten hebben hier verschillende redenen voor. Zo kunnen practica worden ingezet om leerlingen te motiveren, hun nieuwsgierigheid te wekken, of om de behandelde theorie te ondersteunen. In het geval van radioactiviteit, een zeer maatschappelijk relevant onderwerp, is het practicum ook een manier om leerlingen bewust te maken van veiligheidsmaatregelen en eventuele angst voor straling weg te nemen.

De laatste decennia is er veel onderzoek gedaan naar het nut van practica. Uit meerdere onderzoeken blijkt dat practica, vergeleken met andere methoden, niet meer bijdragen aan begripsvorming dan andere methoden. Hierbij hebben onderzoekers practica vergeleken met methoden zoals bijvoorbeeld demonstratie, of een klassikale les. Ook het ontwikkelen van onderzoeksvaardigheden gaat met practica niet beter of sneller dan met deze andere methoden (Bates, 1978; Boud et al, 1986; Garrett en Roberts, 1982; Hodson, 1993; Hofstein and Lunetta, 1982).

De onderzoeksuitkomsten kunnen op twee manieren geïnterpreteerd worden: practicum geeft op het gebied van kennis en onderzoeksvaardigheden simpelweg geen betere resultaten dan andere methoden, *of* practicum wordt nu verkeerd toegepast en zou, op een andere manier, meer kunnen bijdragen aan de begripsvorming en onderzoeksvaardigheden van leerlingen dan het nu doet (Berg en Bosch, 1991).

Veel natuurkundeleraars en wetenschappers op het gebied van didactiek geloven in practica, en daarmee in de tweede genoemde conclusie. Redenen die worden genoemd voor de huidige teleurstellende opbrengst van practica zijn onder andere dat practicumbegeleiders te snel antwoord geven op vragen van leerlingen en dat instructies te kookboekachtig zijn.

Hoewel uit de onderzoeken blijkt dat practicum, zoals het nu wordt gegeven, op het gebied van begripsontwikkeling en ontwikkeling van onderzoeksvaardigheden geen betere resultaten geeft dan andere methoden, zijn er andere redenen voor het gebruik van practica. Zo kan voor practicum worden gekozen om leerlingen te motiveren, of om voor variatie van werkvormen te zorgen.

Ook op het gebied van radioactiviteit is er blijvend behoefte aan practicum. In 1972 is door Universiteit Utrecht het ISP, het Ioniserende Stralen Practicum, opgezet. Het ISP is een reizend practicum dat leerlingen van middelbare scholen de mogelijkheid biedt om experimenten met radioactiviteit en röntgenstraling uit te voeren.

In 1999 bleek dat er onder sommige docenten behoefte is aan een meer open practicumvorm. Om aan de vraag van docenten te voldoen zijn Koos Kortland en Rob van Rijn ongeveer drie jaar geleden begonnen met het vormgeven van open experimenten. Het ISP is nu bezig om de experimenten te testen.

Deze open practicumvorm zou, gelet op de redenen die worden genoemd voor de matige opbrengst van practica, wellicht een betere leeropbrengst voor leerlingen kunnen opleveren. Dit onderzoek is echter bedoeld om de open experimenten goed op te zetten, pas daarna is het zinvol om de leeropbrengst te onderzoeken.

In de rest van hoofdstuk 1 leest u meer over het ISP, en over de open variant. In hoofdstuk 2 zijn de onderzoeksvragen te lezen, en de manier waarop het onderzoek is opgezet. In hoofdstuk 3 staat beschreven hoe de gegevens verzameld zijn. In hoofdstuk 4 zijn de resultaten te vinden, en in hoofdstuk 5, de discussie, worden suggesties gedaan voor vervolgonderzoek.

1.1 Wat is het ISP? Wat is het doel?

In de examenprogramma's van de schoolsoorten HAVO en VWO, die in de jaren zestig werden vastgesteld, werden de onderwerpen radioactiviteit en röntgenstraling opgenomen. De theorie van deze onderwerpen werd behandeld, en ondersteund door demonstraties uitgevoerd door de docent.

Demonstraties met radioactieve bronnen brengen zekere risico's met zich mee. Daarom voerde

de rijksoverheid wettelijke bepalingen in om de veiligheid beter te garanderen door de toegestane activiteit van de radioactieve bronnen te beperken. Om te meten of bronnen aan deze regels voldeden, was preciezere en daarmee duurdere meetapparatuur nodig. Daarnaast was ook een vergunning verplicht, en moesten meer veiligheidsmaatregelen worden genomen. Hierdoor was het voor veel scholen niet meer mogelijk om de demonstraties uit te voeren.

Door gebrek aan demonstraties werd radioactiviteit een heel theoretisch en abstract examenonderdeel. Juist door de maatschappelijke relevantie van het onderwerp is het belangrijk dat de leerlingen de theorie begrijpen en risico's omtrent straling kunnen inschatten. Experimentele ervaringen met het onderwerp kunnen de interesse en motivatie verhogen, en bieden ook inzicht in de achterliggende theorie (aldus de website van het ISP).

In 1972 gaf de rijksoverheid daarom toestemming om een mobiel practicum met radioactieve stoffen en röntgenbronnen op te zetten; dit werd gedaan door de vakgroep Natuurkunde-Didactiek van de Universiteit Utrecht. Dit werd het Ioniserende Stralen Practicum, het ISP. Het ISP kenmerkte zich door de nieuwe vorm: het bestond niet uit demonstraties, maar uit een serie experimenten die de leerlingen zelf konden uitvoeren. Het ISP biedt daardoor een verdieping op het onderwerp ioniserende straling, deels theoretisch maar met name ook praktisch.

Door de grote vraag naar het practicum werd het al snel uitgebreid met nog twee mobiele practica. Daarnaast zijn in Utrecht en Goes twee vaste locaties ingericht waar de experimenten kunnen worden uitgevoerd. Op dit moment maakt ongeveer 70% van de middelbare scholen voor HAVO/VWO gebruik van het ISP.

Het ISP bestaat dus om twee redenen. Ten eerste kost het scholen veel tijd en geld om radioactieve bronnen te mogen bezitten volgens de regeling van de Kernenergiewet. Demonstraties zijn daardoor niet haalbaar. Ten tweede biedt het ISP leerlingen de mogelijkheid om zelf in een praktische omgeving kennis te maken met radioactieve stoffen en röntgenstraling. Begrippen als halfwaardetijd, dracht, absorptie en achtergrondstraling zijn zo direct waarneembaar.

1.2 Hoe is het ISP in zijn huidige vorm opgezet?

Het ISP is in principe bedoeld voor examenklassen van de middelbare school, dus voor 5HAVO en 6VWO. Indien de tijd en de capaciteit het toelaten kunnen 4HAVO en 5VWO ook deelnemen aan het practicum. Om deel te nemen aan het practicum is de bedoeling dat de klas het onderdeel radioactiviteit en röntgenstraling uit het examenprogramma heeft afgerond, zodat een gebrekkige kennis van de theorie het uitvoeren van de experimenten niet in de weg staat.

Om deel te kunnen nemen aan het ISP moet de middelbare school een bezoek aanvragen. In de meeste gevallen komt het mobiele practicum naar de school toe. Daar worden de experimenten klaargezet, zodat de leerlingen meteen kunnen beginnen.

De dag wordt ingedeeld in een aantal sessies van ongeveer twee uur. Hoeveel sessies er zijn hangt af van het aantal leerlingen dat deelneemt aan het practicum, meestal zijn het er twee à drie per dag. Per sessie kunnen ongeveer dertig leerlingen het practicum uitvoeren. De sessie start met een uitleg van de practicumleider over de risico's van radioactiviteit, en de veiligheidsmaatregelen die tijdens het practicum in acht moeten worden genomen.

Er zijn momenteel 22 experimenten beschikbaar, verdeeld over vier categorieën: Halveringstijd, absorptie, röntgenstraling en diversen. Op pagina 12 is een overzicht van deze experimenten te zien. De leerlingen voeren in twee- of drietallen een aantal experimenten uit, binnen twee uur kunnen zij er ongeveer drie tot vijf doen. Door de indeling in categorieën kunnen de leerlingen hun experimenten zo kiezen dat ze verschillende aan straling gerelateerde begrippen in de praktijk kunnen ervaren.

Voorafgaand aan de practicumsessie krijgen de leerlingen een boekje met informatie over alle experimenten. Dit boekje staat door zijn oranje kaft ook wel bekend als het oranje boekje, en is ook op de website van het ISP te bekijken.

Per experiment staan een inleiding, het doel, de meetopstelling en toepassingen in het boekje beschreven. Op de website van het ISP is nog meer informatie te vinden. Leerlingen kunnen

zich aan de hand van het oranje boekje thuis voorbereiden op het practicum en zelf experimenten uitkiezen die hen interessant lijken.

Het uitvoeren van de experimenten gebeurt met behulp van een werkblad (een voorbeeld is te vinden in de bijlage, op pagina 58), dat bij de opstellingen klaarligt. Ieder experiment heeft zijn eigen werkblad, met daarop de naam van het experiment, het doel van het experiment en een schematische weergave van de opstelling. De verdere invulling verschilt per experiment: bij de kwantitatieve experimenten, zoals het bepalen van de dracht van β -deeltjes, moeten de leerlingen een tabel invullen door het doen van metingen, en deze metingen vervolgens aan de hand van aanwijzingen en/of door het maken van een grafiek verwerken en verklaren. Bij de kwalitatieve experimenten, zoals het Wilsonvat, staan er kleine opdrachten en een aantal vragen op het werkblad die de leerlingen kunnen uitvoeren en beantwoorden.

Na afloop van de practicumssessie kunnen de leerlingen hun verwerking afronden. Het is aan de docent en de school om te bepalen of en hoe de resultaten van het practicum meegerekend worden in het schoolexamencijfer. Er kan bijvoorbeeld aan de leerlingen gevraagd worden om een experiment uit te kiezen en daarover een meetverslag te schrijven, of twee werkbladen volledig in te vullen en in te leveren.

1.3 Waarom is er behoefte aan een open variant?

Het Ioniserende Stralen Practicum bestaat sinds 1972, inmiddels dus bijna veertig jaar. De experimenten en werkbladen zijn sindsdien nauwelijks aangepast. Door de gesloten vorm van de werkbladen worden de leerlingen in kleine stapjes door het experiment geleid; het is een zogenaamd kookboekpracticum.

Dit heeft zowel voordelen als nadelen: door de gesloten vorm is het voor leerlingen niet nodig om veel tijd in voorbereiding te steken. De uitvoeringstijd per experiment wordt ook beperkt, doordat de leerlingen stap voor stap kunnen lezen wat ze moeten doen. Het vermoeden is dat leerlingen die alleen gesloten experimenten uitvoeren, meer experimenten kunnen doen in een sessie dan leerlingen die alleen open experimenten doen. De gesloten practicumvorm biedt leerlingen dus beter de mogelijkheid experimenten uit verschillende categorieën uit te voeren, en zo meer verschillende verschijnselen van radioactieve straling in de praktijk te ervaren.

Het nadeel van een kookboekpracticum is dat er weinig zelfstandigheid en initiatief van de leerlingen nodig is. Wanneer de gedetailleerde aanwijzingen de leerlingen door het experiment leiden, hoeven ze het experiment en de theorie minder goed te begrijpen dan wanneer ze alle stappen zelf moeten bedenken. Dit is bijvoorbeeld zo bij het bepalen van een halfwaardetijd: in een gesloten experiment wordt de leerlingen opgedragen eerst een grafiek te maken, dan een trendlijn tekenen, en daarna de halfwaardetijd aflezen. In een open experiment moeten de leerlingen zonder deze aanwijzingen de halfwaardetijd bepalen. Er is dus meer begrip nodig, omdat ze zelf moeten bedenken dat er een trendlijn getekend moet worden om de halfwaardetijd goed af te kunnen lezen. Open experimenten vereisen dus beter begrip van zowel de theorie als van het experiment.

1.3.1 Theoretisch kader

Naast de twee redenen die op pagina 3 genoemd zijn voor de tegenvallende opbrengst van practica (te snel antwoord van begeleiders, kookboekachtige instructies), wordt door Van den Berg en Buning (1994) een andere reden genoemd: er wordt onvoldoende onderscheid gemaakt tussen verschillende practicumsoorten.

Van den Berg en Buning onderscheiden drie soorten practicum: begripspractica, onderzoekspractica en vaardighedenpractica. Het *begripspracticum* is bedoeld om leerlingen fysische begrippen te laten begrijpen. *Onderzoekspractica* zijn bedoeld om leerlingen onderzoeksvaardigheden aan te leren, zoals het opzetten van een experiment of het leren verwerken van meetgegevens. In het *vaardighedenpracticum* (in een ander artikel van Van den Berg *apparatuurpracticum* genoemd) leren leerlingen hoe ze specifieke handelingen uit moeten voeren, zoals

het omgaan met een microscoop of pipetteren.

De open experimenten van het ISP zijn een combinatie van de drie soorten practicum: de leerlingen werken voor het eerst met de gegeven opstelling (vaardighedenpracticum), ze leren verschijnselen omtrent radioactiviteit en röntgenstraling te begrijpen (begripspracticum) en ze moeten hun eigen experiment plannen en uitvoeren (onderzoekspracticum). De nadruk ligt hierbij op het onderzoekspracticum, omdat de leerlingen zich moeten voorbereiden door een onderzoeksvraag, hypothese en meetplan op te stellen. De meetresultaten verwerken ze zelfstandig, en de bedoeling is dat zij ook een meetrapport schrijven.

Bij de gesloten experimenten hoeven de leerlingen zich niet voor te bereiden, en de verwerking van de resultaten gebeurt aan de hand van stap-voor-stap instructies. Bij de gesloten experimenten spelen onderzoeksvaardigheden dus een veel kleinere rol. In de gesloten experimenten wordt het begripspracticum met het vaardighedenpracticum gecombineerd.

Volgens de auteurs moeten de drie practicumvormen vooral in de onderbouw zoveel mogelijk onderscheiden worden. In latere leerjaren kunnen combinaties gemaakt worden, maar daarbij dient duidelijk te zijn op welke soort de nadruk wordt gelegd. Iedere docent vult de leerlijn voor zijn vak op zijn eigen manier in, en op iedere school zal de behoefte aan open practicum dan ook anders zijn.

De organisatie van het ISP wil scholen, door het aanbieden van zowel open als gesloten experimenten, de mogelijkheid bieden om een practicumvorm te kiezen die past in de leerlijn. Voor scholen die zich willen richten op begrips- of vaardighedenpractica is de gesloten vorm beschikbaar, wanneer er behoefte is aan een onderzoekspracticum kan de open variant worden gekozen.

1.3.2 Haalbaarheidsonderzoek

Bij een haalbaarheidsonderzoek (Stralen of dralen?, 1999), gaf een deel van de ondervraagde docenten aan dat zij behoefte hebben aan open experimenten. Naar aanleiding hiervan heeft het ISP besloten om een open practicumvariant te ontwikkelen.

1.4 Hoe ziet zo'n open experiment eruit?

Wat betreft opstelling en doel zijn de open en gesloten experimenten hetzelfde om de practicum-sessie hanteerbaar te houden voor de practicumleider. Eerder is gebleken dat er een chaotische situatie ontstaat als leerlingen de kans krijgen om een eigen opstelling te bedenken, de open experimenten zijn dus bij de bestaande opstellingen en onderzoeksvragen opgezet.

Het verschil tussen de open en gesloten experimenten zit in de practicumhandleiding die de leerlingen krijgen. Koos Kortland heeft voor bijna alle experimenten een practicumhandleiding voor de open variant opgesteld.

Leerlingen die een open experiment uit gaan voeren krijgen de practicumhandleiding (een voorbeeld hiervan is te vinden in de bijlage, op pagina 60) van het gekozen experiment ongeveer twee weken voor het practicum uitgedeeld. Op de handleiding staat net als bij de gesloten experimenten het doel van het experiment vermeld, met daaronder een beschrijving en schematische weergave van de opstelling.

De rest van de practicumhandleiding is anders dan bij de gesloten experimenten. De onderzoeksvraag wordt niet gegeven, leerlingen moeten die zelf opstellen. Ook wordt aan de leerlingen gevraagd om een hypothese op te stellen, en waar mogelijk een schets te maken van het verband dat zij verwachten te vinden.

Na het verwoorden van de hypothese moet een meetplan opgesteld worden. Onder het kopje meetplan staan daarvoor een aantal aanwijzingen gegeven, er wordt bijvoorbeeld gevraagd hoe de leerlingen met veiligheid om willen gaan en hoe ze willen corrigeren voor de achtergrondstraling. Zodra het meetplan af is wordt het besproken met de docent of de TOA.

Voor docenten is een handleiding beschikbaar voor het open practicum (deze handleiding is bij-

gesloten in de bijlage, op pagina 64). Hierin staat vermeld hoe het open practicum is opgezet, en wat het verschil is met het gesloten practicum. Daarnaast is een document beschikbaar met aandachtspunten voor de werkplanbesprekingen (ook dit document is te vinden in de bijlage, op pagina 66). Aan de hand hiervan kunnen docenten de werkplannen van de leerlingen controleren op volledigheid.

Bij de werkplanbesprekingen bespreken de docent en de leerlingen het geschreven werkplan. Aan de hand van vragen en opmerkingen van de docent kunnen de leerlingen nog dingen verbeteren of aanvullen. Met het verbeterde werkplan voeren de leerlingen hun experiment uit. Na het doen van de metingen verwerken de leerlingen de resultaten en schrijven ze een meetrapport. Hierbij kunnen ze gebruik maken van de aanwijzingen op de practicumhandleiding. Ook wordt er op de handleiding onder het kopje verslag bij sommige experimenten gevraagd om een verklaring te geven van bijvoorbeeld het gevonden verband, of om iets uit te rekenen aan de hand van een gevonden waarde.

Het meetrapport dat de leerlingen hebben opgesteld wordt vervolgens ingeleverd bij de docent. De deelnemende school kan zelf bepalen of het practicum meetelt voor een cijfer of niet.

In dit onderzoek wordt onderzocht of deze opzet werkt, en welke inhoudelijke en organisatorische problemen er zijn.

2 Onderzoeksopzet

2.1 Onderzoeksvragen

De hoofdvraag voor dit onderzoek is:

Hoe moet, zowel inhoudelijk als organisatorisch, een goed functionerende open variant van het Ioniserende Stralen Practicum worden opgezet?

Deze hoofdvraag is opgesplitst in zes deelvragen.

1. Wat vinden docenten en leerlingen vooraf en achteraf van het open practicum?

Deze eerste deelvraag richt zich op de meningen die er heersen onder de docenten en leerlingen over de open variant van het practicum. Wat zijn hun verwachtingen? En achteraf: wat vinden docenten en leerlingen een prettige indeling van een practicumsessie: alleen open proeven, één of meerdere open experimenten aangevuld met één of meerdere gesloten proeven, of alleen maar gesloten experimenten? Wat vinden ze van de tijdsinvestering die een open experiment vereist?

2. Hoeveel tijd kost een open experiment?

Binnen de huidige opzet van het practicum kunnen leerlingen ongeveer vier experimenten doen binnen twee uur. Met de meer open variant van het practicum moeten de leerlingen aan de hand van een zelfgeschreven werkplan metingen doen. Dit zou de benodigde tijd kunnen beïnvloeden.

Hoeveel tijd kost het om een open experiment voor te bereiden? Hoeveel uitvoeringstijd? Hoeveel tijd kost de verslaglegging? Hoeveel tijd heeft een docent nodig om de besprekingen voor te bereiden en uit te voeren?

3. Waarop en in welke fase ondervinden leerlingen problemen? Welke verschillen zijn er tussen Havo, Vwo, gemiddelde leerlingen, goede leerlingen?

Met een open practicumvorm wordt meer input van de leerlingen vereist: ze moeten zelf (binnen de beperkingen van de gegeven meetopstelling) een onderzoeksvraag en hypothese formuleren, en bedenken hoeveel en welke metingen er nodig zijn om een conclusie te trekken, vervolgens moeten ze die metingen doen en zelfstandig de verwerking uitvoeren.

Het is dus van belang om te bekijken waar de struikelblokken zitten en hoe deze het beste te verhelpen zijn. Hierbij onderscheiden we drie verschillende fases: voorbereiding, experiment en verslaglegging.

Het is hierbij ook belangrijk om te bekijken hoe het met de voorkennis van leerlingen gesteld is. De open variant vereist immers meer begrip dan de gesloten variant van het practicum.

4. Hebben docenten extra kennis en/of begeleidingsvaardigheid nodig om de werkplangesprekken uit te voeren?

Hoe verlopen de werkplanbesprekingen? Welke hulp biedt de docent als het werkplan nog niet in orde is? Zijn de docenten in staat het werkplan goed te beoordelen? Realiseert de docent zich dat er metingen moeten worden gedaan aan de achtergrondstraling, dat er vanwege het statistische karakter lange meettijd nodig is, en dat de leerlingen zelf moeten bedenken hoe ze met veiligheid omgaan?

Geeft de docent snel antwoorden of laat hij de leerlingen zelf nadenken? Er is een belangrijk verschil tussen vragen stellen/aanwijzingen geven en het antwoord voorzeggen. In het laatste geval komt dit het open karakter van het practicum niet ten goede.

5. Is de leeropbrengst van het open practicum voldoende?

Leren de leerlingen voldoende van het practicum? Voldoende betekent hierbij dat ze het experiment en de theorie goed genoeg hebben begrepen om een inhoudelijk correct verslag te schrijven.

6. Hoe verandert de rol van de practicumleider bij het overgaan op een open variant?

De opzet van een gesloten experiment en een open experiment zijn verschillend en zullen daarom vermoedelijk verschillende begeleiding vereisen.

In het gesloten geval is de practicumleider vooral aanwezig om de veiligheid van het practicum in de gaten te houden en om vragen te beantwoorden. Welke rol speelt de practicumleider bij het uitvoeren van het gekozen open experiment? Stellen leerlingen andere vragen? In de open variant heeft elk tweetal immers een ander werkplan. Is het voor de practicumbegeleider moeilijker om deze vragen te beantwoorden, moet hij zich specifiek voorbereiden op de open experimenten? Moet de practicumleider meer/minder letten op de veiligheid?

2.2 Onderzoeksinstrumenten

Het onderzoek is grotendeels uitgevoerd aan de hand van vragenlijsten en observaties. Per onderzoeksvraag staat beschreven welke onderzoeksinstrumenten gebruikt zijn, en waarom die.

1. Wat vinden docenten en leerlingen vooraf en achteraf van het open practicum?

Vragenlijst docenten

Veel docenten zullen al eerder te maken hebben gehad met het ISP. Om zicht te krijgen op hun beeld van het open practicum zal ik voorafgaand aan de werkplanbesprekingen door middel van een vragenlijst onderzoeken wat zij verwachten van de open opzet, en wat hun mening hierover is. Na de verslaglegging kan ik dan, opnieuw door gebruik van een vragenlijst, bekijken of hun verwachtingen klopten, of de mening over de open variant veranderd is, en zo ja hoe en waarom.

Vragenlijst leerlingen

Voor leerlingen ligt dit anders, zij hebben veelal nog nooit aan het ISP deelgenomen. Vooraf vragen stellen over hun ervaringen met en meningen over het ISP heeft dan ook geen zin. Wel kan na de verslaglegging door middel van een vragenlijst bekeken worden hoe ze de open variant ervaren hebben. Ze zullen dan ook een aantal gesloten experimenten hebben uitgevoerd en kennen daardoor het verschil tussen de twee varianten.

Daarnaast zal ik ook na de verslaglegging aan de leerlingen en de docent vragen wat zij een fijne manier van werken zouden vinden; alleen open experimenten, alleen gesloten experimenten, of een combinatie.

Overig

Als uitbreiding op de vragenlijst zal een afsluitend gesprek worden gevoerd met de docenten. Ook de reacties van docenten die niet konden of wilden deelnemen aan dit onderzoek zullen worden bekeken.

2. Hoeveel tijd kost een open experiment?

Observaties werkplangesprek en practicum

De deelnemende scholen plannen de werkplangesprekken op één dag. Bij deze gesprekken ben ik aanwezig, onder andere om te observeren hoeveel tijd er voor de gesprekken wordt genomen. Hetzelfde doe ik bij de uitvoering van de experimenten.

Vragenlijst docenten & leerlingen

Na elke fase (werkplan, experiment, verslaglegging) wil ik via een vragenlijst te weten komen hoeveel tijd er in deze fase zit. Zo hoop ik inzicht te krijgen in de tijd die leerlingen en docenten kwijt zijn aan open experimenten en aan gesloten experimenten.

3. Waarop en in welke fase ondervinden leerlingen problemen? Welke verschillen zijn er tussen Havo, Vwo, gemiddelde leerlingen, goede leerlingen?

Observaties werkplangesprek, practicum en meetrapport

Om inzicht te krijgen in de moeilijkheden in verschillende fases van het practicum zal ik bij de werkplanbesprekingen aanwezig zijn, bij de uitvoering van de experimenten, en zal ik achteraf de geschreven meetrapporten doornemen.

Vragenlijst leerlingen

Daarnaast is er bij elk van deze drie fases een vragenlijst voor de leerlingen waarin gevraagd wordt naar de dingen die zij als moeilijk ervaren, en hoe het met hun voorkennis gesteld is. Hierbij is het ook belangrijk om te beseffen dat de moeilijke momenten experimentafhankelijk

kunnen zijn.

4. Hebben docenten extra kennis en/of begeleidingsvaardigheid nodig om de werkplanbesprekingen uit te voeren?

Observatie werkplangesprek

Bij de werkplanbesprekingen wordt aan de hand van een lijst met observatiepunten bekeken hoe de docent hiermee omgaat. Hierin wordt onder andere gelet op hoe snel de docent het antwoord aan de leerlingen geeft, of de docent aandacht besteedt aan veiligheid en hoe kritisch de docent is.

Interview docent

Achteraf zal ik met de docent in gesprek gaan over zijn/haar ervaringen.

5. Is de leeropbrengst van het open practicum voldoende?

Observatie meetrapport

Om te beoordelen of de leerlingen de theorie voldoende begrijpen wordt bekeken of de meetrapporten inhoudelijk correct zijn.

Vragenlijst leerlingen

Daarnaast krijgen leerlingen in de vragenlijst de kans om te noteren wat ze van het practicum geleerd hebben. Hierdoor kan een vergelijking worden gemaakt tussen open en gesloten experimenten.

6. Hoe verandert de rol van de practicumleider bij het overgaan op een open variant?

Observatie practicum

Het antwoord op deze vraag wordt gevonden door te observeren bij de scholen waar zowel de open als de gesloten experimenten worden uitgevoerd.

Interview practicumleider

Daarnaast wordt een interview gehouden met de practicumleider om te weten te komen hoe deze het open practicum ervaren heeft.

3 Uitvoering

Het doel van dit onderzoek is om de verwachtingen en meningen over het open practicum van zowel leerlingen als docenten in kaart te brengen, en om te bepalen hoe de open variant van het ISP het beste kan worden aangeboden. Het gaat om een kleinschalig *kwalitatief* onderzoek.

Bij aanvang van het onderzoek werd nagedacht over de gewenste hoeveelheid gegevens. De bedoeling was om bij vier scholen langs te gaan en in totaal acht verschillende open experimenten te laten testen door in totaal 64 leerlingen, dus 32 tweetallen. Ieder experiment zou dan getest kunnen worden door leerlingen uit 4HAVO, 5HAVO, 5VWO en 6VWO. Hierbij wilde ik erop letten dat de experimenten zowel door goede leerlingen als door minder goede leerlingen werden uitgevoerd.

Helaas zijn minder gegevens verzameld dan gepland. Ook hebben de docenten de verwerkingsfase naar eigen inzicht aangepast.

In paragraaf 3.1 wordt de keuze van de acht te testen open experimenten toegelicht. Daarna staat in paragraaf 3.2 vermeld hoeveel scholen en leerlingen meewerkten aan het onderzoek. In die paragraaf staat ook uitgewerkt waarom het niet gelukt is om de beoogde vier deelnemende scholen te realiseren. In paragraaf 3.3 staat beschreven hoe de docenten de open experimenten hebben benaderd, en in paragraaf 3.4 staat per onderzoeksinstrument kort beschreven welke gegevens ermee zijn verzameld.

3.1 Welke experimenten?

Het ISP bestaat uit 22 verschillende experimenten. Ik heb de experimenten verdeeld in drie categorieën: geschikt voor de open variant, niet geschikt voor de open variant, en mogelijk geschikt voor de open variant.

Een aantal experimenten is duidelijk niet geschikt, bijvoorbeeld een experiment waarbij middelbare scholieren de resultaten moeten verklaren door met relativiteitstheorie te rekenen, of een kwalitatief experiment waarin sporen in het Wilsonvat worden bekeken.

Ook zijn er experimenten die wel geschikt zijn. Bij deze experimenten wordt een waarde of een relatie bepaald, met een niet al te moeilijke verwerking. Het bepalen van een halfwaardetijd is hier een voorbeeld van. In zo'n experiment is het doen van de metingen niet ingewikkeld, en ook de verwerking van de resultaten is niet moeilijk.

Redenen om experimenten in de categorie 'mogelijk' in te delen zijn bijvoorbeeld dat de verwerking veel tijd kost, of dat er gewerkt wordt met onbekende apparatuur. Deze experimenten kunnen wellicht worden opgenomen in de open variant, maar er moet dan nog goed getest worden of leerlingen in staat zijn de experimenten te begrijpen en te verwerken.

Omdat een klas meestal uit hoogstens 15 tweetallen bestaat en de leerlingen langs de proeven rouleren, zijn 8 experimenten geselecteerd. Zo kunnen alle leerlingen eenmaal een open experiment doen en kunnen ze bij de evaluatie de open en de gesloten variant vergelijken. Uit elke categorie is minimaal één experiment geselecteerd.

Zeven van de geselecteerde experimenten waren ook ingedeeld in de categorie 'geschikt voor open'. Alleen experiment 15 zat door de uitgebreide verwerking in de categorie 'mogelijk'. Er was echter geen experiment over röntgenstraling dat beter geschikt was, en daarom is experiment 15 toch geselecteerd.

Zes van de bovenstaande experimenten zijn daadwerkelijk getest. Experiment 12 en 20 zijn niet aan bod gekomen.

3.2 Aantal deelnemers

De open experimenten zijn getest op twee verschillende scholen, school A en school B. School A is gevestigd in een grote stad in de randstad. Op deze school wordt HAVO en (tweetalig)

Experiment	Titel	Geschikt voor open?
Halveringstijd		
2B	Radioactief verval van radon-220	Ja
2A	Radioactief verval van radon-220	Mogelijk
10	Minigenerator: de bariumkoe	Nee
20	Radioactief verval van protactinium-234	Ja
21	Ouderdomsbepaling van radioactieve bronnen	Mogelijk
Absorptie		
1	Dracht van α-deeltjes in lucht	Ja
5	Absorptie van β -deeltjes in aluminium en perspex	Mogelijk
11	Opsporen van lood	Mogelijk
12	Absorptie van γ-straling door lood	Ja
13	Kwalitatieve identificatie van radioactieve bronnen	Mogelijk
18	Elasticiteitsmodulus van rubber	Mogelijk
19	Dracht van α-deeltjes afhankelijk van de luchtdruk	Ja
22	Absorptiecoëfficiënten van aluminium voor γ -straling	Nee
Röntgenstraling		
14	Röntgenapparaat	Nee
15	Ionisatie van lucht door röntgenstraling	Mogelijk
16	Bragg-reflectie	Nee
Diversen		
3	Statistische spreiding	Mogelijk
4	Terugstrooiing van β-deeltjes	Ja
6	Geiger-Müller telbuis	Mogelijk
7	Energie van β -deeltjes	Nee
8	Kwadratenwet	Ja
9	Wilsonvat	Nee
17	Gamma-spectrometrie	Nee

Tabel 1: De experimentenset van het ISP. Achter elk experiment is aangegeven in welke van de drie categorieën het is ingedeeld: Geschikt (Ja), niet geschikt (Nee) of misschien geschikt (Mogelijk). De vetgedrukte experimenten zijn geselecteerd om in de open variant te testen.

VWO aangeboden. School B ligt in een dorp in de randstad. Ook deze school biedt tweetalig onderwijs aan, en heeft VWO, HAVO en VMBO klassen.

In totaal hebben achttien leerlingen en drie docenten meegewerkt aan het testen van het open practicum. Twee van deze leerlingen hebben alleen de voorbereidingsfase getest, zij waren ziek tijdens het practicum. Ook zijn twee van de achttien leerlingen tijdens het practicum door hun docent geïnstrueerd om een open experiment uit te voeren, zij hebben de voorbereidingsfase dus anders vormgegeven.

Docent 1, de docent van school A, heeft meer dan vijf keer deelgenomen aan het ISP, en kent de experimenten goed. Op school B werkten twee docenten mee, docent 2 en docent 3, ook beide bekend met het ISP.

In tabel 2 staat aangegeven welke experimenten zijn uitgevoerd.

Er zijn meerdere verklaringen te geven voor het testen van de open practicumvariant bij een kleiner aantal deelnemende scholen en leerlingen dan gepland. Ten eerste had het te maken met de opzet van mijn onderzoek, en de manier waarop ik naar scholen heb gezocht:

Te kort van tevoren Voor mijn bacheloronderzoek had ik een half jaar de tijd. Ik heb eerst mijn onderzoeksvragen geformuleerd en de onderzoeksinstrumenten voor een groot deel opgesteld, voordat ik contact ging zoeken met scholen. Hier heb ik voor gekozen omdat ik wilde voorkomen dat ik docenten onvoldoende goed in kon lichten over de open practicumvorm, de opzet van het onderzoek, en wat ik van hen verwachtte. Het gevolg hiervan was dat ik veelal pas een maand voor de practicumdatum contact kreeg met de

School	Leerlingen groep	Experiment	Bijzonderheden
A	6VWO, profiel onbekend	12	Niet uitgevoerd. Tijdens het practicum was één van deze leerlingen ziek, de tweede leerling heeft de plaats van een andere zieke klasgenoot opgevuld.
A	6VWO, beide NT	15	
A	6VWO, beide NT	4	
A	6VWO, beide NG	2A	
A	6VWO, beide NT	8	
A	6VWO, NT en NG	8	Deze leerlingen hebben op het laatste moment van hun docent de opdracht gekregen om dit open experiment uit te voeren. Hun voorbereiding is compleet mondeling gebeurd, dus niet zoals in paragraaf 1.4 staat beschreven. Eén van de leerlingen die dit experiment uit zou voeren was ziek. Zijn plaats is opgevuld door de leerling die oorspronkelijk experiment 12 uit zou voeren. Alvorens aan het experiment te beginnen hebben de leerlingen het werkplan nog samen doorgenomen.
B	6VWO, beide NT	1	
B	5HAVO, beide NT	4	
B	6VWO, NT en NG	19	

Tabel 2: De uitgevoerde open experimenten.

docent, en dat vonden veel van hen te weinig.

Een ander gevolg van de korte voorbereidingstijd, is dat er geen wijzigingen meer in de jaarplanning kunnen worden gedaan. Op veel scholen is het ISP opgenomen in het PTA. Dit houdt in dat de leerlingen een cijfer krijgen dat meetelt voor hun schoolexamen. Dit PTA moet aan het begin van het schooljaar bekend zijn. Ook dit was een reden voor scholen om enkel de gesloten experimenten te doen.

Tijd van het jaar Dit onderzoek is uitgevoerd in het tweede semester, dus vanaf februari. Begin maart heb ik vijf scholen benaderd, op deze scholen stond een bezoek van het ISP gepland aan het eind van april of het begin van mei. Twee van deze scholen hebben deelgenomen aan mijn onderzoek. De overige drie hebben hier vanaf gezien, omdat het ISP bij hen gebruikt wordt om de kennis van examenleerlingen nog even op te frissen. Zo kort voor de eindexamens wilden deze scholen geen extra tijdinvestering van hun leerlingen vragen.

Een ander nadeel van de tijd van het jaar is dat het ISP weinig scholen bezoekt na 30 april. In de herfst, vanaf oktober, zijn veel meer schoolbezoeken.

Te weinig scholen benaderd Omdat Rob van Rijn degene is die na dit onderzoek waarschijnlijk aan de slag gaat met de invoering van de open experimenten, heb ik zoveel mogelijk geprobeerd om bij scholen langs te gaan die in zijn schema vallen. Pas in mei heb ik geprobeerd met de andere docenten mee te gaan.

Communicatie problemen Een groot deel van de benaderde docenten heeft nooit gereageerd op mijn verzoek. Of dit komt door een te volle agenda, foutieve contactgegevens, of doordat de docent gewoonweg niet mee wilde werken, valt niet te zeggen.

Bij vervolgonderzoek is het dus belangrijk dat veel verder van tevoren contact word gezocht met scholen. Docenten willen meer tijd hebben om na te denken, om het voorstel te bespreken met collega's en om zich voor te bereiden. Een maand vinden veel van hen te kort. Eén van de docenten gaf aan dat hij graag mee had willen doen, maar dat hij dan op zijn minst een

half jaar van te voren benaderd wil worden.

Ook is het aan te raden om meer scholen te benaderen, andere practicumleiders kunnen de open variant ook testen. Om het communicatieprobleem te verminderen is het wellicht verstandig telefonisch contact te zoeken. Ik heb voor email gekozen omdat ik docenten de tijd wilde geven om alles rustig door te lezen. Ik merkte echter dat docenten die ik per telefoon benaderde een stuk enthousiaster waren.

Naast oorzaken in de opzet van het onderzoek, waren er voor docenten ook bezwaren die niet met de manier van benaderen te maken hadden:

Voorkennis van de leerlingen Op één van de scholen die benaderd werd, werden de leerlingen kort voor het practicum door middel van een spoedcursus theorie voorbereid op het practicum. Alle beschikbare natuurkundelessen tot aan de practicumdag waren dus gereserveerd om de benodigde kennis te behandelen, en er was daardoor geen tijd beschikbaar om de leerlingen een werkplan te laten opstellen.

Ervaring van de docent Twee docenten hadden nog nooit deelgenomen aan het ISP, en wilden daarom niet deelnemen. Zij verwachtten dat het uitvoeren van de werkplanbesprekingen niet zou lukken door hun gebrek aan ervaring.

Geen interesse Twee van de benaderde docenten hebben niet meegewerkt aan het onderzoek omdat zij geen interesse hadden in de open variant van het practicum. Eén van hen gaf les aan de HAVO, en vond gesloten experimenten voor deze leerlingen heel geschikt. De andere docent vond de benodigde tijdsinvestering niet opwegen tegen de mogelijk behaalde leeropbrengst.

Een aantal van deze docenten zou misschien aan dit onderzoek hebben deelgenomen als zij verder van tevoren waren benaderd, of als er meer bekend was geweest over de open practicumvariant. Wanneer de open experimenten worden toegevoegd aan het aanbod van het ISP is het dan ook aan te raden om aan het begin van het jaar, bij het verdelen van de practicumdagen, docenten te informeren over de open experimenten.

3.3 Invulling door de scholen

Zoals in paragraaf 3.2 is besproken, waren de naderende eindexamens voor veel scholen een reden om het bij gesloten experimenten te houden. Er zijn twee scholen geweest die toch mee wilden werken. Zij hebben, om de leerlingen wat te ontlasten, het open practicum iets anders uitgevoerd dan vanuit het ISP de bedoeling was.

Bij school A is zowel het voorbereiden van de werkplangesprekken als het verwerken van de resultaten op een andere manier gedaan. De leerlingen werden in de les door de docent opgedeeld in tweetallen. Zij kregen vervolgens de practicumhandleiding van een experiment en een oranje boekje. Aan de hand daarvan stelden zij in de les een werkplan op, en bespraken het werkplan direct daarna met de docent.

Na het uitvoeren van het experiment verwerkten de leerlingen de gegevens zoals zij dat in het werkplangesprek hadden besproken; ze tekenden een grafiek op papier, of gebruikten excel of coach om de meetgegevens te ordenen. Daarna werd dit resultaat met de docent doorgenomen in een afsluitend gesprek. Het gesprek diende als vervanging van het meetrapport, leerlingen hebben dus in het gesprek de resultaten en conclusies met de docent besproken.

Doordat de bespreking ook in de practicumssessie gebeurde, hebben zes leerlingen geen gesloten experiment uitgevoerd. Op school A was het ISP echter al wel in een eerder leerjaar door de leerlingen gedaan, zij konden de twee vormen dus nog wel vergelijken.

Bij school B zijn de werkplanbesprekingen uitgevoerd zoals in paragraaf 1.4 is besproken. De verslaglegging is wel anders gedaan. De docenten van school B besloten om de leerlingen niet te controleren, de resultaten en verslagen mochten direct bij mij worden ingeleverd. De leerlingen

gingen hier verschillend mee om; van twee groepjes heb ik een beknopt verslagje ontvangen, een andere groep heeft alleen de metingen opgeschreven en een rommelige schets gemaakt.

Beide scholen is gevraagd om verschillende leerlingen uit te kiezen voor de open experimenten. De bedoeling hiervan was om de open experimenten niet te testen bij leerlingen met goede cijfers maar ook bij de wat zwakkeren, of bij leerlingen met motivatieproblemen.

Alle leerlingen van school A kwamen uit dezelfde klas. De leerlingen zijn gekozen op basis van praktische overwegingen: de tweetallen moesten in dezelfde practicumssessie zitten en alle leerlingen moesten in hetzelfde lesuur beschikbaar zijn voor de werkplanbesprekingen. De klas bestond uit veertien leerlingen, tien daarvan hebben een open experiment uitgevoerd (zie tabel 2). De overige leerlingen konden door ziekte of keuzevakken niet deelnemen. De docent heeft bewust zowel de goede als de minder sterke leerlingen een open experiment uit laten voeren, en combinaties gemaakt van leerlingen die vaak, of juist zelden, samenwerken.

Bij school B hebben drie tweetallen deelgenomen uit twee verschillende klassen. De docenten hebben daar leerlingen gevraagd die een jaar eerder gematst waren door bijvoorbeeld een tentamencijfer gunstig af te ronden. Volgens de docenten betrof het gemiddelde leerlingen.

3.4 Beschikbare gegevens

Alle gebruikte onderzoeksinstrumenten zijn te vinden in de bijlage, vanaf pagina 41.

Hieronder is per onderzoeksinstrument te zien of de gezochte informatie verkregen is, en eventueel staan bijzonderheden genoemd.

Vragenlijst leerlingen De vragenlijst bestaat uit vier delen. Deel A moet worden ingevuld voorafgaand aan de werkplanbespreking, deel B daarna. Deel C gaat over het doen van de metingen en moet direct na het practicum worden ingevuld. Het laatste deel van de vragenlijst, deel D, moet worden ingevuld na het schrijven van het verslag of meetrapport. Omdat alle deelnemende leerlingen in de practicumssessie ook hun meetrapport hebben opgesteld, hebben zij deel C en D gelijktijdig ingevuld.

De deelnemende docenten hebben de vragenlijsten uitgedeeld aan de leerlingen. De bedoeling was dat iedere leerling zijn eigen vragenlijst had. Eén docent was hier niet van op de hoogte, waardoor een tweetal uit zijn groep gezamenlijk één lijst invulde.

Van drie leerlingen aan school A mist (een deel van) de vragenlijst. Twee van hen hebben maar een deel van het experiment meegemaakt door ziekte, en hebben daardoor de vragenlijst niet afgegeven. De docent heeft hen later geprobeerd te benaderen maar wegens de eindexamens is daar geen nieuwe informatie uitgekomen.

In totaal hebben 19 leerlingen meegewerkt aan het testen van een open experiment. Twee van hen missen een deel van de vragenlijst, één van hen mist de gehele vragenlijst, en van de overige zestien leerlingen is de compleet ingevulde vragenlijst beschikbaar.

Vragenlijst docenten De docentenvragenlijst bestaat uit drie delen. Net als bij de leerlingen wordt deel A voor de werkplanbesprekingen ingevuld, en deel B daarna. Deel C is bedoeld voor na de verslaglegging.

Interview docenten Het docenteninterview is bedoeld om de docenten te vragen naar hun ervaringen. Vonden ze het open practicum de tijdsinvestering waard? Hoe vonden ze het voor de leerlingen? Daarnaast werd ook gevraagd naar de verslagen, en of de docent het idee heeft dat de leerlingen genoeg hebben opgestoken van het open experiment.

De docenten van school B hebben de begeleiding tijdens het practicum grotendeels overgelaten aan de practicumleider van het ISP. Zelf hebben zij de leerlingen niet of nauwelijks in de gaten gehouden. Omdat er ook geen meetrapport is geschreven en de docenten daardoor weinig mee kregen van de experimenten, heb ik besloten om niet naar de school te reizen voor een afsluitend interview. Deze docenten hebben de vragen per email beantwoord. Het nadeel daarvan is dat het antwoord beknopter is en ik niet zover door heb kunnen vragen als in een gesprek had gekund.

Met docent 1 heb ik wel een afsluitend gesprek gevoerd, twee weken na de practicumdatum.

Werkplannen en verslagen leerlingen Na de werkplanbesprekingen hebben de leerlingen geen van allen een nieuw werkplan geschreven. Eventuele wijzigingen of aanvullingen die tijdens het gesprek naar voren kwamen hebben zij op het oude werkplan gecorrigeerd of toegevoegd.

Er is één tweetal dat wel een werkplan heeft geschreven en besproken, maar het wegens ziekte niet heeft ingeleverd. Zij hebben het experiment ook niet uitgevoerd.

Een ander tweetal, zie ook pagina 26, had onvoldoende kennis om een werkplan op te stellen. Zij zijn dan ook zonder werkplan de werkplanbespreking ingegaan. Het ISP was al een dag na de besprekingen en zij hebben de tijd niet meer gevonden of genomen om een werkplan te noteren. Deze leerlingen hebben hun experiment dan ook zonder werkplan uitgevoerd.

Twee leerlingen van school A zijn tijdens het practicum mondeling voorbereid op hun open experiment. Deze leerlingen hebben dus geen werkplan geschreven.

Op deze gevallen na heb ik van alle leerlingen het werkplan ontvangen. In totaal heb ik dus zes werkplannen. Van alle uitgevoerde experimenten heb ik de resultaten en verslagen ontvangen. De verwerking van de meetresultaten hebben de leerlingen van school A deels zelfstandig gedaan, en daarna uitgewerkt in een gesprek met de docent. Hun conclusies hebben zij in de verslagen dan ook niet of zeer beknopt genoteerd.

De leerlingen van school B hebben hun resultaten en verslagen direct bij mij ingeleverd, de docent heeft hier niet met hen naar gekeken. Ook hier zijn de verslagen heel beknopt. De aanwijzingen op de practicumhandleidingen zijn bij beide scholen niet of heel weinig door de leerlingen gebruikt.

Observaties werkplanbesprekingen Beide scholen hebben hun werkplanbesprekingen op één dag gepland, zodat ik ze bij kon wonen. Alle werkplangesprekken die werden uitgevoerd heb ik dus kunnen observeren. Alleen het bovengenoemde tweetal dat tijdens de practicumsessie het experiment voorbereid, heb ik niet kunnen observeren.

Observaties experimenten Door andere verplichtingen kon ik niet aanwezig zijn bij de practicumsessie op school A. Rob van Rijn, de practicumleider, heeft aan de hand van een aantal observatiepunten genoteerd hoe de experimenten verliepen. Zo heb ik het verloop van de experimenten toch mee kunnen nemen in mijn onderzoek.

Bij de practicumsessie op school B ben ik wel aanwezig geweest. De open experimenten waren daar zo verdeeld over de dag dat er maximaal één tegelijk werd uitgevoerd. Daardoor heb ik de open experimenten goed kunnen observeren.

In totaal heb ik drie experimenten geobserveerd, en van de vijf andere experimenten heb ik notities.

Interview practicumleider Bij beide scholen was dezelfde practicumleider aanwezig. Ongeveer twee maanden na de practicumsessie is een interview met hem gehouden.

4 Resultaten

Aan de hand van de beschikbare informatie (zie paragraaf 3.4) zijn de onderzoeksvragen uit paragraaf 2.1 zo goed mogelijk beantwoord.

4.1 Wat vinden docenten en leerlingen vooraf en achteraf van het open practicum?

4.1.1 Docenten over open en gesloten ISP

De docenten hebben op twee verschillende manieren hun mening over het practicum kunnen geven. Allereerst was er een vragenlijst, die zowel vooraf als achteraf de verwachtingen en de meningen in kaart bracht. Daarnaast is na het practicum bij de docenten een interview afgenomen.

In de vragenlijst zijn de docenten gevraagd om hun mening te geven over de open en gesloten practicumvariant, door aan te geven hoe leerzaam, tijdrovend etc. ze de practicumvorm verwachten te vinden of vinden. In tabel 3 is te zien hoe de docenten de practica ervaren.

Vergeleken met de gesloten experimenten wordt van de leerlingen bij open experimenten veel zelfstandigheid verwacht. Ze moeten zelf immers een onderzoeksvraag, hypothese en meetplan opstellen, en ook de verwerking van de resultaten gebeurt op een aantal aanwijzingen na zelfstandig. Leerlingen hebben minder houvast aan de practicumhandleiding. Hierdoor verwachtte ik dat het open practicum meer tijdrovend en uitdagend, maar minder duidelijk zou zijn.

De docenten geven in de vragenlijst inderdaad aan dat het open practicum tijdrovender is. “Het kost meer tijd, maar dat weet je van tevoren.” De drie docenten vinden het allemaal de moeite waard, omdat je meer leeropbrengst krijgt. “Maar ik moet er niet aan denken dit voor alle experimenten te moeten doen.”

Vergeleken met de gesloten practicumvorm biedt de open variant meer uitdaging, volgens de docenten. Leerlingen moeten het experiment van tevoren goed begrijpen om een werkplan op te kunnen stellen. Met de gesloten vorm kunnen ze die stap nog overslaan.

Op het gebied van duidelijkheid verschillen de meningen. Uit de gemiddelden in tabel 3 blijkt dat er volgens de docenten geen groot verschil is tussen de duidelijkheid van open en gesloten practica. Twee van de drie docenten zeggen alles duidelijk te vinden. De derde is echter van mening dat er nog niet helemaal duidelijk is wat er in de werkplannen van de leerlingen moet staan. In het interview zei de docent onduidelijk te vinden wat er van hem verwacht werd bij de werkplanbesprekingen.

	Leerzaam	Tijdrovend	Interessant	Uitdagend	Duidelijk	
Mening over gesloten practicum	4,3	2,0	4,7	3,3	4,0	$n = 3$
Verwachting over open practicum	4,7	4,0	4,3	4,7	4,0	
Mening achteraf over open practicum	4,3	3,7	4,7	4,7	4,2	

Tabel 3: Docenten over open en gesloten practicum, op een vijfpunts-schaal (van 1. Totaal niet tot 5. Heel erg). De getallen zijn gebaseerd op de ervaringen van drie docenten. Docent 1 heeft per tweetal zijn mening over het open practicum gegeven. Hiervan is eerst het gemiddelde berekend, waarna de gegevens van de docenten gemiddeld zijn.

De docenten geven zowel de open als de gesloten experimenten op het gebied van leerzaamheid dezelfde score. Na afloop van het practicum gaven zij echter alledrie aan dat zij de open experimenten leerzamer vonden. Hierover is meer te lezen in paragraaf 4.1.3.

Zowel de open als de gesloten practicumvorm wordt door de docenten als heel interessant beoordeeld. Er is, net als in de kolom ‘leerzaam’, een klein verschil te zien tussen de verwachting

en de mening achteraf. De gegevens in tabel 3 zijn echter gebaseerd op de vragenlijsten van drie docenten, en zijn dus slechts indicaties. Om meer gedetailleerde conclusies te trekken zijn meer docenten nodig.

4.1.2 Behoeftte aan open practicum

In de gesprekken werd aan de docenten gevraagd of zij gebruik zouden maken van de open practicumvariant, wanneer deze in het aanbod van het ISP word opgenomen. De drie docenten gaven alle drie aan dit zeker te willen doen, waarbij één docent expliciet als reden noemde dat de leeropbrengst van het open practicum veel hoger ligt. Het is dan ook verassend dat uit hun vragenlijst niet blijkt dat zij het open practicum leerzamer vinden. Ook hier zou het kunnen dat er op een andere manier van leren bedoeld wordt.

Hoewel het open practicum meer tijd van de docenten vereist dan de gesloten vorm, (zie paragraaf 4.2.1) zeggen twee van de drie docenten dat zij alle leerlingen uit de examenklassen (zowel HAVO als VWO) een open experiment zouden willen laten doen. Voor die tijd moet er nog wel meer onderzoek gedaan worden: “Ik zou pas deel willen nemen aan het open practicum zodra dit voldoende uitgetest en van behoorlijke kwaliteit is.”

Alledrie zouden zij dus (onder bepaalde voorwaarden) gebruik willen maken van het aanbod aan open experimenten, zodra deze zijn opgezet. Hun deelname aan dit onderzoek bewijst dat ook.

Naast deze drie docenten hebben ook anderen hun mening gegeven over het open practicum. Van de in totaal zeventien benaderde scholen hebben twee scholen deelgenomen, vijf scholen hebben niet gereageerd, en de overige tien scholen hebben toegelicht waarom zij afzagen van deelname.

Drie van deze scholen gaven aan dat zij onder andere omstandigheden graag mee hadden gewerkt aan het onderzoek. Eén van de benaderde docenten schrijft:

“Ik zou heel graag meedoen aan alles wat met ISP te maken heeft ... met enig ‘pijn in mijn hart’ zie ik je mailtje nu voorbij komen: ik had heel graag meegedaan maar dan wel in een situatie dat ik tijd had om met mijn leerlingen daar een zinvolle invulling aan te geven!”

Een andere docent, die ook met examendrukke kampt, laat weten:

“Ik vind het idee van zo’n open versie heel goed. ... Met gesloten opdrachten is het voor de leerlingen eigenlijk te gemakkelijk om een hoog cijfer te halen. Als ze (een deel van het) ISP als open practicum doen wordt het daarmee geschikter als PO. Bovendien wordt het daarmee ook interessanter.”

Een studiegenoot van een van de practicumleiders liet per telefoon weten dat het open practicum hem een heel leuk initiatief leek. Het ISP bezocht zijn school dit jaar echter voor het eerst, en door de korte tijd zag hij geen kans om het practicum uit te voeren. Daarnaast hadden

de leerlingen de benodigde lessen nog niet gevolgd: “De komende week geef ik een spoedcursus, open practicum past daar niet bij.” Eén van de docenten, met een 5HAVO-klas, liet weten dat zij het open practicum ook in een ander jaar voor deze klas niet zou gebruiken. “Je onderzoek lijkt mij zinvol, voor HAVO leerlingen prefereer echter ik toch meer gesloten opdrachten.” De leerlingen uit deze klas hadden in dat jaar al voor vijf PO’s vijf practicumverslagen opgesteld, het ISP was extra.

Wellicht zijn er onder de vijf scholen die niet gereageerd hebben ook docenten die het open practicum niet zouden gebruiken. Ik vermoed dat deze docenten, als ze het open practicum een goed idee hadden gevonden, de moeite hadden genomen om dat te laten weten.

Zes docenten hebben laten weten niet deel te nemen aan het onderzoek door tijdgebrek of omstandigheden. Zij hebben niet expliciet vermeld of ze in een ander jaar of onder andere omstandigheden wel gebruik zouden maken van de open experimenten.

Er is dus nog steeds behoefte aan open practicum, onder een deel van de docenten.

4.1.3 Anders leren

Naar aanleiding van de resultaten die bij de twee scholen zijn verzameld bleek dat het begrip ‘leerzaam’ onduidelijk was. In de vragenlijst gaven docenten aan dat ze het open en gesloten experiment even leerzaam vonden, maar na afloop gaven zij alledrie aan dat ze in het vervolg ook graag open experimenten bij het ISP zouden hebben, omdat de leerlingen er meer van leren.

Iets meer dan een maand na het practicum hebben de docenten een aantal aanvullende vragen beantwoord, onder andere om duidelijk te maken wat zij precies verstaan onder leerzaam.

Docent 1 antwoordt dat de winst zit in de voorbereiding die de leerlingen doen. “Van tevoren wordt om inzicht/een verwachting gevraagd.” Volgens deze docent kan die stap bij gesloten practicum overgeslagen worden. Bij open practicum moeten de leerlingen van tevoren begrijpen wat ze gaan doen. “Het wordt onderzoek met een doel.”

Docent 2 is het met er mee eens dat de winst vooral in de voorbereiding zit. Doordat de leerlingen zich moeten inlezen en het onderwerp op die manier leren kennen, zijn ze beter gemotiveerd. Zijn collega, docent 3, vindt dat de leerlingen bij open experimenten onderzoeksvaardigheden leren, iets dat bij gesloten experimenten in mindere mate gebeurt.

De drie docenten kunnen geen dingen benoemen die leerlingen bij gesloten experimenten wel, maar bij open experimenten niet leren. Docent 2 noemt wel dat er in de open variant meer druk kan ontstaan: “Door tijdsgebrek kunnen de leerlingen gedemotiveerd raken.”

De docenten zijn het er over eens dat er bij open experimenten anders geleerd wordt. Eén van de docenten noemt dit ‘onderzoekend leren’. Volgens een ander leidt het proactieve karakter van het practicum ertoe dat leerlingen het geleerde beter onthouden, en dat zij initiatief leren te nemen.

4.1.4 Leerlingen over open en gesloten ISP

De leerlingen hebben hun mening over het ISP gegeven door een vragenlijst in te vullen. In tabel 4 is de mening van de leerlingen weergegeven.

Ook voor de leerlingen golden soortgelijke verwachtingen als voor docenten: door de zelfstandige opzet van het open practicum was de verwachting dat het open practicum hoger zou scoren op de punten moeilijk en uitdagend, maar lager op duidelijk.

De leerlingen geven inderdaad aan dat de open variant van het practicum moeilijker en uitdagender is. Ook bevestigen zij de verwachting dat het open practicum minder duidelijk is dan de gesloten experimenten.

Beide varianten worden als ongeveer even interessant beoordeeld. Er is een klein verschil op het gebied van leerzaamheid, het open practicum scoort daar een halve punt hoger.

	Leerzaam	Moeilijk	Interessant	Uitdagend	Duidelijk	
Mening over gesloten practicum	3,4	1,7	3,2	2,3	4,2	$n = 10$
Mening over open practicum	3,9	3,4	3,4	3,5	3,1	$n = 14$

Tabel 4: Leerlingen over open en gesloten practicum, op een vijfpunts-schaal (van 1. Totaal niet tot 5. Heel erg). De getallen zijn gebaseerd op de ervaringen van veertien leerlingen. Twee van hen hebben samen één vragenlijst ingevuld, hun beoordeling weegt dan ook een factor twee zwaarder dan de beoordeling van de rest. Op één van de scholen hebben niet alle leerlingen een gesloten experiment uitgevoerd. In de kolom ‘gesloten’ is daarom de mening van de tien leerlingen die naast hun open experiment minstens één gesloten experiment hebben uitgevoerd gemiddeld.

Vier van de leerlingen geven in hun vragenlijst aan dat zij het liefste alle experimenten open zouden doen. Vijf leerlingen vinden een combinatie van open en gesloten het beste. Geen

van de leerlingen kiest voor gesloten experimenten. Als reden voor open experimenten in de practicumssessie wordt onder andere genoemd dat je er veel meer van leert, en dat gesloten proeven een beetje te makkelijk zijn.

4.1.5 Vergelijking leerlingen en docenten

In tabel 3 en 4 wordt getoond hoe respectievelijk docenten en leerlingen het gesloten en open practicum ervaren. De kenmerken leerzaam, interessant, uitdagend en duidelijk zijn door beide groepen beoordeeld. Er zit een duidelijk verschil in de beoordeling, dit wordt getoond in tabel 5.

	Leerzaam	Interessant	Uitdagend	Duidelijk	
Leerling over gesloten practicum	3,4	3,2	2,3	4,2	$n = 10$
Docent over gesloten practicum	4,3	4,7	3,3	4,0	$n = 3$
Leerling over open practicum	3,9	3,4	3,5	3,1	$n = 14$
Docent over open practicum	4,3	4,7	4,7	4,2	$n = 3$

Tabel 5: Docenten en leerlingen over open en gesloten practicum. In deze tabel staan dezelfde gegevens als in tabel 3 en 4 zijn toegelicht.

Bij zowel de gesloten als de open variant blijkt dat docenten het practicum leerzamer vinden dan de leerlingen. Hetzelfde geldt voor de kenmerken interessant en uitdagend.

In de kolom duidelijkheid is te zien dat leerling en docent het op het gebied van gesloten practicum ongeveer met elkaar eens zijn. Over het gesloten practicum zijn ze het echter niet eens; leerlingen vinden dat het practicum veel aan duidelijkheid verliest in de open variant. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de docenten de experimenten veelal al kenden in gesloten vorm, en daarom weinig moeite hadden om de open versie te begrijpen. Voor leerlingen is dat echter niet het geval, hen wordt gevraagd een experiment uit te voeren met een onbekende opstelling.

4.1.6 Conclusie

Docenten verwachten dat open experimenten meer tijd zullen kosten dan gesloten experimenten, en dat ze uitdagender zullen zijn. Na het practicum bleken die verwachtingen ook te kloppen.

Leerlingen geven net als docenten aan dat de open experimenten uitdagender zijn dan de gesloten experimenten. In tegenstelling tot de docenten, die vinden dat de beide vormen ongeveer even duidelijk zijn, vinden leerlingen de open experimenten een stuk onduidelijker en moeilijker.

Alleen open experimenten kost voor de docenten teveel tijd, en alleen gesloten experimenten worden door de leerlingen te makkelijk gevonden. Zowel de leerlingen als docenten vinden een combinatie van open en gesloten experimenten een fijne manier van werken.

De extra voorbereidingstijd die voor de open practicumvariant nodig is, vinden de docenten de moeite waard. Bij het kiezen voor open experimenten is al duidelijk dat het wat meer tijd kost. Aan leerlingen is niet gevraagd wat zij van de benodigde extra tijdsinvestering vonden, zij hebben daar dan ook geen uitgesproken mening over gegeven.

4.2 Hoeveel tijd kost een open experiment?

4.2.1 Docenten

4.2.1.1 Werkplangesprekken voorbereiden

Op de vragenlijst is de docenten gevraagd om aan te geven hoeveel tijd zij hadden besteed aan de voorbereiding van de werkplanbesprekingen. De drie docenten gaven drie antwoorden die erg van elkaar verschillen; 2 uur, 1 uur en 30 minuten. Zij moesten respectievelijk 5, 1 en 3 werkplanbesprekingen voorbereiden. Alle docenten kenden het ISP al van eerdere jaren.

Achteraf blijkt dat de docenten, naast de specifieke voorbereiding voor de werkplanbespreking, ook andere dingen als voorbereiding hebben meegeteld, zoals bijvoorbeeld het lezen van de algemene docentenhandleiding en het instrueren van de leerlingen.

Op basis van observaties en de antwoorden van docenten in zowel de vragenlijst als in het afrondende gesprek, is geprobeerd om de voorbereidingstijd op te splitsen in algemene voorbereiding en gespreksvoorbereiding. Daaruit blijkt dat er per werkplangesprek 8 tot 10 minuten aan voorbereiding nodig is, en dat daarnaast ongeveer drie kwartier wordt gebruikt voor algemene voorbereiding.

Na de afronding van het practicum op hun school is aan de docenten gevraagd hoe zij de werkplangesprekken hebben voorbereid. Docent 1 bereidde de gesprekken op het laatste moment voor. Zijn leerlingen schreven in de les hun werkplan, en de docent las de experimenten door nadat hij de leerlingen hiermee aan het werk had gezet.

Docent 3 schrijft dat hij de werkplangesprekken op de automatische piloot voorbereidt. Hij is gewend om werkplannen van leerlingen voor PO's of profielwerkstukken op dezelfde manier te bespreken. Docent 2 heeft zich voorbereid door de experimenten door te lezen.

4.2.1.2 Werkplangesprekken uitvoeren

Er zijn negen werkplangesprekken uitgevoerd, daarvan heb ik er acht bijgewoond (zie paragraaf 3.4). De docenten en leerlingen hebben tevens in hun vragenlijst aangegeven hoe lang het gesprek duurde. Hieruit blijkt dat een werkplangesprek ongeveer 10 tot 15 minuten duurt, gemiddeld 13 minuten.

4.2.1.3 Afronding

De scholen waar de open variant getest is hebben beide een andere invulling gegeven aan de afronding van het practicum (zie paragraaf 3.3).

Er waren vijf afrondende gesprekken aan school A. De duur van de gesprekken was 10 tot 20 minuten, met een enkel gesprek van 30 minuten. Gemiddeld kwam dit uit op 18 minuten per gesprek. Over de hoeveelheid tijd die nodig is voor de beoordeling en bespreking van een meetrapport is nu niets bekend. Dit is echter iets dat docenten vermoedelijk vaker hebben gedaan, en zij zullen vermoedelijk zelf in kunnen schatten hoeveel tijd dit in beslag neemt.

4.2.2 Leerlingen

4.2.2.1 Werkplan opstellen

Het schrijven van de werkplannen is op de twee scholen op een verschillende manier gebeurd, zoals beschreven is in paragraaf 3.3. De vijf gesprekken op school A werden in de les voorbereid en uitgevoerd. De gemiddelde voorbereidingstijd van de leerlingen was 15 minuten.

School B deed het anders. De drie gesprekken werden door de leerlingen op een zelf gekozen moment voorbereid, met een gemiddelde voorbereidingstijd van 38 minuten. Hierbij moet worden opgemerkt dat twee van de leerlingen in hun vragenlijst aangaven dat zij een uur met

de voorbereiding zijn bezig geweest, maar dat bij de bespreking (en tevens bij het experiment) bleek dat ze geen werkplan hadden. Wanneer deze leerlingen niet worden meegerekend komt de gemiddelde tijdsduur van de voorbereiding op iets meer dan een half uur.

Over de leerlingen van beide scholen gemiddeld blijkt dan dat de leerlingen ongeveer twintig minuten nodig hebben om hun werkplan op te stellen. Wanneer het in de les gebeurt hebben leerlingen er minder tijd voor nodig, dan wanneer ze het samen buiten de les moeten doen.

Er was geen duidelijk kwaliteitsverschil te zien tussen de werkplannen die in de les waren geschreven, en de werkplannen die de leerlingen in hun eigen tijd moesten opstellen.

4.2.2.2 Werkplangesprekken

Net zoals is beschreven op pagina 21 over de werkplangesprekken vanuit het gezichtspunt van docenten, blijkt uit observaties en vragenlijsten dat een werkplangesprek gemiddeld 13 minuten in beslag neemt.

4.2.2.3 Uitvoering en verwerking

Uit de vragenlijst bleek dat de leerlingen die minimaal één gesloten experiment hadden uitgevoerd voor de uitvoering daarvan gemiddeld 24 minuten per experiment nodig hadden. Voor de open experimenten was dit 23 minuten. De tijd die nodig is voor doen van de metingen verschilt dus niet zoveel tussen de twee soorten practicum.

Er is echter wel een duidelijk verschil te zien in verwerking: met de verwerking van de open experimenten waren de leerlingen gemiddeld 30 minuten bezig, tegen 13 minuten die voor een gesloten experiment nodig waren.

In totaal kost het uitvoeren en verwerken van een open experiment (samen 53 minuten) dus zestien minuten meer dan een gesloten experiment (samen 37 minuten). Daarbij komt nog, afhankelijk van de aanpak van de school, de extra tijd die de leerlingen nodig hebben om een net meetrapport of verslag te schrijven. Hoeveel tijd dit kost is niet bekend, omdat beide scholen op een andere manier de afrondende fase hebben gedaan (zie hoofdstuk 3.3).

4.2.3 Conclusie

In tabel 6 is te zien hoeveel tijd de verschillende fases van het practicum kosten.

Hoewel onbekend is hoeveel tijd leerlingen nodig hebben om een meetrapport te schrijven en hoeveel tijd docenten kwijt zijn aan het beoordelen van het meetrapport, kan toch een indicatie gegeven worden van de extra tijd die in een open experiment zit vergeleken met een gesloten experiment. Om dit te kunnen berekenen wordt aangenomen dat het voor de tijdsinvestering niet uitmaakt of er een rapport over een open of een gesloten experiment word geschreven, en dat het voor het beoordelen van de meetrapporten ook geen verschil maakt.

		Voorbereiden werkplange- sprek	Uitvoeren werk- plange- sprek	Uitvoeren experi- ment	Verwerking van de re- sultaten	Meetrapport schrijven	Meetrapport beoordelen
Open	Docenten	8 tot 10	13	-	-	-	Onbekend
	Leerlingen	20	13	23	30	Onbekend	-
Gesloten	Docenten	-	-	-	-	-	Onbekend
	Leerlingen	-	-	24	13	Onbekend	-

Tabel 6: De benodigde tijd voor open en gesloten experimenten. Voor toelichting van de gegevens, zie paragraaf 4.2.1 en paragraaf 4.2.1. De gegeven tijden zijn in minuten per experiment, voor docenten met meerdere tweetallen zal het gehele open practicum dus meer tijd kosten dan hier staat gegeven.

Uit de gegevens in de tabel en met gebruik van de bovenstaande aanname, blijkt dat docenten ongeveer vergeleken met een gesloten experiment ongeveer twintig minuten meer tijd nodig hebben per open experiment, en leerlingen kost het ongeveer vijftig minuten extra.

4.3 Waarop en in welke fase ondervinden leerlingen problemen? Welke verschillen zijn er tussen HAVO, VWO, gemiddelde leerlingen, goede leerlingen?

De leerlingen die hebben deelgenomen aan dit onderzoek hebben op school allemaal de lesstof over straling gekregen. Tijdens de werkplangesprekken blijkt wel dat dit geen garantie is dat de leerlingen die kennis nog paraat hebben. Zo had een leerling, die een week eerder nog het tentamen maakte, het idee dat een α -deeltje een elektron is.

In de vragenlijst is op verschillende momenten aan de leerlingen gevraagd wat zij moeilijk vonden in dat deel van het practicum. De antwoorden die zij hierop gaven zijn te zien in tabel 7. Naar deze antwoorden zal vanaf nu verwezen worden als problemen.

4.3.1 Algemeen

4.3.1.1 Werkplan opstellen en werkplan bespreken

Van de deelnemende leerlingen heeft 50% bij de vakken biologie, scheikunde en natuurkunde samen minder dan drie keer een werkplan geschreven. Het schrijven van een meetverslag voor dezelfde vakken heeft 33% minder dan drie keer gedaan. Vooral met het schrijven van een werkplan hebben sommige leerlingen dus nog weinig ervaring.

De natuurkundeleraars geven zelf ook aan dat er in de les weinig wordt geoefend met het schrijven van werkplannen en verslagen. “Alleen bij het profielwerkstuk en bij PO’s laat ik de leerlingen een werkplan en een verslag schrijven.” Het ISP zou dus een goede mogelijkheid kunnen zijn om dit aspect van onderzoek beter te belichten in het examenjaar, maar het kan aan de keerzijde ook juist een extra barrière vormen voor docenten.

In de bijlage (zie pagina 70) zijn twee werkplannen opgenomen, zoals leerlingen die hebben geschreven. Geen van de tweetallen stelde een werkplan op waar niets meer aan veranderd hoefde te worden. Dingen die in de werkplannen ontbraken zijn bijvoorbeeld de beargumentatie van de hypothese, de nulmeting, een gedetailleerd meetplan (hoe lang of op welke afstanden gaan we meten?) of een plan om de meetgegevens te verwerken. Dit zijn dingen waar de docent in de werkplanbesprekingen op moet letten.

In tabel 7 is te zien wat leerlingen volgens de vragenlijst moeilijk vonden in de verschillende fases van zowel open als gesloten experimenten. Bij het opstellen van een werkplan blijkt dat vijf leerlingen het moeilijk vonden om het experiment te begrijpen. De leerlingen die dat aangaven waren bezig met experiment 15 over Röntgenstraling en experiment 4 over de verstrooiing van β -deeltjes, bij deze experimenten moet de achtergrond dus duidelijker worden vermeld op de practicumhandleiding. Hier wordt op pagina 26 op teruggekomen.

De overige problemen die leerlingen in deze fase tegenkomen zijn vaardigheden zoals het formuleren van een onderzoeksvraag en het opstellen van een meetplan. Docenten kunnen hier hulp bij bieden.

4.3.1.2 Uitvoering experimenten

In tabel 7 is te zien dat zeven van de leerlingen niets moeilijk vonden aan het uitvoeren van een gesloten experiment. De mogelijke problemen bij gesloten experimenten blijken te liggen bij de verwerking van de resultaten, drie van de leerlingen vonden dat moeilijk. Twee van de leerlingen vonden het moeilijk om af te lezen uit de grafiek, en de derde leerling had moeite met

precisie. Dit zijn kleine problemen, die met hulp van de practicumleider of een docent opgelost kunnen worden. Deze problemen vallen eigenlijk onder de categorie ‘verwerking’, maar de leerlingen hebben ze waarschijnlijk bij de categorie ‘uitvoering’ geplaatst omdat de verwerking van de meetresultaten op beide scholen direct na het verzamelen van de meetgegevens is gebeurd. Bij open experimenten is te zien dat de leerlingen meer en meer verschillende problemen tegenkomen. Zo is er een leerling die het experiment nog niet begrijpt, en een ander vindt het moeilijk om de hypothese te beargumenteren. Dit zijn twee dingen die tijdens de werkplanbespreking al zouden moeten zijn opgelost.

De overige problemen liggen bij het uitvoeren van het meetplan: vier leerlingen vonden het moeilijk om het experiment zo goed mogelijk te doen, en twee leerlingen hebben problemen met het nauwkeurig meten van de tijd. Daarnaast is er een leerling die aangeeft dat zelfstandigheid een probleem is (categorie overig). Uit observaties bleek ook dat sommige leerlingen tijdens het uitvoeren van het open experiment veel vragen stellen aan beschikbare begeleiders, om te controleren of ze op de goede weg zitten. De problemen die leerlingen hebben met de zelfstandigheid en het goed uitvoeren van het experiment zijn daarom het beste op te lossen door te zorgen dat er voldoende gelegenheid is voor de leerlingen om vragen te stellen.

	Werkplan opstellen	Uitvoeren gesloten experiment	Uitvoeren open experiment	Verwerking gesloten experiment	Verwerking open experiment
Niets	4	7	5	7	5
Het experiment begrijpen	5		1		
De onderzoeksvraag formuleren	2				
De hypothese opstellen / beargumenteren	2		1		
Het meetplan opstellen	3				
Het meetplan gebruiken			6		
De resultaten verwerken		3	3	3	10
Overig			1		
nvt		6	1		2

Tabel 7: Wat vond je moeilijk? Antwoorden van 15 leerlingen in verschillende fases van het practicum. Deze tabel is gebaseerd op een aantal open vragen in de vragenlijst, de antwoorden van de leerlingen zijn ingedeeld in categorieën. In de categorie ‘resultaten verwerken’ zijn bijvoorbeeld de antwoorden ‘grafiek plotten’, ‘verbanden herkennen’ en ‘metingen interpreteren’ opgenomen.

In een aantal gevallen hebben de leerlingen geen gesloten experiment gedaan (zie hoofdstuk 3.3), in dat geval is er nvt aangegeven in de tabel. Leerlingen konden meer dan één antwoord geven.

Uit observaties van de experimenten blijkt dat de leerlingen snel aan de slag gaan zodra ze aan hun open experiment beginnen. Er waren maar twee tweetallen die wat tijd nodig hadden voordat hun meting kon starten. In één geval kwam dat doordat het even duurde voordat zij de opstelling begrepen (bij experiment 19, dracht van β -deeltjes afhankelijk van de luchtdruk), maar dit is iets dat bij de gesloten vorm van het experiment ook zo was geweest. Het andere tweetal moest het werkplan nog even nalezen en begon twijfelend, maar ook zij waren binnen

een aantal minuten aan het werk.

Tijdens het practicum bleek dat de practicumhandleiding en de meetopstellingen nog onvoldoende op elkaar zijn afgesteld. Bij het opstellen van het werkplan krijgen leerlingen veel vrijheid; zij kunnen zelf bepalen welke metingen ze gaan doen. In sommige gevallen is de meetapparatuur echter ingesteld op een meettijd van 10 seconden, terwijl leerlingen andere meettijden in hun werkplan hebben staan. Op de werkbladen van de experimenten moeten dus de mogelijke instellingen worden vermeld, om te voorkomen dat leerlingen met een gedetailleerd werkplan hun metingen niet kunnen uitvoeren zoals zij van plan waren.

Uit de observaties bleek dat de leerlingen allemaal goed omgaan met veiligheid. Hoewel dit niet op de werkbladen stond aangegeven, begrepen zij na het werkplangesprek en na de introductie van de practicumleider hoe ze op een veilige manier met de bronnen om moesten gaan.

4.3.1.3 Verwerking en afronding

Zowel bij de open als de gesloten experimenten hebben leerlingen problemen met het verwerken van de meetresultaten. Het aantal leerlingen dat hier in de open variant problemen mee heeft is echter wel groter.

Zowel bij de open als de gesloten experimenten zegt een deel van deze leerlingen moeite te hebben met het plotten van een grafiek of het aflezen daaruit. Problemen die alleen bij de open experimenten worden genoemd zijn verwerking in Coach en het herkennen van de verbanden. Bij het gebruik van Coach en het begrijpen van de metingen is het van belang dat er voldoende hulp aanwezig is bij het practicum. Op pagina 26 is meer te lezen over de problemen met verbanden.

De verwerking van de resultaten gebeurde bij de scholen direct na de uitvoering van het experiment, dus nog tijdens de practicumsessie (zie hoofdstuk 3.3). Het voordeel hiervan is dat de leerlingen die tijdens de verwerking op problemen stuiten nog hulp kunnen vragen van hun docent of van de practicumbegeleider. De problemen die zij in de afrondende fase tegen het lijf lopen zijn dus makkelijker op te lossen.

De leerlingen hebben bij de verwerking geen gebruik gemaakt van de aanwijzingen die voor ieder open experiment op de practicumhandleiding werden genoemd. Bij enkele experimenten staan ook kleine opdrachten vermeld, zo moet bij experiment 15 over röntgenstraling, aan de hand van de verzadigingsstroom, het exposietempo berekend worden.

Om te onderzoeken hoe deze aanwijzingen en opdrachten door de leerlingen worden ervaren, en om te weten te komen hoe de leerlingen zelfstandig een meetrapport kunnen opstellen, is vervolgonderzoek nodig.

4.3.2 Opmerkingen per experiment

In paragraaf 3.1 is de keuze van acht experimenten voor de open variant toegelicht. Door de tegenvallende deelname van scholen, zijn helaas niet alle experimenten getest (zie hoofdstuk 3.2).

4.3.2.1 Wiskunde kennis nodig voor halveringstijd (Experiment 2A)

Een specifiek probleem waar twee leerlingen tegenaan liepen was de benodigde wiskunde kennis. Deze leerlingen voerden experiment 2A uit in de open vorm, waarbij de halveringstijd van Radon-220 wordt bepaald. Beide leerlingen volgden in hun examenpakket echter wiskunde A in plaats van het uitgebreidere wiskunde B, waardoor zij niet in staat waren om uit een fit de halfwaardetijd te bepalen. Ook met behulp van logaritmisch papier konden zij de halfwaardetijd niet aflezen.

Dit probleem zou ook bij andere experimenten voor kunnen komen. Er moet dus mogelijk bij een aantal experimenten worden aangegeven dat er wiskunde B voor nodig is, er moet een bijlage worden toegevoegd over het bepalen van halfwaardetijd, en/of de bepaling moet worden

gedaan door op 50% van de oorspronkelijke stroomsterkte de tijd af te lezen. De docent van deze leerlingen wees er nog op dat het een goede uitbreiding van het programma Coach zou zijn om een functie toe te voegen van de vorm $\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{1}{2}}$.

4.3.2.2 Twee β -stralers (Experiment 8)

Ook bij experiment 8, over de kwadratenwet, kwam een suggestie voor verbetering aan het licht. De leerlingen hebben gedetailleerde metingen gedaan en gekozen voor een functiefit van de vorm ax^b , waarbij ze b wilden bepalen. Allereerst hebben ze deze bepaling gedaan met alle metingen, waaruit $b = -1.7$ werd gevonden. Na hulp van de practicumleider bleek echter dat de bron waar de metingen aan gedaan hadden ook een tweede straler bevatte. Deze heeft een dracht van ongeveer 20 cm, waardoor de functiefit bij die afstand de intensiteit van twee bronnen bevat, en bij grotere afstand maar van één bron. De leerlingen hebben de metingen onder de 20 cm uit hun fit verwijderd, waarna zij uitkwamen op $b = -2.0$.

Bij de gesloten vorm van ditzelfde experiment is de kleinste afstand die op het werkblad vermeld staat 20 cm, waardoor de invloed van de tweede bron gering is. Leerlingen die zelf een werkplan schrijven zullen dit echter niet weten.

Dit probleem zou opgelost kunnen worden door de leerlingen via de practicumhandleiding op de hoogte te brengen van de tweede straler, of door hen de vervalreeks op te laten stellen en de leerlingen er bij de aanwijzingen op te wijzen dat een andere straler ook invloed zou kunnen hebben op de metingen. Ook moet de docent op de hoogte gebracht worden van de invloed van de metingen met een afstand kleiner dan 20 cm.

4.3.2.3 Achtergrondinformatie terugstrooiing (Experiment 4)

De meeste leerlingen die deelnamen aan dit onderzoek naar open practicum hadden voor de werkplanbespreking een werkplan opgesteld. De twee tweetallen die experiment 4 uit gingen voeren hadden hier echter meer moeite mee.

Eén tweetal uit 5Havo, begreep niet wat terugstrooiing was, en had daarom geen werkplan opgesteld. Ook het andere tweetal met hetzelfde experiment had moeite om te begrijpen wat er gebeurde. Zij hadden wel een werkplan gemaakt maar konden hun hypothese niet beargumenteren omdat de inhoud van het experiment te onduidelijk was.

Op het werkblad van experiment 4 is toevoeging van extra uitleg of achtergrondinformatie dus belangrijk.

4.3.2.4 Achtergrondinformatie Röntgenstraling (Experiment 15)

Experiment 15 is door één tweetal getest. Zij vonden het allebei moeilijk om te begrijpen wat de bedoeling van het experiment was. Iets meer achtergrondinformatie op de practicumhandleiding zou leerlingen hierbij kunnen helpen.

4.3.2.5 Problemen met verbanden (Experiment 4)

In de gesloten practicumhandleiding van experiment 4 wordt geen aandacht besteed aan het herkennen van een verband in de metingen. De verwerking van de meetgegevens concentreert zich om het vinden van een onbekende stof, en het verklaren van het afwijkende resultaat. De meetserie lijkt omgekeerd exponentieel.

De leerlingen die het open experiment uitvoerden waren erg gefocust op het vinden van een verband, maar hadden er moeite mee om in de metingen een verband te herkennen. Dit kwam deels doordat zij maar één meetserie hadden, daardoor waren hun gegevens niet heel nauwkeurig. Hun kennis speelde echter ook een rol: beide jongens waren HAVO5 leerlingen, en de verbanden die zij probeerden waren recht evenredig, omgekeerd recht evenredig en kwadratisch. Het

proberen van een exponentieel verband kwam niet in hen op, hoewel exponentiële functies wel in het examenprogramma van wiskunde op de HAVO zijn opgenomen.

Dit probleem kan op twee manieren worden opgelost. Als het verband omgekeerd exponentieel is, kan in de experimenthandleiding een verwijzing worden opgenomen naar de relevante pagina's in het oranje boekje. Als de organisatie van het ISP het verband te onduidelijk vindt, moet in de open practicumhandleiding duidelijker worden vermeld dat de leerlingen geen aandacht hoeven te besteden aan het herkennen van een verband in de meetresultaten.

4.3.3 Conclusie

Bij het opstellen van de werkplannen hebben sommige leerlingen moeite met het begrijpen van het experiment. In paragraaf 4.3.2 zijn verbeteringen genoemd voor de practicumhandleidingen van de betreffende experimenten. Ook bij het opstellen van een werkplan lopen leerlingen tegen problemen aan. De werkplanbesprekingen voorafgaand aan het uitvoeren van de experimenten zijn dus nodig om te zorgen dat de leerlingen een goed werkplan hebben en weten wat ze gaan doen.

Het is belangrijk dat er tijdens het practicum voldoende begeleiding is, zodat de leerlingen om hulp kunnen vragen wanneer ze dat nodig hebben. Bij open experimenten ervaren de leerlingen meer problemen dan bij de gesloten experimenten, dit zijn voornamelijk problemen bij de verwerking van de meetgegevens. De verwerking van de meetgegevens moet daarom niet in de practicum sessie gebeuren, dit neemt zowel voor de leerlingen als voor de practicumleider teveel tijd in beslag.

Er is vervolgonderzoek nodig om te bekijken of het haalbaar is om alle leerlingen uit een klas open experimenten uit te laten voeren. Om de situatie voor de practicumleider overzichtelijk te houden moet dan per tweetal één open experiment worden uitgevoerd, en moet de verwerking van de meetresultaten achteraf gebeuren.

Ook moet onderzocht worden of de leerlingen in staat zijn om de meetgegevens zonder hulp van de practicumleider te verwerken, en of docenten daarbij de benodigde hulp kunnen bieden.

4.4 Hebben docenten extra kennis en/of begeleidingsvaardigheid nodig om de werkplannen goed te kunnen bespreken?

De docenten die de werkplangesprekken uit gaan voeren hebben allemaal ruim van tevoren een document ontvangen met informatie over het doel en de beoogde opzet van het practicum. In deze introductie staat vermeld hoe de open variant verschilt van de gesloten variant, en welke gevolgen dat heeft voor de leerlingen en voor de docent (zelf een meetplan maken, werkplangesprekken, meer zelfstandigheid, etc). Daarnaast is er voor de docenten een handleiding beschikbaar om de werkplangesprekken mee uit te voeren.

4.4.1 Gebruik handleiding

De docenten gingen alledrie het werkplangesprek in met deze laatstgenoemde handleiding. In deze handleiding staat onder andere vermeld dat er in het gesprek aandacht moet worden besteed aan meetonzekerheid, achtergrondstraling of nulafstelling (in de meeste experimenten), veiligheid en verwerking van de meetgegevens.

Over meetonzekerheid is maar in twee van de acht gesprekken iets gezegd, één daarvan was op initiatief van de leerlingen. Zodra de leerlingen aan de uitvoering van het experiment beginnen is op te merken dat ze (bijna) niet stilstaan bij de meetnauwkeurigheid: ze meten veelal één serie, en komen niet op het idee om meerdere keren te meten zodat de metingen nauwkeuriger worden.

Rob van Rijn, de aanwezige practicumleider, vindt de meetnauwkeurigheid niet zo belangrijk: "Het ISP is bedoeld om leerlingen kennis te laten maken met radioactiviteit." Theorie over

nauwkeurigheid wordt op middelbare scholen niet behandeld, het is daarom aan docenten om te bepalen of ze dit belangrijk genoeg vinden om de leerlingen erover na te laten denken.

Wanneer aandacht aan meetnauwkeurigheid wordt besteed, is het voordeel dat de leerlingen betere conclusies uit hun resultaten kunnen trekken. Bij bijvoorbeeld het herkennen van een verband of het bepalen van een waarde zou een tweede meetserie de nauwkeurigheid ten goede kunnen komen.

Aan achtergrondstraling werd in bijna alle werkplangesprekken aandacht besteed. Het enige tweetal dat niet over achtergrondstraling sprak in het gesprek heeft er in het experiment geen rekening meegehouden. Een ander tweetal heeft wel metingen gedaan naar de achtergrondstraling, maar deze vervolgens niet gebruikt bij de verwerking van de meetgegevens. Ook als leerlingen begrijpen dat er achtergrondstraling is, weten zij dus nog niet direct hoe ze daar mee om moeten gaan. Docenten moeten er tijdens de werkplanbesprekingen dus op letten dat de leerlingen de correctie op hun metingen begrijpen.

In vier van de acht werkplangesprekken is geen aandacht besteed aan veiligheid. In de vier andere gesprekken zei de docent iets over veiligheid, zoals bijvoorbeeld: “Zolang je de bron niet opeet gaat het wel goed”, en “Ga er niet op zitten en kijk er niet in”. Dit is niet de manier waarop de docenten het onderwerp veiligheid zouden moeten bespreken.

Vijf van de zeven tweetallen hebben in hun werkplan niets opgenomen over veiligheid. Er is dus maar een klein deel van de leerlingen dat stilstaat bij de risico's van straling, en bij manieren om dit te beperken.

Het doel van het ISP is om leerlingen kennis te laten maken met straling, en ze bewust te maken van de risico's ervan. Wanneer een docent de veiligheid op bovenstaande manier benadert zou het kunnen dat leerlingen het idee krijgen dat straling totaal niet gevaarlijk is. Het zou daarom beter zijn om de leerlingen te vragen naar de veiligheid, en om hen na te laten denken over de manier waarop zij de risico's voor zichzelf kunnen beperken.

De practicumleider is verplicht om alle leerlingen, voorafgaand aan het practicum, te instrueren over veiligheidsmaatregelen. De leerlingen zouden dus ook met de benodigde kennis aan hun experiment beginnen als er in hun werkplan geen aandacht zou zijn voor veiligheid. Bovendien zou het leerlingen en docenten tijd schelen wanneer zij dit onderwerp niet hoeven te bespreken.

Over de verwerking van de meetgegevens werd in bijna alle gesprekken gesproken. In sommige gevallen bespraken de leerlingen met hun docent in welk programma ze hun metingen wilden verwerken (bijvoorbeeld Coach of Excel) of bespraken ze hoe het verwachte verband aangetoond kon worden, in andere gevallen beperkte het zich tot het plan om de gegevens in een grafiek te ordenen.

Hoewel de handleiding de docenten erop wijst dat meetonzekerheid, achtergrondstraling, veiligheid en verwerking besproken moeten worden, gebeurt dit niet altijd. Eén van de docenten vond dat er niet duidelijk was wat er van hem verwacht werd in de werkplangesprekken. De docentenhandleiding moet dus nog bekeken worden, en zo mogelijk duidelijker worden herschreven.

4.4.2 Ervaring met ISP

Voor alle drie de docenten die hebben deelgenomen aan dit onderzoek was het ISP al bekend. In één geval ging het werkplangesprek over een experiment waar de docent nog niet bekend mee was. Dit bleek geen belemmering voor de docent te vormen; het doorlezen van het werkblad was in zijn geval voldoende om de bespreking uit te kunnen voeren.

In het interview na afloop van het practicum zeggen de docenten alledrie dat zij geen kennis of vaardigheden misten voor het uitvoeren van de werkplannen. Wel geeft een van de docenten aan dat hij het moeilijk zou hebben gevonden om zonder ervaring met het ISP de benodigde begeleiding aan de leerlingen te bieden. Ook bleek bij het benaderen van scholen voor dit onderzoek dat docenten met weinig of geen ervaring met het practicum niet mee wilden werken.

4.4.3 Verloop van de werkplangesprekken

De werkplangesprekken zijn bedoeld om te zorgen dat de leerlingen begrijpen wat ze gaan doen als ze aan de uitvoering van hun experiment beginnen. Leerlingen gaven op de vragenlijst voorafgaand aan en na het werkplangesprek aan of ze begrepen wat er van hen verwacht werd.

Drie tweetallen gaven van tevoren aan dat ze hun experiment niet of niet helemaal begrepen. Twee van hen deden experiment 4 over terugstrooiing van β -deeltjes, het andere tweetal deed experiment 15 over röntgenstraling. Na de bespreking gaf één van deze tweetallen aan dat het zij het hele experiment begrepen. De overige twee vulden op de vragenlijst in dat zij nog niet helemaal begrepen wat ze moesten onderzoeken.

De werkplangesprekken hebben de leerlingen dus wel op weg geholpen, maar er blijft onduidelijkheid. Er moet in de werkplanbesprekingen voor experiment 4 en 15 dus meer aandacht besteed worden aan de inhoud van het experiment.

Over het algemeen hadden de leerlingen voorafgaand aan het gesprek een redelijk goed werkplan opgesteld. Op pagina 70 van de bijlage zijn twee voorbeelden te vinden.

In de practicumhandleiding wordt aan de leerlingen gevraagd om in het werkplan aan te geven welke grootheden ze op welke manier gaan variëren. Er is echter maar één tweetal geweest dat in het werkplan noteerde bij welke waarden ze wilden meten. In de werkplanbesprekingen werd door de docenten geen aandacht aan besteed aan het ontbreken van concrete meetdoelen. Tijdens de uitvoeringen van de experimenten leidde dit echter bij geen van de leerlingen tot problemen.

Uit observaties bleek dat de leerlingen zich gedurende de gesprekken grotendeels afwachtend opstelden. De leiding van het gesprek was in handen van de docent. De houding van de docent was veelal behulpzaam, kalm en deskundig. In twee gevallen begrepen de leerlingen zo weinig van het experiment, en waren er van de docent zoveel vragen nodig om hen in de goede richting te sturen, dat het gesprek meer op een mondelinge overhoring leek. Dit was het geval bij de leerlingen die experiment 4 over terugstrooiing uitvoerden, zij waren ook degenen zonder werkplan.

Op momenten dat de leerlingen iets niet begrepen of niet konden beargumenteren, hielp de docent hen door vragen te stellen over theorie die ze eerder hadden geleerd, of door ze een voorbeeld te geven in een andere situatie. Zo vroegen twee leerlingen zich af hoe de piek in het I, d verband bij een experiment over de dracht van β -deeltjes te verklaren was. De docent legde dit uit door de situatie te vergelijken met een gang vol ballonnen. Vervolgens vroeg hij de leerlingen om zich voor te stellen dat ze een naald bij zich hadden. “Wanneer prik je meer ballonnen lek, als je hard rent of als je rustig loopt?”

Pas wanneer een werkplangesprek al een minuut of tien duurde en de leerlingen nog steeds geen goed beeld hadden van het experiment, besloot de docent ze op weg te helpen door een antwoord te geven. In het geval van de twee leerlingen die geen werkplan hadden doordat ze het experiment niet begrepen, gaf de docent hen aan het eind van het gesprek een onderzoeksvraag en een hypothese. In dit geval leek mij dat een goede keus, omdat de leerlingen nog zo weinig van het experiment begrepen dat zij geen onderzoeksvraag en hypothese konden verwoorden.

De docenten stellen zich dus goed op, laten leerlingen zelf nadenken en reiken het antwoord pas aan als de leerlingen er echt niet uitkomen. Het open karakter van de gesprekken wordt dus goed gewaarborgd, en extra vaardigheden voor de docenten zijn niet nodig.

4.4.4 Conclusie

De docenten zijn in staat om, aan de hand van het verstrekte document met aanwijzingen, de werkplanbesprekingen uit te voeren. Ze helpen de leerlingen op weg als dingen nog onduidelijk zijn, maar geven niet zomaar antwoord, waardoor het open karakter blijft gewaarborgd. Met het bespreken van veiligheid gaan ze niet allemaal goed om, maar door de instructie van de practicumleider aan het begin van het practicum levert dit geen problemen op. In het

document voor docenten moet nog duidelijker worden aangegeven dat er over een nulmeting en over meetnauwkeurigheid moet worden nagedacht.

Volgens docent A was het moeilijk geweest om de werkplanbesprekingen uit te voeren zonder kennis van het ISP te hebben. Het is dat ook niet verstandig om de open experimenten aan te bieden aan scholen die nog geen ervaring hebben met het ISP.

4.5 Is de leeropbrengst van het open practicum voldoende?

Om de leeropbrengst van het practicum te evalueren zijn twee middelen gebruikt. Allereerst werd er op de vragenlijst voor leerlingen op verschillende momenten gevraagd wat zij hadden opgestoken van bijvoorbeeld het werkplangesprek, de uitvoering van een gesloten experiment, de verwerking van het open experiment, etc. Ten tweede kon aan de hand van de ingeleverde werkplannen, resultaten en verslagen van de leerlingen worden afgelezen of en in hoeverre zij voldoende van het experiment geleerd hebben (zie hoofdstuk 2.1).

4.5.1 Vragenlijst leerlingen

4.5.1.1 Voorbereidingsfase

In tabel 8 zijn de antwoorden terug te vinden die leerlingen gaven op de vraag ‘Wat heb je geleerd bij..’ Uit de tabel blijkt dat zes leerlingen tijdens het maken van hun werkplan leerden hoe ze een werkplan moesten maken. Ook zijn er vijf leerlingen die niets zeggen te leren. Enigszins verassend zijn er drie leerlingen (kolom ‘specifiek experiment’) die al geleerd denken te hebben wat de uitkomst van het experiment gaat zijn, zij gaan er dus al vanuit dat hun hypothese correct is.

Na het bespreken van de werkplannen zijn er maar twee leerlingen die niets geleerd hebben. De twee leerlingen die nvt hebben ingevuld hebben in de practicumsessie onder begeleiding van de docent een werkplan gemaakt, en het werkplan dus niet apart besproken. De overigen geven aan dat zij geleerd hebben hoe je een beter werkplan maakt, hoe hun experiment werkt en/of hoe de resultaten verwerkt moeten worden.

	Werkplan maken	Werkplan bespreken
Algemene vaardigheden	Hoe je een werkplan maakt (4)	Hoe je een beter werkplan maakt (6)
Experiment specifiek	Hoe β -deeltjes terugkaatsen (1)	Hoe het experiment werkt (5)
	Hoe de ionisatiekromme van α -deeltjes werkt (1)	
	Dat er een omgekeerd kwadratisch verband is tussen I en R (2)	Hoe je de resultaten verwerkt (2)
Niets/Nvt	Niks (5)	Niks (2)
	Nvt (1)	Nvt (2)

Tabel 8: Leeropbrengst in de voorbereidingsfase. Antwoorden die leerlingen in de vragenlijst gaven op de vragen: ‘Wat heb je geleerd bij het maken van een werkplan?’ en ‘bij het bespreken van het werkplan?’ De antwoorden in de tabel zijn afkomstig van zestien leerlingen. Achter de antwoorden staat aangegeven hoeveel leerlingen dit antwoord of een soortgelijk antwoord gaven. Leerlingen konden meer dan één antwoord geven. De antwoorden zijn ingedeeld in de categorieën ‘Algemene vaardigheden’, ‘Specifiek experiment’ en ‘Niets/nvt’.

De werkplanbesprekingen zijn dus nodig om te voorkomen dat de leerlingen aan het experiment beginnen zonder te begrijpen hoe het experiment werkt. Ook leren de leerlingen van de bespreking hoe zij een beter werkplan kunnen maken, hun practicumvaardigheden gaan er dus op vooruit. Bij een gesloten experiment maken de leerlingen geen werkplan en vind er ook

geen werkplanbespreking plaats. De leeropbrengst van dit deel van het experiment is dus altijd meer dan de opbrengst die een gesloten experiment in dezelfde fase levert, namelijk niets. Een deel van de kennis die er in deze fase van het open experiment is verkregen zou in het geval van een gesloten experiment later natuurlijk alsnog verworven worden.

4.5.1.2 Uitvoering en verslaglegging

Op de vragenlijst werd direct na het experiment aan de leerlingen gevraagd wat zij geleerd hebben van het uitvoeren van het experiment. Na de verwerking van de resultaten en de verslaglegging is de algemenere vraag gesteld, wat heb je van het experiment geleerd? Op beide scholen hebben de leerlingen echter de verwerking en verslaglegging al tijdens de practicum-sessie gedaan, en de antwoorden op de twee vragen zijn veelal hetzelfde.

De gegevens die met dit deel van de vragenlijst zijn vergaard zijn grotendeels onbruikbaar. Leerlingen zeggen voornamelijk iets over het onderzochte verschijnsel of over de achterliggende theorie. Zo antwoorden twee leerlingen dat zij hebben geleerd dat niet alle stoffen evenveel verstrooien (experiment 4), en heeft iemand anders geleerd over de protactinium generator (experiment 10). Ook verwoorden leerlingen soms heel vaag wat ze bedoelen: ‘Ik heb geleerd dat je kennis nodig hebt om de proeven goed te doen,’ of ‘Ik heb geleerd dat er overal verbanden zijn’.

Bij vervolgonderzoek naar leeropbrengst is het aan te raden om een andere vraagstelling te bedenken. De manier van onderzoeken die ik heb gebruikt werkt duidelijk niet.

In alle practicumhandleidingen van de open experimenten zijn een aantal aandachtspunten en hints gegeven voor de verwerking (zie pagina 60 in de bijlage voor een voorbeeld). In de vragenlijst is aan de leerlingen gevraagd hoe zij deze aanwijzingen vonden. De leerlingen hebben hier allemaal antwoord opgegeven, hoewel zij bij het schrijven van een verslag weinig tot geen gebruik hebben gemaakt van de aanwijzingen.

In tabel 9 is te zien dat de leerlingen de aanwijzingen gemiddeld handig en duidelijk vonden. Daarnaast hebben de leerlingen over de hoeveelheid aanwijzingen geen duidelijke mening, zij liggen beide in de buurt van 3, wat neutraal betekent. De aanwijzingen op de werkbladen zijn door de leerlingen niet veel gebruikt (hierover meer in paragraaf 4.5.2) en een duidelijke mening over de aanwijzingen kan dan ook nog niet gevormd worden. Voor nu hoeven de aanwijzingen dus niet aangepast te worden.

Handig	2,0
Duidelijk	1,6
Overbodig	3,4
Te weinig	3,5

Tabel 9: Leerlingen over de aanwijzingen op het werkblad. Elf leerlingen geven op een vijfpuntsschaal hun mening. 1 staat voor ‘eens’, 3 voor ‘geen mening’ en 5 staat voor ‘oneens’.

Doordat de leerlingen hele beknopte verslagen hebben geschreven en door de wisselende antwoorden op de vragenlijst, is moeilijk te zeggen of de leeropbrengst van het practicum voldoende is. De aanwijzingen op de handleidingen zijn bijna niet gebruikt, hierdoor is de vergelijking met gesloten experimenten ook moeilijk te maken. Het verschil tussen de leeropbrengst van open en gesloten experimenten is deels te bepalen door de docent. Deze docent kan er bijvoorbeeld voor kiezen om de verwerking van gesloten experimenten ook met coach te laten doen, of door ook de leerlingen die een gesloten experiment doen een verslag te laten schrijven.

4.5.2 Observaties verslagen

Omdat op één van de twee scholen is gekozen voor een mondelinge nabespreking in plaats van een verslag, en op de andere school de verslagen niet bij de docent hoefden worden ingeleverd,

waren er weinig goede verslagen beschikbaar om te bekijken. Per tweetal is echter gekeken naar werkplan, metingen en conclusie, eventueel aangevuld met een verslag. Op die manier is geprobeerd om van ieder tweetal te analyseren of de leeropbrengst van het experiment in zijn geheel als voldoende beoordeeld kan worden.

In tabel 10 wordt getoond of de tweetallen in hun verslag iets hebben vermeld over de nulmeting en de nauwkeurigheid van hun open experiment.

Vrijwel alle tweetallen hebben een nulmeting gedaan. Geen van allen heeft echter in het verslag toegelicht waarom deze meting of afstelling nodig is. Of dit komt doordat de verslagen niet in een nette versie bij de docent ingeleverd moesten worden of doordat de leerlingen de noodzaak van deze meting niet inzagen, valt niet te zeggen.

Nulmeting	Nauwkeurigheid
Ja (6)	Nee (6)
Nee (2)	3 series metingen gedaan, maar niet toegelicht (1) Genoemd in discussie, maar er is geen rekening mee gehouden (1)

Tabel 10: Nulmeting en nauwkeurigheid in verslag Verslagobservaties van de deelnemende leerlingen, acht tweetallen in totaal. In de tabel staat aangegeven of de leerlingen in hun verslag hebben aangegeven hoe zij tijdens het practicum om zijn gegaan met de nulmeting en de nauwkeurigheid.

Over nauwkeurigheid wordt erg weinig geschreven, terwijl meerdere tweetallen er in hun metingen wel rekening mee hebben gehouden.

Om de leerlingen over nauwkeurigheid na te laten denken is het vooral belangrijk dat de docent in het werkplangesprek aan hen vraagt hoe ze de metingen zo precies mogelijk willen uitvoeren. Het is wellicht ook nodig om op de werkbladen meer aandacht te schenken aan het doen van meerdere meetsessies, of het uitbreiden van de meettijd. Het verbeteren van de nauwkeurigheid zou ook duidelijkere grafieken tot gevolg hebben, waardoor het voor leerlingen makkelijker wordt om hun hypothese te bevestigen of te verwerpen.

Ook tijdens de uitvoering van het experiment is het nuttig voor de docent of de practicumleider om de leerlingen te vragen naar hun plannen om de metingen zo nauwkeurig mogelijk te krijgen. De opvattingen van leerlingen over het beperken van de onzekerheid zijn niet altijd correct. Zo stelde, in één van de experimenten, leerling A aan leerling B voor om een tweede meetserie te doen. Leerling A antwoordde hierop dat dat niet slim was, omdat er dan andere waardes uit zouden komen. Bij een ander tweetal vond een soortgelijk gesprek plaats. Leerlingen zijn dus wel op de hoogte van onzekerheid, maar weten niet hoe ze hiermee om moeten gaan.

Op alle werkbladen staan een aantal tips voor de verwerking van de resultaten, soms aangevuld met een aantal rekenvragen. Hier is echter niets mee gedaan (zie paragraaf 4.3.1.3).

Uit de verslagen die de leerlingen hebben ingeleverd valt niet goed af te leiden of de leeropbrengst van het open practicum voldoende is, omdat de verslagen bijna allemaal snel zijn opgesteld. In de bijlage zijn twee verslagen toegevoegd, zie hiervoor pagina 72.

Om te bepalen of de leeropbrengst voldoende is zijn na het practicum intensievere gesprekken met de docent een oplossing, maar het zou ook kunnen helpen om de leerlingen een net verslag te laten schrijven en dit in laten te leveren. Ook moeten er een aantal aanpassingen gedaan worden aan de docentenhandleiding en aan de werkbladen, om te zorgen dat de leerlingen de aandachtspunten bij de verwerking niet over het hoofd zien.

4.5.3 Plaats binnen theoretisch kader

In het eerste deel van de introductie op pagina 3 en in paragraaf 1.3.1 staat een beknopte schets van wat er in de literatuur wordt geschreven over de didactiek van practica. De docenten die deelnamen aan dit onderzoek hebben in de laatste vragenlijst aangegeven hoe zij normaal practicum integreren in het lesprogramma van de examenklassen.

De docenten van de 6VWO leerlingen doen weinig aan practica in de les, door tijdgebrek. Het ISP is voor docent 1 zelfs het enige practicum in het schooljaar, de rest zit verspreid over 4 en 5VWO. Docent 3 zegt een stuk actiever te zijn met practicum, eens in de twee maanden laat hij de leerlingen in de les experimenten uitvoeren over licht, mechanica, of werken met Coach. Toch vindt hij dat eens in de twee maanden te weinig is.

In paragraaf 1.3.1 worden de drie verschillende soorten practicum genoemd zoals deze door Van den Berg en Buning zijn ingedeeld: Begrips-, onderzoeks- en apparatuurpractica. Geen van de docenten houdt in het examenjaar rekening met het onderscheiden van deze practica. In lagere leerjaren gebeurt dit meer: “In 4VWO doe ik voornamelijk onderzoekspractica,” aldus docent 1. Docent 2 maakt in geen enkel leerjaar onderscheid, en docent 3 onderscheidt de drie soorten nog in 3, 4 en 5 VWO.

De deelnemende docenten maken in het examenjaar geen van allen onderscheid tussen de verschillende practicumvormen. Dat er in de open experimenten meerdere practicumvormen gecombineerd worden, is voor hen dan ook geen bezwaar.

4.5.4 Conclusie

Bij het uitvoeren van de open experimenten hebben de leerlingen naar eigen zeggen geleerd hoe zij een werkplan moeten maken. Daarnaast heeft een deel van de leerlingen vaardigheid opgedaan met Coach of met Excel. Over de leeropbrengst is verder niet veel te zeggen, omdat de verslagen te beknopt waren. Er is vervolgonderzoek nodig om te bepalen of de leeropbrengst voldoende is, en hoe de leerlingen omgaan met de aanwijzingen op de werkbladen.

4.6 Hoe verandert de rol van de practicumleider bij het overgaan op een open variant?

4.6.1 Gevolg van open experimenten voor de practicumleider

De open variant van het ISP is nu op twee scholen getest. Op school A was docent 1, met een ruime ervaring met het ISP, ook tijdens het practicum aanwezig. Hier hield de docent zich voornamelijk bezig met de leerlingen die de open variant van het practicum uitvoerden, waardoor de practicumleider geen grote verschillen ondervond in werkdruk, of meer lastige vragen kreeg.

Op school B waren de docenten aanwezig tijdens de practicumsessie, maar liepen zij niet rond tussen de leerlingen en waren zij met name met hun eigen dingen bezig achter de computer. De groepen waren echter klein (ongeveer 20 leerlingen per groep) en per practicumronde was er steeds maar één tweetal dat een open experiment deed. Ook hier was er voor de practicumleider dus geen groot verschil op te merken.

Rob van Rijn, de practicumleider bij beide scholen, heeft zich voorbereid door de practicumhandleidingen van de open experimenten door te lezen. De experimenten zelf zijn nog steeds hetzelfde, meer voorbereiding was dus niet nodig.

Tijdens de uitvoering van de experimenten bleek dat de practicumleider weinig extra tijd nodig had om de leerlingen die met een open experiment bezig waren te begeleiden. “Ze hadden weinig sturing nodig.” Rob van Rijn denkt wel dat dit anders zou zijn als er bij de uitvoering geen extra persoon aanwezig zou zijn: op school A kon docent 1 zijn leerlingen helpen, en bij het school B was ik zelf aanwezig.

Hoewel ik de leerlingen van tevoren vertelde dat ik alleen zou observeren, verwacht Rob van Rijn dat ze zonder mijn aanwezigheid meer aandacht nodig hadden gehad. “Leerlingen gaan er vanuit dat je ingrijpt als ze iets doen dat niet mag.”

Er was wel een verschil in het soort vragen. Leerlingen willen soms andere meettijden aanhouden dan op de practicumhandleiding is aangegeven (zie pagina 23), en stellen daardoor meer apparatuur-gerelateerde vragen.

Wanneer er binnen een klas meer open experimenten worden uitgevoerd, zal volgens Rob van Rijn de benodigde aandacht oplopen. De docent moet zijn aandacht dan over meer leerlingen verdelen, en daardoor zal de voorbereiding minder nauwkeurig gebeuren. Minder goede leerlingen zullen tijdens het experiment ook meer vragen stellen en begeleiding nodig hebben.

4.6.2 Conclusie

Met kleine groepen leveren de open experimenten weinig extra werk op voor de practicumleider. Of dit ook zo is wanneer er geen docent aanwezig is om te helpen, of wanneer er geen observaties worden gedaan, moet nog onderzocht worden.

5 Discussie

De discussie is opgesplitst in twee delen. In het eerste deel worden onderwerpen genoemd waar nog onderzoek naar nodig is, en dingen genoemd waar in het vervolg beter rekening mee kan worden gehouden. In het tweede deel wordt op basis van de bevindingen tot nu toe advies gegeven aan het ISP omtrent het aanbieden van de open experimenten.

5.1 Vervolgonderzoek

5.1.1 Scholen benaderen

In paragraaf 3.2 zijn de problemen met het vinden van scholen genoemd. Voor volgende onderzoeken is het heel belangrijk om scholen een aantal maanden van tevoren al te benaderen. Het kan ook interessant zijn om met verschillende practicumleiders mee te lopen, dat vergroot het aantal mogelijke scholen en de andere practicumleiders doen ervaring op.

Rob van Rijn denkt dat het ook goed kan werken om scholen aan het begin van het schooljaar op de hoogte te brengen van het lopende onderzoek naar een open practicumvariant. “Het zijn de docenten die om deze variant vroegen.” Hij hoopt dat scholen zelf contact opnemen als ze mee willen werken.

5.1.2 Werkplangesprekken

Uit dit onderzoek bleek dat de docenten redelijk goed in staat zijn om de werkplangesprekken uit te voeren, op het gebruik van de docentenhandleiding na. Veiligheid en nulmeting werd nu nog vergeten. Met een aangepaste handleiding voor de docenten, kan er vanuit worden gegaan dat de gesprekken goed verlopen. Er zijn nog drie manieren van onderzoek mogelijk naar de werkplangesprekken.

Practicumleider Rob van Rijn is van mening dat getest moet worden hoe de werkplanbespreking gaan zonder observatie. Hoewel ik alleen heb geobserveerd en niets heb gezegd, zijn de docenten door mijn aanwezigheid toch gedwongen om de werkplangesprekken te plannen en uit te voeren. Rob verwacht dat dit anders gaat als er niemand aanwezig is om te observeren, en vraagt zich af hoe het gaat als docenten voorafgaand aan het practicum alleen de nodige informatie ontvangt. Nu bleek al dat de docenten, hoewel er in de docentenhandleiding duidelijk over veiligheid, achtergrondstraling en nauwkeurigheid werd gesproken, deze aspecten in de werkplanbesprekingen nogal eens vergaten.

Het kan ook interessant zijn om te testen hoe goed voorbereid de leerlingen bij de experimenten verschijnen als er geen werkplanbespreking is, maar ze zelf de verantwoordelijkheid krijgen om een werkplan op te stellen. Als hieruit blijkt dat dit resulteert in onbegrijpende blikken en veel behoefte aan begeleiding, kan aan de docenten duidelijk worden gemaakt hoe belangrijk de werkplanbesprekingen zijn.

Een derde mogelijkheid is een tussenvorm: leerlingen schrijven een werkplan, leveren dit in bij de docent, en de docent kijkt dit na. Alleen als er echt iets markeert aan het werkplan (achtergrondstraling vergeten, onjuiste onderzoeksvraag, etc) kan een kort gesprekje met de leerlingen worden gevoerd. Als deze manier van voorbereiding werkt, kan dat in de toekomst bezwaren van docenten tegen het open practicum wegnemen, en wordt het ook mogelijk om met de hele klas open experimenten te doen.

5.1.3 Gebruik aanwijzingen op practicumhandleidingen

De duidelijkheid van de opmerkingen en opdrachtjes op de practicumhandleidingen moeten nog bekeken worden. De docenten die betrokken waren bij dit practicum waren of niet op de hoogte van deze aanwijzingen, of vonden het niet nodig dat de leerlingen ze uitvoerden. Hierdoor ging bijvoorbeeld een groot deel van het experiment over röntgenstraling verloren:

leerlingen beschreven alleen het verband tussen de ionisatiestroomsterkte en de spanning, maar keken niet naar de aanwijzingen bij de verwerking. Daardoor hebben zij niet gewerkt met de begrippen exposie en dosis. Het gesloten experiment heeft, op deze manier, dus meer leeropbrengst wat betreft begrippen.

Een mogelijke oplossing hiervoor, genoemd door Rob van Rijn (zie ook paragraaf 5.2, is het geven van een onderzoeksvraag. Dat kan ook zijn ‘Hoe lang moet een röntgenapparaat aan staan om een foto van een gebroken been te maken?’ Door zo’n onderzoeksvraag worden leerlingen gedwongen om de verwerking stap voor stap uit te voeren. Of leerlingen nog begrijpen wat ze moeten onderzoeken om zo’n vraag te kunnen beantwoorden, en of dit dus een goede manier is om met de aanwijzingen om te gaan, moet nog onderzocht worden.

5.1.4 Open practicum met de hele klas

Twee van de docenten die deelnamen aan dit onderzoek gaven aan dat zij met de gehele klas het open practicum uit zouden willen voeren, zodra dit mogelijk is. Dit zou betekenen dat er in een practicumssessie ongeveer twaalf tweetallen een open experiment uitvoeren. Er moet onderzocht worden of dit mogelijk is, zowel voor de docent, als voor de practicumleider en de leerlingen zelf. Er komt immers een hogere druk te staan op de docent, wanneer deze met alle leerlingen een werkplan moet bespreken. En ook tijdens de practicumssessie zal er verschil zijn, mogelijk wordt het een complete chaos.

Practicumleider Rob van Rijn vindt het belangrijk dat duidelijk is of open practicum kan, met de hele klas. Als blijkt dat het niet gaat, kan tegen docenten worden gezegd dat uit onderzoek bleek dat het niet kan. Zelf verwacht Rob dat het niet werkt. “De open experimenten zijn geschikt voor de betere leerlingen, of misschien voor scholen die iets anders willen.” Rob verwacht dat de practicumssessie te druk wordt als iedereen een open experiment doet, en dat een practicumleider niet genoeg tijd heeft om alle leerlingen te helpen. “Het moet worden getest met twee practicumleiders, om te voorkomen dat er zoveel vragen zijn dat de leerlingen niets van het practicum opsteken.”

5.1.5 Leeropbrengst

Uit de verslaglegging van de leerlingen viel slecht af te leiden of zij iets begrepen van het experiment. Om de leeropbrengst beter in kaart te kunnen brengen, moet gezorgd worden dat er een mogelijkheid is om te inventariseren wat de leerlingen na het practicum geleerd hebben. Er is dus vervolgonderzoek nodig, waarbij de leerlingen een net meetrapport op moeten stellen. Ook kan onderzoek gedaan worden naar de leeropbrengst bij afsluitende gesprekken in plaats van verslagen, zoals op school A gebeurde. Deze afsluitende gesprekken moeten dan ook geobserveerd worden.

5.1.6 Overig

Het uitvoeren van de nabesprekingen met docenten is een belangrijk deel van het onderzoek. Bij twee docenten heb ik dit gesprek vervangen door een vragenlijst omdat een groot deel van de dingen die ik wilde vragen bij hen niet relevant was. Het is dan echter heel moeilijk om gedetailleerde antwoorden te krijgen. Het voeren van gesprekken over de telefoon is hier een goed alternatief voor.

Zodra de open experimenten worden opgenomen in het aanbod van het ISP, is het belangrijk dat docenten een beeld kunnen krijgen van de werkplangesprekken. Het aanbieden van filmpjes van deze gesprekken is daar een goed medium voor. Dit heb ik zelf helaas niet gedaan, maar het kan nog gedaan worden wanneer er vervolgonderzoek komt.

Er kan onderzocht worden welke andere experimenten zich lenen voor het open practicum. Dit is iets dat minder prioriteit heeft dan de overige suggesties; uitbreiding van de experimentenset

kan het beste gebeuren als de zes verschillende experimenten die in dit onderzoek zijn getest, nog een aantal keer getest en eventueel verbeterd zijn.

5.2 Advies aan het ISP

5.2.1 Documenten uitbreiden of aanpassen

In hoofdstuk 4 staan een aantal suggesties genoemd voor verbetering van de documenten.

5.2.1.1 Practicumhandleiding voor leerlingen

Op pagina 60 van de bijlage is de open practicumhandleiding van experiment acht te vinden zoals de leerlingen deze tijdens hun experiment hebben gebruikt. Alle gebruikte open practicumhandleidingen heb ik aangepast. Op pagina 77 is de aangepaste practicumhandleiding van experiment acht te vinden.

De veranderingen staan hieronder genoemd en toegelicht:

- **Opmaak** Op de aangepaste practicumhandleidingen wordt meer met opsommingstekens gewerkt dan op de oorspronkelijke versies. Dit maakt het voor leerlingen makkelijker om te zien of ze alles hebben gedaan, en op stapje voor stapje het meetplan op te bouwen.
- **Hypothese** Op de oorspronkelijke practicumhandleidingen wordt aan leerlingen gevraagd om een hypothese op te stellen bij hun onderzoeksvraag, over het verband tussen de twee relevante grootheden, en om een schatting te geven van de verwachte meetuitkomst. Dit is dubbelop, en daarom wordt op de aangepaste versie alleen naar het verband en de verwachte uitkomst gevraagd.
- **Verwerking meetresultaten** Op de oorspronkelijke practicumhandleiding wordt het kopje onderzoek direct gevolgd door het kopje verslag. Daaronder staan aanwijzingen gegeven. Op de aangepaste practicumhandleiding is voor de volgorde onderzoek - verwerking meetresultaten (dit zijn de aanwijzingen uit het oorspronkelijke document) - verslag gekozen, zodat leerlingen minder snel over deze aanwijzingen heen zullen kijken.
- **Beperkingen meetopstelling** Zoals in paragraaf 4.3.1.2 is beschreven, waren de beperkingen van de practicumopstellingen niet goed aangegeven op de practicumhandleidingen. Dit is nu verbeterd; waar nodig is op de handleidingen aangegeven welke metingen gedaan kunnen worden met de opstelling.
- **Per experiment** In paragraaf 4.3.2 zijn problemen beschreven die specifiek bij één experiment horen. In de practicumhandleidingen van deze experimenten zijn aanpassingen gedaan om deze problemen te verminderen.

5.2.1.2 Docentenmateriaal

De oorspronkelijke versie van de docentenhandleiding is te vinden op pagina 64, en de aangepaste versie staat op pagina 75. In de docentenhandleiding zijn een aantal resultaten van het onderzoek opgenomen, zoals de tijd die open experimenten kosten en het belang van de werkplanbespreking.

Afhankelijk van de wens van het ISP kan deze beknopte handleiding ook als introductie worden gebruikt om nieuwe scholen te werven voor verder onderzoek, of om de open experimenten al voor kleine groepen leerlingen aan te bieden.

Het document met aandachtspunten voor de werkplanbesprekingen is aangepast. De versie die gebruikt is tijdens dit onderzoek is te vinden op pagina 66. Naar aanleiding van de geobserveerde werkplangesprekken en de problemen die sommige leerlingen hadden bij het begrijpen

van hun experiment, is het document voor de werkplanbesprekingen aangepast en uitgebreid. De nieuwe versie van dit document is te vinden op pagina 79.

5.2.1.3 Oranje boekje

Om te voorkomen dat leerlingen met wiskunde A hun resultaten niet kunnen verwerken, moet hulp worden geboden. In het oranje boekje staat al informatie over enkellogaritmisch papier, maar er wordt niet toegelicht hoe de halveringstijd bepaald kan worden. Leerlingen kunnen zich afvragen wat er verwacht wordt: moeten ze iets moeten doen met de richtingscoëfficiënt van de lijn, of mogen ze de tijd aflezen bij 50% van de oorspronkelijke intensiteit? De informatie in het boekje zou uitgebreid kunnen worden met een voorbeeld, zodat leerlingen hier niet meer op vast hoeven te lopen.

5.2.2 Opzetten van open practicum

Wanneer dat al het bovenstaande is aangepast, zijn de experimenten goed genoeg om aan te bieden aan scholen. Uit de reacties van docenten op mijn verzoek om mee te werken aan dit onderzoek, bleek dat docenten veel tijd nodig hebben om te besluiten of ze deel willen nemen aan het practicum. Het is dus belangrijk om de contactpersonen van middelbare scholen op tijd te benaderen, zeker maanden van tevoren. Een goed moment hiervoor zou de jaarlijkse inschrijving in September kunnen zijn.

Omdat de open experimenten nog in een testfase zitten en ook de ervaren docenten in dit onderzoek de werkplanbesprekingen niet helemaal uitvoerden zoals werd beoogd, raad ik aan om alleen docenten met ervaring met het ISP deel te laten nemen aan de open experimenten.

In hoofdstuk 5.1 worden onderdelen van het open practicum genoemd die nog extra onderzoek nodig hebben. Zoals het er nu voorstaat, kan het open practicum op grotere schaal getest worden: meer scholen, iets meer leerlingen in de les. Per practicumsessie van twee uur kunnen ongeveer twee tot vier tweetallen een open experiment uitvoeren. Het is dan wel belangrijk dat de practicumleider de leerlingen goed in de gaten houdt, en eventuele problemen noteert om zo de experimenten verder te kunnen verbeteren.

De combinatie van één open experiment en daarbij één of meerdere gesloten experimenten is de leerlingen goed bevallen. Het combineren van meerdere open experimenten in de practicumsessie legt nog een hogere druk op de docenten of TOA, en heeft ook als gevolg dat de leerlingen meerdere werkplannen en meetrappen moeten gaan schrijven. Bovendien zijn nog niet genoeg open experimenten beschikbaar om dit te realiseren.

Wel is het interessant voor de leerlingen om uit meerdere categorieën een experiment uit te voeren, zodat ze verschillende aspecten van straling kunnen zien. Mijn advies is om de docent aan te raden om de leerlingen minimaal drie experimenten te laten doen: hun eigen gesloten experiment, een kwalitatief experiment (zoals het bellenvat of röntgenapparaat, eventueel zonder werkblad in te vullen) en daarnaast nog één of twee experimenten uit een andere categorie. Dit is de leerlingen in dit onderzoek niet gelukt, omdat veel van hen tijdens de practicumsessie de resultaten helemaal verwerkten en sommigen ook al een verslagje schreven of een nabespreking deden met de docent.

Oorspronkelijk was het de bedoeling om leerlingen zelf een moment uit te laten kiezen om een werkplan te schrijven. Op school A heeft de docent de leerlingen in de les een werkplan laten schrijven, iets dat goed werkte. Deze manier kan dus ook worden genoemd in het informatiedocument voor de docenten.

Docent 1 heeft met zijn leerlingen tijdens het practicum de resultaten van het experiment besproken. Hierdoor kan de docent goed beoordelen of de leerlingen het experiment begrepen, en kunnen eventuele misvattingen van leerlingen snel worden opgehelderd. Het nadeel is echter dat de leerlingen veel tijd kwijt zijn aan het open experiment, en weinig of zelfs geen tijd overhouden voor een gesloten experiment.

5.2.3 Advies van deelnemers

Aan de docenten die deelnamen aan dit onderzoek is gevraagd wat zij de organisatie van het ISP aanraden, en ook wat zij collega's zouden aanraden.

Docent 1 zou het goed vinden als er een instructie voor het gebruik van Coach wordt opgesteld, omdat verbanden in dat programma veel beter te herkennen zijn dan in Excel. Deze docent zou graag meer open experimenten zien, nu zijn er nog maar zes experimenten getest.

De docenten geven hun collega's als tip om zelf de tijd te nemen voor de voorbereiding, en om de leerlingen goed voor te bereiden op het experiment. Ook TOA's zullen zich goed in de experimenten moeten verdiepen om de benodigde begeleiding te kunnen geven, zegt docent 1. "TOA's moeten van tevoren een cursus volgen, alleen een natuurkunde TOA heeft voldoende kennis." Docent 2 geeft als tip om Low-Profile beginnen.

Bij het opstellen van het meetplan kunnen de leerlingen volgens Rob iets meer geholpen worden door op de practicumhandleiding een onderzoeksvraag en wat meer aanwijzingen te geven. "Nu waren er twee leerlingen met de onderzoeksvraag: 'Wat doet straling als de afstand toeneemt?' Die vraag kun je met twee metingen al beantwoorden." Een vraag als 'Wat is het verband tussen afstand en intensiteit?' is dan beter.

Het nadeel van het geven van een onderzoeksvraag is dat het open karakter van de experimenten erdoor afneemt. Het benadrukken van het belang van de werkplangesprekken is wellicht een beter idee.

6 Referenties

- Bates, G. (1978), *What research says to the science teacher*, Vol. 1, National Science Teachers Association, chapter The role of the laboratory in secondary school science programs.
- Beasly, W. (1979), 'The effect of physical and mental practice on psychomotor skills on chemistry student laboratory performance', *Journal of Research in Science Teaching* **16**, 473–479.
- Beasly, W. (1983), 'Mental practice as a technique to improve laboratory skill development', *Journal of Chemical education* **60**, 488–489.
- Berg, E. & Giddings, G. (2009), 'The pick of teaching in the laboratory: Turning manipulation of equipment into manipulation of ideas', *Teachers' Professional Knowledge in Science and Mathematics Education: Views from Malaysia and Abroad* pp. 85–110.
- Berg, E. v. & Bosch, G. (1991), 'Is practicum tijdverspilling?', *Woudschotenverslag* pp. 67–71.
- Berg, E. v. & Buning, J. (1994), 'Practicum: leren ze er wat?', *NVOX* **19**(6), 245–249.
- Boud, D., Dunn, D. & Hegarty-Hazel, E. (1986), *Teaching in Laboratories*, Guildford (UK): SHRE & NFER-Nelson.
- Bryce, T. & Robertson, I. (1985), 'What can they do? a review of practical assessment in science.', *Studies in Science Education* **12**, 1–24.
- Garrett, R. & Roberts, I. (1982), 'Demonstration versus small group practical work in science education. a critical review of studies since 1900', *Studies in science education* **9**, 109–146.
- Hodson, D. (1993), 'Re-thinking old ways: Towards a more critical approach to practical work in school science.', *Studies in Science Education* **22**, 85–142.
- Hofstein, A. & Lunetta, V. (1982), 'The role of the laboratory in science teaching: Neglected aspects of research.', *Review of Educational Research* **52**(2), 201–217.
- Hulsbeek, M., Meijerink, G., Schurink, M. & Wiegman, H. (1999), 'Stralen of dralen? haalbaarheidsonderzoek naar het ioniserend stralen practicum (isp)', *SLO*.
- ISP (geraadpleegd in mei 2011), '<http://www.cdbeta.uu.nl/subw/isp>'.

7 Bijlages

7.1 Onderzoeksinstrumenten

Op de komende pagina's zijn alle gebruikte onderzoeksinstrumenten te vinden.

1. De vragenlijst die de leerlingen hebben ingevuld
2. De vragenlijst die de docenten hebben ingevuld
3. De observatiepunten die zijn gebruikt bij het observeren van de werkplangesprekken
4. De observatiepunten die zijn gebruikt bij het observeren van de uitvoering van de experimenten
5. De observatiepunten die zijn gebruikt bij het doornemen van de verslagen
6. Het interviewschema dat is gebruikt bij de nabesprekingen met de docenten
7. Het interviewschema dat is gebruikt bij het afsluitende gesprek met de practicumleider

Vragenlijst Leerlingen

Naam: m / v
Leeftijd: 4havo / 5havo / 5vwo / 6vwo
School: Naam docent:
Profiel:

A. Voorafgaand aan de werkplanbespreking

A.1. Welke open proef ga je doen?

A.2. Heb je die zelf uitgekozen of heeft de docent jullie ingedeeld?

A.3. Is radioactiviteit/ioniserende straling al behandeld in de les?

Ja, alles behandeld

We zijn ermee bezig

Nee

A.4. Omcirkel de begrippen waarover je in de les hebt geleerd.

Halveringstijd

Halveringsdikte

α -, β -, γ - straling

Achtergrondstraling

Dosis

Intensiteit

Dracht

A.5. Hoe vaak heb je al een werkplan moeten schrijven? (Bij biologie, scheikunde en natuurkunde samen)

Nooit

1-3 keer

3-7 keer

Vaker

A.6. Hoe vaak heb je al een meetverslag moeten schrijven? (Bij biologie, scheikunde en natuurkunde samen)

Nooit

1-3 keer

3-7 keer

Vaker

A.7. Hoeveel tijd hebben jij en je partner in totaal besteed aan het schrijven van jullie werkplan?

A.8. Wat vond je moeilijk bij het opstellen van een werkplan?

A.9. Begrijp je wat je gaat onderzoeken?

A.10. Wat heb je geleerd bij het maken van je werkplan?

B. Na de werkplanbespreking

B.1. Moeten jullie nog veel veranderen aan jullie werkplan?

Niets

Een klein beetje

Redelijk veel

Bijna alles

B.2. Wat heb je geleerd bij de bespreking van je werkplan?

B.3. Hoe lang duurde de bespreking?

C. Na de practicumssessie

C.1. Welke gesloten experimenten heb je gedaan? Schrijf erachter hoe lang je hebt gedaan over het uitvoeren daarvan (dus tel de verwerking niet mee).

C.2. Had je al gesloten experimenten gedaan voor je met het open experiment begon? Zo ja, welke?

Nee

Ja, experiment ...

C.3. Wat vond je moeilijk bij het uitvoeren van de gesloten experimenten?

C.4. Wat vond je moeilijk bij het uitvoeren van de open proef (aan de hand van je eigen werkplan)?

C.5. Hadden jullie hulp nodig bij het uitvoeren van het open experiment? Zo ja, waarbij precies?

C.6. Wat heb je geleerd bij het uitvoeren van de gesloten experimenten?

C.7. Wat heb je geleerd van het uitvoeren van de open proef?

- C.8. Hoe lang waren jullie bezig met het uitvoeren van de open proef? (zonder verwerking)

D. Na de verslaglegging

- D.1. Hoe lang waren jullie bezig met het uitwerken van de meetresultaten van de open proef en het schrijven van het verslag?

- D.2. Hoelang was je bezig met het verwerken van de resultaten van de gesloten proeven?

- D.3. Hoe moeilijk vond je de verwerking van de resultaten van je open proef? Geef een cijfer tussen 1 en 5; een 1 voor heel makkelijk en 5 voor heel moeilijk.

- D.4. Had je het idee dat je genoeg voorkennis had voor het open experiment? Zo nee, licht toe wat je miste.

Ja	Nee
	Ik miste...

- D.5. Wat vond je moeilijk bij het verwerken van je gegevens van je open experiment en het schrijven van je verslag?

- D.6. Wat vond je moeilijk bij het verwerken van de gegevens van de gesloten proeven die je hebt gedaan?

- D.7. Wat heb je geleerd door de gesloten proeven die je hebt uitgevoerd?

- D.8. Wat heb je geleerd door de open proef?

- D.9. Wat vond je van de aanwijzingen bij de verwerking die op het werkblad stonden?

	Eens		Geen mening		Oneens
Duidelijk	O	O	O	O	O

Handig	☐	☐	☐	☐	☐
Overbodig	☐	☐	☐	☐	☐
Te weinig	☐	☐	☐	☐	☐

D.10. Wat vond je van de gesloten variant van het practicum?

	Totaal niet				Heel erg
Leerzaam	☐	☐	☐	☐	☐
Moeilijk	☐	☐	☐	☐	☐
Interessant	☐	☐	☐	☐	☐
Uitdagend	☐	☐	☐	☐	☐
Duidelijk	☐	☐	☐	☐	☐

D.11. Wat vond je van de open variant van het practicum?

	Totaal niet				Heel erg
Leerzaam	☐	☐	☐	☐	☐
Moeilijk	☐	☐	☐	☐	☐
Interessant	☐	☐	☐	☐	☐
Uitdagend	☐	☐	☐	☐	☐
Duidelijk	☐	☐	☐	☐	☐

D.12. Hoe zou jij het practicum het liefste zien? Alleen maar open proeven, alleen gesloten of een mix daartussen? En waarom?

D.13. Heb je nog opmerkingen of suggesties voor verbetering?

Je bent nu bij het einde van de vragenlijst. Maak nu één pakketje (door alles aan elkaar te nieten of door alles in een hoesje te doen) van de volgende dingen:

- Deze vragenlijst
- De vragenlijst van je partner
- (een kopie van) Jullie werkplan van voor de bespreking
- (een kopie van) Jullie werkplan van na de bespreking
- (een kopie van) Het verslag met de beoordeling van je leraar

Geef dit pakketje aan je docent of aan je TOA.

Heel erg bedankt voor je medewerking!

Vragenlijst Docent/TOA

Deze vragenlijst is opgesteld om de open variant van het ioniserende straling practicum te onderzoeken. De open variant is net opgezet en wordt nu op enkele scholen getest. Door naar uw ervaring en mening te luisteren kan de open variant van het practicum verbeterd worden. Ik hoop daarom dat u de tijd zult nemen om uw bevindingen te noteren op deze vragenlijst.

De vragenlijst bestaat uit drie delen: voorafgaand aan de werkplanbesprekingen, na de werkplanbesprekingen en na de verslaglegging. Het eerste deel van de vragenlijst mag u invullen voor u aan de besprekingen begint.

Het tweede deel over de werkplanbesprekingen mag u direct na de bespreking invullen.

Graag voor elke bespreking afzonderlijk, dus per tweetal een vragenlijst.

Het derde en laatste deel van de vragenlijst gaat over alle tweetallen samen, dus dit hoeft u maar één keer in te vullen.

Het is voor de verwerking van de vragenlijst belangrijk dat alle onderdelen van de vragenlijst bij elkaar blijven. Schrijf dus uw naam op elk deel van de vragenlijst.

Naam:

School:

A. Voorafgaand aan de werkplanbesprekingen

A.1. Hebt u al eerder deelgenomen aan het ISP?

Nee, Nooit 1-2 keer 3-5 keer Vaker

A.2. Ik ben

Docent TOA

A.3. Hoeveel experimenten voerden uw leerlingen toen uit?

... Experimenten in ... klokuren

A.4. Hoe telde het ISP toen mee?

Als handelingdeel Als cijfer Niet

Anders, namelijk..

A.5. Wat vindt u van de manier waarop het practicum tot nu toe gegeven wordt?
(Gesloten variant)

	Totaal niet				Heel erg
Leerzaam	☐	☐	☐	☐	☐
Tijdrovend	☐	☐	☐	☐	☐
Interessant	☐	☐	☐	☐	☐
Uitdagend	☐	☐	☐	☐	☐
Duidelijk	☐	☐	☐	☐	☐

A.6. Met welke klas(sen) doet u mee aan het onderzoek naar de open variant?

4HAVO

5HAVO

5VWO

6VWO

A.7. Wat verwacht u van de open variant van het practicum?

	Totaal niet				Heel erg
Leerzaam	☐	☐	☐	☐	☐
Tijdrovend	☐	☐	☐	☐	☐
Interessant	☐	☐	☐	☐	☐
Uitdagend	☐	☐	☐	☐	☐
Duidelijk	☐	☐	☐	☐	☐

A.8. Hoeveel werkplanbesprekingen gaat u doen?

... besprekingen

A.9. Bekijkt u de werkplannen van de leerlingen al voor het gesprek?

Ja

Nee

A.10. Hoeveel tijd hebt u in totaal besteed aan de voorbereiding van de werkplanbesprekingen?

Vragenlijst Docent/TOA

Uw naam:

Naam leerlingen:

Experiment:

B. Na de werkplanbesprekingen

Dit deel van de vragenlijst graag na elke bespreking afzonderlijk invullen, dus per tweetal.

B.1. Moest er nog veel veranderen aan het werkplan van de leerlingen?

Niets, helemaal goed

Een klein beetje

Redelijk veel

Bijna alles

B.2. Hebben de leerlingen gedacht aan:

	Nee	Een beetje	Ja
Veiligheid	☐	☐	☐
Achtergrondstraling	☐	☐	☐
Meetonzekerheid	☐	☐	☐
Verwerking meetgegevens	☐	☐	☐

B.3. Wat viel u verder op?

B.4. Hoe lang duurde deze werkplanbespreking?

Vragenlijst Docent/TOA

Naam:

C. Na de verslaglegging

C.1. Hoeveel tijd hebt u besteed aan het nakijken van de verslagen?

C.2. Wat vond u achteraf van de open variant van het practicum?

	Totaal niet				Heel erg
Leerzaam	☐	☐	☐	☐	☐
Tijdrovend	☐	☐	☐	☐	☐
Interessant	☐	☐	☐	☐	☐
Uitdagend	☐	☐	☐	☐	☐
Duidelijk	☐	☐	☐	☐	☐

C.6. Heeft u opmerkingen of suggesties voor verbetering? Daarbij kunt u denken aan het werkblad voor de leerlingen, de docentenhandleiding, etc.

Observatiepunten werkplanbeprekingen

1. Heeft de docent/TOA het werkplan al doorgenomen of bekijkt hij/zij het werkplan nu voor het eerst?
2. Heeft de docent/TOA aantekeningen of richtlijnen voor het gesprek bij zich?
3. Hebben de leerlingen aantekeningen of richtlijnen voor het gesprek bij zich?
4. Wordt het hele werkplan doorgenomen of alleen de punten die nog niet goed zijn?
5. Stellen de leerlingen vragen over dingen die ze nog niet begrepen?
6. Hoe gedraagt de docent/TOA zich? Zelfverzekerd, geïnteresseerd, streng..
7. Hoe gedragen de leerlingen zich?
8. Begrijpt de docent wat het doel van het experiment is?
9. Zijn de leerlingen in staat om hun onderzoeksvraag/hypothese/werkwijze mondeling toe te lichten?
10. Welke vragen stelt de docent? Welk antwoord geven de leerlingen?
11. Geeft de docent hints als dingen nog niet goed zijn of vertelt hij/zij hoe het moet?
12. Komt de veiligheid ter sprake? Hoe?
13. Komt de achtergrondstraling ter sprake? Hoe?
14. Komt de meetnauwkeurigheid ter sprake? Hoe?
15. Wordt er al nagedacht over de verwerking van de meetresultaten? (enkellogaritmisch papier?)
16. Wie heeft de leiding in het gesprek?
17. Zijn de twee leerlingen evenveel aan het woord?
18. Hoe lang duurt het gesprek?

Experiment afhankelijk

- Experiment 1. Dracht van α -deeltjes in lucht
 1. Hebben de leerlingen de achtergrondinformatie gelezen?
 2. Hoe ziet het I, d diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 3. Wat verwachten ze voor de dracht? Hoe lichten ze die verwachting toe?
 4. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 5. Tussen welke afstanden gaan de leerlingen meten? Welke stapgrootte kiezen ze?
- Experiment 2a. Radioactief verval van radon-220 (met stroommeter)
 1. Hoe ziet het I, t diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Wat verwachten ze voor de halveringstijd? Hoe lichten ze die verwachting toe?
 3. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 4. Wanneer starten ze de stopwatch? Om de hoeveel tijd willen ze I aflezen? Waarom?
Alternatief: tijd aflezen bij verschillende I .

- Experiment 4. Terugstrooiing van β -deeltjes
 1. Hoe ziet het I, Z diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 3. Hoe willen ze de nulmeting gaan doen?
 4. Op welke manier gaan ze het onbekende materiaal identificeren?
- Experiment 8. Kwadratenwet
 1. Hoe ziet het I, r diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 3. Hoe willen ze de nulmeting gaan doen?
 4. Tussen welke afstanden gaan de leerlingen meten? Welke stapgrootte kiezen ze?
- Experiment 12. Absorptie van γ -straling door lood
 1. Hoe ziet het I, d diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 3. Hoe willen ze de nulmeting gaan doen?
 4. Tussen welke afstanden gaan de leerlingen meten? Welke stapgrootte kiezen ze?
- Experiment 15. Ionisatie van lucht door röntgenstraling
 1. Hoe ziet het I, U diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 3. Tussen welke voltages gaan de leerlingen meten? Welke stapgrootte kiezen ze?
- Experiment 19. Dracht van α -deeltjes afhankelijk van de luchtdruk
 1. Hoe ziet het R, ρ diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Welke dracht verwachten de leerlingen bij normale luchtdruk?
 3. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 4. Tussen welke afstanden gaan de leerlingen meten? Welke stapgrootte kiezen ze?
- Experiment 20. Radioactief verval van protactinium-234
 1. Hoe ziet het I, t diagram eruit? Hoe lichten de leerlingen die verwachting toe?
 2. Welke halveringstijd verwachten de leerlingen?
 3. Hoe reageert de docent op deze verwachtingen?
 4. Hoe willen ze de nulmeting gaan doen?
 5. Welke tijdsintervallen kiezen ze?

Observatiepunten experiment

1. Is het het eerste experiment van de leerlingen?
2. Is de docent aanwezig?
3. Gaan ze meteen aan de slag of zijn ze twijfelachtig?
4. Wat is de taakverdeling van de leerlingen?
5. Wie vragen ze om hulp? (klasgenoten, docent, practicumleider)
6. Hoe druk is de practicumleider met het beantwoorden van vragen?
7. Op welk punt vragen ze om hulp?
8. Houden ze zich aan hun werkplan?
9. Hoe lang proberen de leerlingen dingen zelf op te lossen voordat ze om hulp vragen?
10. Begrijpen ze de apparatuur waar ze mee werken?
11. Hoe gaan ze om met de veiligheid en achtergrondstraling?
12. Maken de leerlingen al een voorlopige uitwerking? Hoe? (enkellogaritmisch papier?)
13. Vergelijken ze de uitkomst met hun hypothese?
14. Hoe lang duurt het experiment?

Experiment afhankelijk

- Experiment 1. Dracht van α -deeltjes in lucht
 - Gebruiken de leerlingen de achtergrondinformatie?
 - Hoe verklaren ze de toenemende stroom als functie van d bij kleine afstanden?
 - Komen ze op de goede uitkomst? ($R = 7.7cm$)
- Experiment 2a. Radioactief verval van radon-220 (met stroommeter)
 - Komen ze op de goede uitkomst? ($t_{\frac{1}{2}} = 50s$)
- Experiment 4. Terugstrooiing van β -deeltjes
 - Hoe doen ze de nulmeting?
 - Gaan ze goed om met het statistische karakter van de metingen?
 - Komen ze op de goede uitkomst? (I minder dan recht evenredig met Z)
- Experiment 8. Kwadratenwet
 - Hoe doen ze de nulmeting?
 - Gaan ze goed om met het statistische karakter van de metingen?
 - Komen ze op de goede uitkomst? (I met r^2)
- Experiment 12. Absorptie van γ -straling door lood
 - Hoe doen ze de nulmeting?
 - Komen ze op de goede uitkomst? ($d_{\frac{1}{2}} = 1.2cm$)
- Experiment 15. Ionisatie van lucht door röntgenstraling

- Komen ze op de goede uitkomst? ($I = 6.5 \cdot 10^{-9} A$)
- Experiment 19. Dracht van α -deeltjes afhankelijk van de luchtdruk
 - Komen ze op de goede uitkomst? (enkele centimeters, omgekeerd evenredig)
- Experiment 20. Radioactief verval van protactinium-234
 - Hoe doen ze de nulmeting?
 - Komen ze op de goede uitkomst? (80s)

Observatiepunten verslag

1. Hebben de leerlingen hun onderzoeksvraag en hypothese aangepast?
2. Is er een verklaring voor het wel/niet overeenkomende resultaat en hypothese?
3. Wordt de nulmeting toegelicht?
4. Hoe goed is de verwerking gedaan en toegelicht?
5. Wordt de nauwkeurigheid besproken?
6. Wordt de veiligheid genoemd?

Experiment afhankelijk

- Experiment 1. Dracht van α -deeltjes in lucht
 - Hoe verklaren ze de toename van I als functie van d voor kleine d ?
 - Wordt de gekozen stapgrootte toegelicht?
 - Beseffen de leerlingen dat de dracht per deeltje anders kan zijn?
 - Verklaren ze de resultaten mbv de vervalreeks?
 - Gebruiken de leerlingen de achtergrondinformatie?
- Experiment 2a. Radioactief verval van radon-220 (met stroommeter)
 - Begrijpen ze het gebruik van enkellogaritmisch papier?
- Experiment 4. Terugstrooiing van β -deeltjes
 - Hoe verklaren ze het afwijkende resultaat? (niet molybdeen)
- Experiment 8. Kwadratenwet
 - Lichten ze het gevonden verband toe met behulp van het plaatje op het werkblad?
 - Komen ze op de goede uitkomst? (I met r^2)
- Experiment 12. Absorptie van γ -straling door lood
 - Begrijpen ze het gebruik van enkellogaritmisch papier?
 - Doen ze de berekening voor water en aluminium goed? ($d_{\frac{1}{2}} = 5$ en $14cm$)
- Experiment 15. Ionisatie van lucht door röntgenstraling
 - Doen ze de berekening voor water en aluminium goed? (tempo $2.9 \cdot 10^{-5} C/kg$)
 - Geven ze een verklaring voor de bevinding dat de ionisatiestroom op een gegeven moment niet meer veranderd?
- Experiment 19. Dracht van α -deeltjes afhankelijk van de luchtdruk
 - Tonen ze het $1/\rho$ gedrag aan?
 - Berekenen ze de evenredigheidsconstante goed?
- Experiment 20. Radioactief verval van protactinium-234
 - Begrijpen ze het gebruik van enkellogaritmisch papier?

Interviewschema docent

1. Hoe vond u de informatie die u kreeg van het ISP over de onderstaande onderdelen?
(Bijvoorbeeld duidelijk, onduidelijk, volledig, onvolledig, overzichtelijk, onoverzichtelijk, etc.)
 - (a) Over het onderzoek dat aan deze pilot gekoppeld zit
 - (b) Over de open experimenten zelf
 - (c) Over wat er in de werkplannen moet staan
 - (d) Over wat we van u verwachten bij de werkplanbesprekingen
2. Had u het idee dat u voorkennis miste? (Bijvoorbeeld over het experiment, veiligheid, etc) Zo ja, hoe zou dat op te lossen zijn?
3. Miste u vaardigheden? (Bijvoorbeeld het bespreken van een werkplan) Zo ja, hoe zou dat op te lossen zijn?
4. Wat vond u van de hoeveelheid tijd die u in het open practicum moest steken? (Bijvoorbeeld: veel, weinig, de moeite waard, niet de moeite waard, etc)
5. Hoe denkt u dat het voor de leerlingen was? (Bijvoorbeeld te moeilijk, te makkelijk, leerzaam, etc)
6. Als het open practicum wordt aangeboden, zou u dan deelnemen?
 - (a) Waarom wel/niet
 - (b) Met welke klassen?
 - (c) Met iedereen/een aantal?
 - (d) Als handelingsdeel/examenonderdeel/bonus?
7. Wat zou u andere docenten/TOA's aanraden als de open variant wordt aangeboden?
8. Wat zou de organisatie van het ISP aanraden in de verdere ontwikkeling?

Interviewschema practicumleider

1. Wat verwachtte u van tevoren van het open practicum, vergeleken met gesloten?
 - (a) Tijd
 - (b) Motivatie leerlingen
 - (c) Het soort vragen dat de leerlingen stellen
2. Hebt u zich nog op een bepaalde manier voorbereid op de open experimenten? Hoe?
3. Kostte het u meer tijd om de leerlingen die de open proeven doen te begeleiden?
 - (a) Hoeveel meer?
 - (b) Vindt u dit teveel? De moeite waard?
 - (c) Hoe zou dat opgevangen kunnen worden? Bv docent/TOA, kleine groepen
4. Vielen u dingen op aan het gedrag van de leerlingen, die erop wezen dat de docent in de werkplangesprekken iets vergeten was?
5. Hoe gingen de leerlingen om met veiligheid?
6. Hoe denkt u dat het voor de leerlingen was?
 - (a) Goed te doen / te zwaar, omdat bv
 - i. Meer zelfstandigheid vereist
 - ii. Meer voorkennis vereist
 - iii. Meer begeleiding nodig
 - iv. Meer tijd nodig (welke fase?)
 - (b) Leerzaam
 - (c) Overbodig
7. Merkte u nog andere verschillen tussen open/gesloten?
 - (a) Interesse/Motivatie van leerlingen
 - (b) Het soort vragen dat de leerlingen stelden
8. Klopten uw verwachtingen?
9. Vindt u dat het open practicum moet worden aangeboden?
 - (a) Waarom wel/niet?
 - (b) Wat moet er nog anders?
 - i. Aantal open proeven
 - ii. Manier van aanbieden (werkplan, verslag, etc): Voorbereiding/Experiment/Verslaglegging
 - iii. Informatie voor de docent/leerlingen/practicumleider

7.2 Gebruikte documenten

Op de volgende pagina's zijn de door het ISP opgestelde documenten te vinden die in het onderzoek zijn gebruikt.

1. Het werkblad van experiment 8 dat in de gesloten vorm wordt gebruikt
2. De practicumhandleiding van experiment 8 zoals deze door de leerlingen is gebruikt bij de open experimenten
3. De practicumhandleiding van experiment 2A zoals deze door de leerlingen is gebruikt bij de open experimenten
4. Het introductiedocument voor docenten
5. Het docentenmateriaal met richtlijnen voor de werkplanbesprekingen

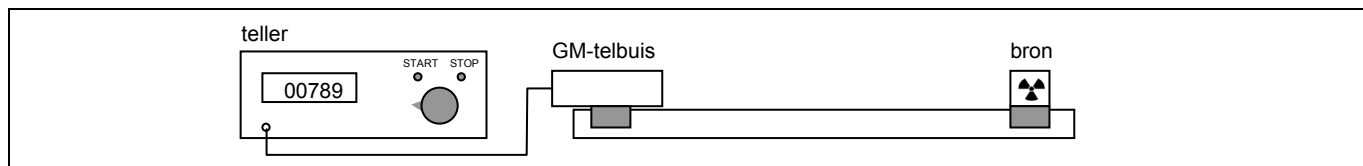
Kwadratenwet

Doel

Metten van het verband tussen de stralingsintensiteit en de afstand tot een puntvormige radioactieve bron.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met strontium-90 (^{90}Sr). De afstand tussen de telbuis en de bron is instelbaar.



Lees eerst de inleiding op pg. 10 van het oranje boekje *ISP Experimenten* over het verband tussen stralingsintensiteit en afstand.

Metingen

- 1 Meet drie keer de intensiteit I_b van de achtergrondstraling (in pulsen per 10 s) en noteer de meetresultaten in de tabel hieronder. Bereken hieruit de gemiddelde intensiteit $I_{b,gem}$ (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling. Noteer het resultaat in de tabel hieronder.

I_b (pulsen/10s)				$I_{b,gem}$ (pulsen/10s)	
--------------------	--	--	--	--------------------------	--

- 2 Haal het deksel van de bron, en zet de bron in de bronhouder van de opstelling.
- 3 Meet drie keer de stralingsintensiteit I (in pulsen per 10 s) bij een afstand r van 70 cm tussen bron en telbuis en noteer de meetresultaten in de tabel hieronder. Bereken hieruit de gemiddelde intensiteit I_{gem} (in pulsen per 10 s). Corrigeer ten slotte voor de achtergrondstraling: $I_{cor} = I_{gem} - I_{b,gem}$. Noteer de resultaten in de tabel hieronder.
- 4 Herhaal deze metingen en berekeningen bij de andere in de tabel genoemde afstanden tussen bron en telbuis.

r (m)	I (pulsen/10s)			I_{gem}	I_{cor}	$1/r^2$ (m $^{-2}$)
0,70						2,0
0,50						4,0
0,40						6,2
0,30						11,1
0,25						16,0
0,20						25,0

- 5 Haal de bron na het uitvoeren van de metingen uit de opstelling en doe het deksel er weer op.

Uitwerking

- 1 Maak een grafiek van je meetresultaten (I_{cor} als functie van de afstand r) op de achterkant van dit werkblad bij opdracht 3 links.
- 2 Leg met behulp van de bij opdracht 1 getekende ⁵⁸grafiek uit dat het verband tussen de (voor de

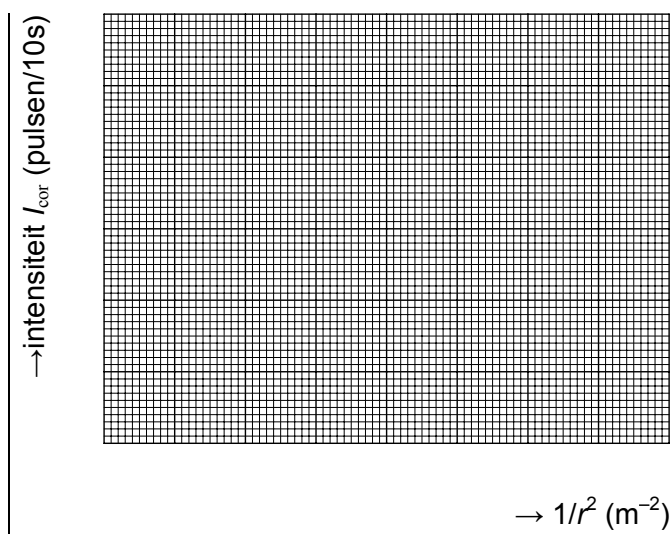
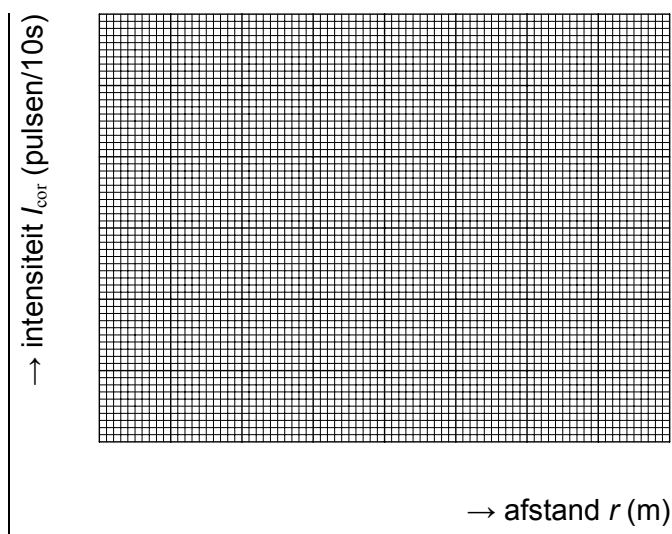
achtergrondstraling gecorrigeerde) stralingsintensiteit I en de afstand r tussen bron en telbuis waarschijnlijk *omgekeerd kwadratisch* is.

Uit opdracht 2 blijkt dat het verband tussen de stralingsintensiteit I en de afstand r waarschijnlijk omgekeerd kwadratisch is. In een formule:

$$I = \frac{c}{r^2} = c \cdot \frac{1}{r^2}$$

In deze formule is c een evenredigheidsconstante. Om te controleren of er inderdaad sprake is van een omgekeerd kwadratisch verband, zet je de stralingsintensiteit I in een diagram uit tegen $1/r^2$. De grafiek die je dan krijgt moet een rechte lijn door de oorsprong zijn, want volgens de formule hierboven is de stralingsintensiteit I recht evenredig met $1/r^2$.

- 3 Controleer of het verband tussen de stralingsintensiteit I en de afstand r omgekeerd kwadratisch is. Doe dat door hieronder rechts een grafiek te tekenen waarin je de (voor de achtergrondstraling gecorrigeerde) stralingsintensiteit I_{cor} uitzet tegen $1/r^2$. In de tabel met de meetresultaten op de andere kant van dit werkblad zijn de waarden van $1/r^2$ al voor je berekend.



- 4 Het gevonden verband tussen stralingsintensiteit en afstand wordt de *kwadratenwet* genoemd: de stralingsintensiteit I neemt kwadratisch af met de afstand r tussen bron en telbuis. Verklaar deze kwadratische afname met behulp van de tekening hieronder.

.....

.....

.....

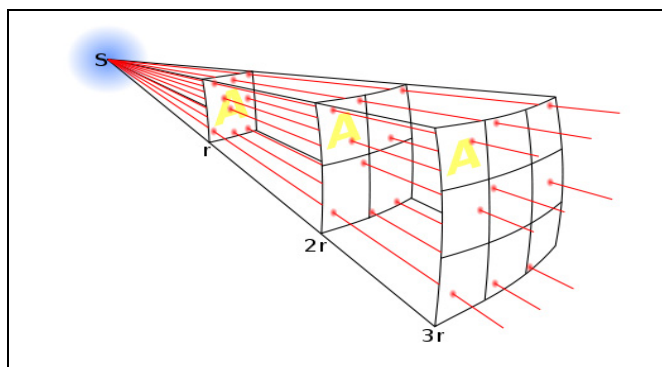
.....

.....

.....

.....

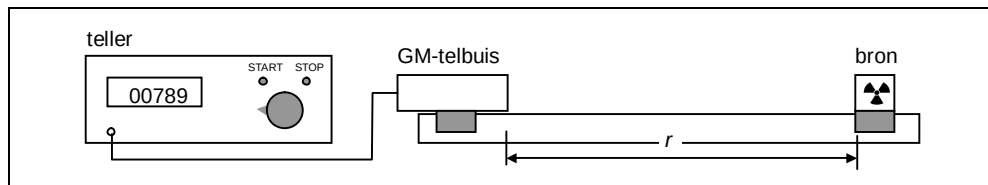
.....



- 5 Het gebruik van een pincet bij het hanteren van radioactief materiaal kan verstandig zijn. Als je een bron met een pincet van 12 cm lengte vastpakt in plaats van met je blote handen (waarbij de afstand tussen de bron en je handen ongeveer 0,5 mm is), is de afstand maal zo groot en is de stralingsbelasting voor je handen dus maal zo klein.

Experiment 8 Kwadratenwet

- Doel** Meten van het verband tussen de stralingsintensiteit en de afstand tot een puntvormige radioactieve bron.
- Meetopstelling** De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met strontium-90 (^{90}Sr). De pulsenteller is in te stellen op een meettijd van 10 s. De afstand tussen de telbuis en de bron is instelbaar.



Met de opstelling is de stralingsintensiteit I (in pulsen per 10 s) te meten als functie van de afstand r tussen de bron en de telbuis.

- Onderzoeksvraag** Formuleer een onderzoeksvraag die past bij het doel en de meetopstelling van dit experiment.
- Hypothese** Stel een hypothese op bij je onderzoeksvraag. Stel een beargumenteerde hypothese op over het verband tussen de stralingsintensiteit I en de afstand r tot de bron. Geef deze hypothese ook in de vorm van een schets van het verband tussen deze grootheden in een I, r -diagram.
- Meetplan** Maak een meetplan voor het experimenteel onderzoek met de gegeven meetopstelling. Geef in dat meetplan aan welke grootheden je op welke manier gaat variëren en meten om het wel of niet juist zijn van de opgestelde hypothese te kunnen controleren, en hoe je de metingen gaat corrigeren voor de achtergrondstraling. Geef in het meetplan ook aan of het uitvoeren van het experiment een bijdrage levert aan de stralingsbelasting tijdens het practicum, en zo ja: hoe je er dan voor zorgt dat die stralingsbelasting zo laag mogelijk blijft. Bespreek je onderzoeksvraag, de opgestelde hypothese en het bijbehorende meetplan met je docent of de TOA. Stel de hypothese en/of het meetplan zo nodig bij.
- Onderzoek** Voer het experimenteel onderzoek uit volgens je meetplan. Zorg daarbij voor voldoende stralingsbescherming.
- Verslag** Schrijf een verslag van dit onderzoek in de vorm van een *meetrapport*. In dat meetrapport staan je onderzoeksvraag, de opgestelde *hypothese*, de *meetresultaten* en de daaruit getrokken *conclusie* over het al dan niet juist zijn van die hypothese. Gebruik de onderstaande aanwijzingen voor het verwerken van de meetresultaten.

Aanwijzingen

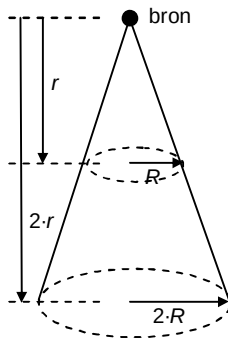
- Geef de meetresultaten in de vorm van een diagram.
- Uit het I, r -diagram met de meetresultaten blijkt dat het verband tussen de (voor de achtergrondstraling gecorrigeerde) stralingsintensiteit I en de afstand r tussen bron en telbuis waarschijnlijk *omgekeerd kwadratisch* is. In een formule:

$$I = \frac{c}{r^2} = c \cdot \frac{1}{r^2}$$

In deze formule is c een evenredigheidsconstante.

- > Leg uit hoe dit uit het I, r -diagram blijkt.
- > Controleer of er inderdaad sprake is van een omgekeerd kwadratisch verband door de (voor de achtergrondstraling gecorrigeerde) stralingsintensiteit I in een diagram uit te zetten tegen $1/r^2$.

- Het gevonden verband tussen stralingsintensiteit en afstand wordt de *kwadratenwet* genoemd: de stralingsintensiteit I neemt kwadratisch af met de afstand r tussen bron en telbuis.
- > Verklaar deze kwadratische afname met behulp van de tekening hieronder.



Experiment 2A

Radioactief verval van radon-220

Doel

Bepalen van de halveringstijd van het gasvormige radon-220.

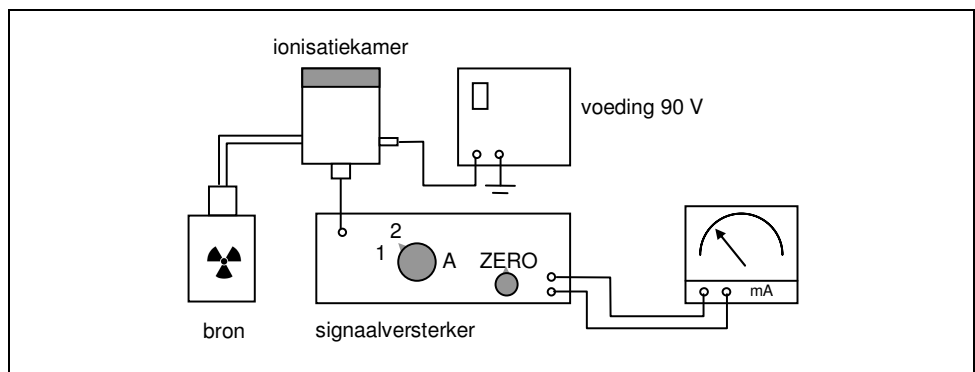
Meetopstelling

De opstelling bestaat uit een ionisatiekamer die via een slang verbonden is met een plastic flesje met thorium-232 (^{232}Th). In het flesje zit het gasvormige radon-220 (^{220}Rn): een vervalproduct van het ^{232}Th . Het radongas wordt in de ionisatiekamer gespoten. De door het radon uitgezonden α -straling ioniseert daar de lucht. De bij deze ionisaties gevormde lading is als een elektrische stroom via een signaalversterker te meten met een stroommeter. De gemeten stroomsterkte I op het tijdstip t is een maat voor het aantal radioactieve radonkernen N_t op dat moment. Want: hoe groter het aantal radioactieve kernen is, des te sterker is de ionisatie van de lucht en des te groter is de gemeten stroomsterkte.

Er is ook een stopwatch beschikbaar bij het experiment.

Voorafgaand aan het meten moet je de signaalversterker goed instellen: zet schakelaar A van de signaalversterker op stand 1 (de instelstand), regel met de knop 'set zero' de aanwijzing van de stroommeter af op $I = 0$ mA en zet daarna schakelaar A op stand 2 (de meetstand).

Je brengt het radongas op de volgende manier in de ionisatiekamer: open de slangklem op de slang tussen het plastic flesje en de ionisatiekamer, knijp een paar keer rustig in het plastic flesje tot de wijzer van de stroommeter voldoende uitslaat en sluit daarna de slangklem.



De halveringstijd $t_{1/2}$ van ^{220}Rn is te bepalen uit een meting van de ionisatiestroomsterkte I als functie van de tijd t .

Onderzoeksvraag Formuleer een onderzoeksvraag die past bij het doel en de meetopstelling van dit experiment.

Hypothese

Stel een hypothese op bij je onderzoeksvraag.

Stel een beargumenteerde hypothese op over het verband tussen de ionisatiestroomsterkte I en de tijd t . Geef deze hypothese ook in de vorm van een schets van het verband tussen deze grootheden in een I, t -diagram.

Stel ook een hypothese op over de grootte-orde van de halveringstijd $t_{1/2}$ van ^{220}Rn .

Meetplan

Maak een meetplan voor het experimenteel onderzoek met de gegeven meetopstelling.

Geef in dat meetplan aan welke grootheden je op welke manier gaat variëren en meten om het wel of niet juist zijn van de opgestelde hypothesen te kunnen controleren.

Geef in het meetplan ook aan of het uitvoeren van het experiment een bijdrage levert aan de stralingsbelasting tijdens het practicum, en zo ja: hoe je er dan voor zorgt dat die stralingsbelasting zo laag mogelijk blijft.

Bespreek je onderzoeksvraag, de opgestelde hypothesen en het bijbehorende meetplan met je docent of de TOA. Stel de onderzoeksvraag, de hypothesen en/of het meetplan zo nodig bij.

Onderzoek	Voer het experimenteel onderzoek uit volgens je meetplan. Zorg daarbij voor voldoende stralingsbescherming.
Verslag	Schrijf een verslag van dit onderzoek in de vorm van een <i>meetrapport</i>. In dat meetrapport staan de <i>onderzoeksvraag</i>, de opgestelde <i>hypothesen</i>, de <i>meetresultaten</i> en de daaruit getrokken <i>conclusies</i> over het al dan niet juist zijn van die hypothesen. Gebruik de onderstaande aanwijzingen voor het verwerken van de meetresultaten. Aanwijzingen • Geef de meetresultaten in de vorm van een diagram. • In het oranje boekje <i>ISP Experimenten</i> staat op bladzijde 29-30 informatie over het zo nauwkeurig mogelijk bepalen van grootheden uit een grafiek op enkellogaritmisch grafiekpapier. > Vergelijk de nauwkeurigheid van het bepalen van de halveringstijd $t_{1/2}$ van ^{220}Rn uit je meetresultaten in een grafiek op normaal en op enkellogaritmisch grafiekpapier.

Practicumontwikkeling en -onderzoek: Open variant van het stralingspracticum

Uit een onderzoek onder docenten/gebruikers van het ISP is gebleken dat er – naast de huidige gesloten uitvoeringsvariant van het practicum – behoefte bestaat aan een meer open uitvoeringsvariant.

Deze meer open uitvoeringsvariant van het practicum is nog in ontwikkeling en wordt op dit moment getest door Rob van Rijn – een van de drie practicumleiders van het ISP – met ondersteuning van Enja Blasse in het kader van haar bacheloronderzoek aan de Universiteit Utrecht.

Karakter – Bij deze meer open uitvoeringsvariant wordt gewerkt met dezelfde opstellingen als in de gangbare gesloten variant. Bij de uitvoering van het practicum in de meer open variant worden de meetopstellingen door de practicumleider ook op de gangbare manier voor de leerlingen klaargezet, zij het dan zonder de werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant worden gebruikt. Het is gebleken dat het door de leerlingen zelf bij elkaar laten zoeken van de benodigde apparatuur voor de door hen gekozen experimenten tot een onproductieve chaos leidt. Bij deze meer open uitvoeringsvariant houden het doel van en de meetopstelling bij elk van de experimenten dus hun gesloten karakter – beide blijven ‘gegeven’. Het verschil tussen de gesloten en de meer open uitvoeringsvariant zit in de manier waarop de leerlingen zich op het practicum voorbereiden en het daardoor vervallen van de gedetailleerde instructies voor het uitvoeren van de metingen en het uitwerken van de meetresultaten op de werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant worden gebruikt.

Test

Bij de standaard-uitvoering van het stralingspracticum voeren de leerlingen in een practicumsessie van twee uur vier gesloten experimenten uit. In het kader van de test van de meer open variant doen de leerlingen één open experiment, afgewisseld met gesloten experimenten. Het doel van de test is om onder andere na te gaan hoeveel tijd de leerlingen voor de uitvoering van een open experiment nodig hebben, tegen welke problemen ze daarbij aanlopen en hoe ze de verschillende uitvoeringsvarianten waarderen. Daarnaast is het voor ons natuurlijk ook van belang om te weten welke consequenties de meer open variant van het stralingspracticum heeft voor de docent en/of TOA, voordat wij deze variant als keuzemogelijkheid in ons aanbod gaan opnemen.

Niet alle ISP experimenten worden in deze fase getest. Er is een select aantal experimenten geselecteerd die door de leerlingen kunnen worden uitgevoerd in de open variant. De experimenten die nu getest worden zijn:

1. Dracht van α -deeltjes in lucht
- 2a. Radioactief verval van radon-220
4. Terugstrooiing van β -deeltjes
8. Kwadratenwet
12. Absorptie van γ -straling door lood
15. Ionisatie van lucht door röntgenstraling
19. Dracht van α -deeltjes afhankelijk van de luchtdruk
20. Radioactief verval van protactinium-234

Om de tijdsinvestering voor docenten, TOA's en practicumbegeleiders te beperken is ervoor gekozen om per klas vier tweetallen deel te laten nemen aan het open practicum. Als u de voorkeur geeft aan een andere hoeveelheid kan dat worden besproken. We willen de reactie op het open practicum graag bij verschillende leerlingen bekijken, dus let u er alstublieft op dat u de tweetallen op zo'n manier kiest dat het een gevarieerde groep is. (Denk hierbij aan jongens/meisjes, leerlingen met hoge/lage cijfers, leerlingen met veel/weinig interesse in practicum).

Bij het huidige practicum krijgen de leerlingen en de docenten zelf de kans om experimenten te kiezen en te verdelen. In deze testfase van de open variant van het practicum is dat echter niet het geval; de docent krijgt voor elke deelnemende klas een viertal experimenten toegewezen. De keuze voor gesloten experimenten blijft wel volledig vrij.

De practicumsessie voor de vier tweetallen die deelnemen aan de test verloopt iets anders dan de sessie voor de andere leerlingen. De practicumsessie wordt in tweeën verdeeld: de eerste helft van de sessie voeren twee tweetallen hun experiment uit, de tweede helft van de sessie zijn de andere twee tweetallen aan de beurt. Op deze manier is er voor het open experiment tweemaal zoveel tijd beschikbaar dan voor de gesloten experimenten. Dit is nodig omdat er nog niet bekend is hoeveel tijd de leerlingen nodig hebben voor de uitvoering van het open experiment. Het zou ook kunnen dat de leerlingen al heel snel klaar zijn en ruimte overhouden voor nog een gesloten experiment.

Voorbereiding – Afhankelijk van de hoeveelheid tweetallen die deelneemt aan het open practicum, zult u van ons een aantal practicumhandleidingen ontvangen om aan de leerlingen uit te delen. Deze practicumhandleidingen hebben dus een meer open karakter dan de werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant worden gebruikt.

De practicumhandleiding bij elk van de experimenten geeft het doel van het experiment en de beschikbare meetopstelling. Daarna wordt de leerlingen gevraagd om zelf – zij het met enige sturing – een passende onderzoeksvraag (of onderzoeksvragen) te bedenken, hypothese(n) te formuleren en het bijbehorende meetplan voor de uitvoering van het experiment op te stellen. De leerlingen leggen het resultaat van deze voorbereiding voor aan de docent of TOA, die het beoordeelt en de eventueel noodzakelijke bijstellingen met de leerlingen bespreekt. Hiermee is de voorbereiding van de leerlingen op het practicum afgerond en kunnen ze (enkele dagen later) met de uitvoering beginnen. Bij deze besprekingen tussen docent/TOA en leerlingen zal Enja Blasse aanwezig zijn.

In vergelijking met de gangbare gesloten variant van het practicum vraagt deze meer open variant tijdens de voorbereiding op het practicum een duidelijk grotere tijdsinvestering van de docent of TOA: de door de leerlingen opgestelde onderzoeksvraag(vragen), hypothese(n) en het bijbehorende meetplan moeten worden beoordeeld en besproken. Als dit niet of onvoldoende gebeurt, zullen tijdens de uitvoering van het practicum problemen ontstaan met leerlingen 'die niet weten wat ze nu eigenlijk moeten doen'.

In het kader van de beoordeling en bespreking van de door de leerlingen ingeleverde hypothesen en meetplannen is mogelijk nog een tweede, zij het eenmalige tijdsinvestering nodig: het ontwikkelen van een duidelijk beeld van het doel en de mogelijke uitvoering van elk van de experimenten. Een dergelijke voorbereiding is nodig om met name het meetplan van de leerlingen te kunnen beoordelen op uitvoerbaarheid en volledigheid. Deze voorbereiding kan plaatsvinden met behulp van enkele aanwijzingen per experiment uit het bijbehorende *docentenmateriaal*.

Bij de begeleiding van de leerlingen in deze voorbereidingsfase moet worden bedacht dat de door hen opgestelde hypothese niet of niet volledig juist hoeft te zijn. Als de opgestelde hypothese door hen maar enigszins beargumenteerd kan worden is het goed. In een latere fase – bij de afronding – blijkt dan wel in hoeverre de opgestelde hypothese en de meetresultaten van elkaar verschillen en wat daarvoor de verklaring is.

Uitvoering – In de practicumhandleiding staat niet veel meer dan dat leerlingen het experiment volgens hun eigen, eventueel na bespreking met de docent of TOA bijgestelde meetplan moeten uitvoeren. Natuurlijk kunnen ze daarbij wel om assistentie van de ISP-practicumleider vragen.

In vergelijking met de gangbare gesloten variant van het practicum vraagt deze meer open variant een duidelijk grotere investering van de docent of TOA in de begeleiding van de leerlingen: de door de leerlingen verkregen meetresultaten zijn minder makkelijk en minder snel te controleren door het ontbreken van standaardtabellen en -diagrammen zoals op de werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant worden gebruikt.

Afronding – Het laatste onderdeel van het werkblad vraagt bij elk experiment om een verslag in de vorm van een meetrapport. Dit vormt een logische afronding van deze meer open variant van het practicum: er zijn nu immers geen ingevulde werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant als een vorm van verslag kunnen dienen. Tijdens de uitvoering van het practicum hebben de leerlingen geen tijd om deze meetrapporten te schrijven, dus dat zal achteraf moeten gebeuren. Waar nodig – afhankelijk van de theorie achter het experiment – geeft de practicumhandleiding enkele aanwijzingen voor het verwerken en verklaren van de meetresultaten.

In vergelijking met de gangbare gesloten variant van het practicum vraagt deze meer open variant ook tijdens de afronding van het practicum een duidelijk grotere tijdsinvestering van de docent of TOA: de door de leerlingen geschreven meetrapporten moeten worden beoordeeld en eventueel besproken. In die beoordeling kan overigens ook het werk van de leerlingen uit de voorbereidingsfase worden meegenomen.

Test

Voor deze test en de daarop volgende verdere ontwikkeling van de meer open variant van het stralingspracticum is het van belang dat wij voor het door de leerlingen uitgevoerde open experiment kunnen beschikken over het volgende:

- De door de leerlingen bij de voorbereiding opgestelde onderzoeksvraag, hypothese en hun bijbehorende meetplan
- Het door de leerlingen bij de uitvoering gebruikte, naar aanleiding van uw commentaar al dan niet bijgestelde meetplan.
- Het door de leerlingen gemaakte practicumverslag in de vorm van een meetrapport.

Daarnaast krijgen de leerlingen en de docent/TOA een vragenlijst, waar zij na afloop van elke fase (voorbereiding, werkplangesprek, experiment, verslaglegging) een aantal vragen op moeten beantwoorden. Naar aanleiding van deze vragenlijst vindt met de TOA/docent eventueel een gesprek plaats na de werkplanbespreking, en na afronding van het practicum.

Aanwijzingen bij de werkplanbesprekingen

Dit docentenmateriaal bij de meer open variant van het straling practicum geeft per experiment enkele aanwijzingen voor het bespreken van de door de leerlingen opgestelde onderzoeksvraag(en), hypothese(n) en het bijbehorende meetplan.

Algemeen

Veiligheid

In de practicumhandleiding wordt de leerlingen gevraagd in het meetplan aan te geven of het uitvoeren van het experiment een bijdrage levert aan de stralingsbelasting tijdens het practicum en hoe ze ervoor gaan zorgen dat die stralingsbelasting zo laag mogelijk blijft. De eerste vraag is in zijn algemeenheid met ja te beantwoorden. Bij het antwoord op de tweede vraag gaat het in zijn algemeenheid om blootstellingstijd beperken, bron afschermen en afstand houden. Meer concreet: als de radioactieve bron niet nodig is voor het doen van metingen (blootstellingstijd beperken), staat deze – als dat mogelijk is – buiten de meetopstelling met het deksel erop (afschermen) op een afstand van ongeveer 1 m (afstand houden). Voor experimenten met een röntgentoestel ligt dit wat eenvoudiger: als de röntgenbuis niet nodig is voor het doen van metingen, staat deze uit.

Achtergrondstraling

Door de aanwezige achtergrondstraling zal niet iedere meting van een radioactief deeltje afkomstig zijn van de bron die de leerlingen onderzoeken. De extra deeltjes veroorzaken een afwijking in de resultaten, en beïnvloeden daarmee de berekening van grootheden als halveringstijd en halveringsdikte. Bij experiment 4, 8, 12 en 20 is het daarom nodig om een nulmeting uit te voeren en de resultaten te corrigeren voor de achtergrondstraling. De leerlingen moeten zelf bedenken hoe deze meting gedaan moet worden.

Statistisch karakter

Wanneer de stralingsintensiteit wordt gemeten moet rekening worden gehouden met het statistisch karakter. Radioactief verval wordt veroorzaakt door een kansproces, en is daarom niet regelmatig. De leerlingen moeten hier rekening mee houden door voldoende grote tijdsintervallen te kiezen, of een aantal kleinere tijdsintervallen te middelen. Dit is ook belangrijk bij het doen van de nulmeting.

Onderzoeksvraag en hypothesen

Hieronder staat per experiment uitgesplitst wat belangrijke aandachtspunten zijn bij het bespreken van de onderzoeksvraag, hypothesen en het meetplan. Bij de hypothese staat vermeldt wat de uitkomst van het experiment zal zijn. Indien leerlingen een andere hypothese stellen maar deze wel kunnen beargumenteren is dat natuurlijk ook goed.

Experiment 1

Onderzoeksvraag
Hypothesen

Meetplan

Opmerkingen

Dracht van α -deeltjes in lucht

- Wat is de dracht van α -deeltjes in lucht?
- De ionisatiestroomsterkte I zal eerst ruwweg gelijk blijven bij toenemende afstand d tussen bron en ionisatiekamer, en bij een bepaalde afstand snel afnemen tot nul.
- De grootte-orde van de dracht R van α -deeltjes in lucht is enkele cm.
- Afstand d tussen bron en ionisatiekamer zo groot mogelijk maken en signaalversterker afregelen op een stroomsterkte van 0 A.
- Afstand d tussen bron en ionisatiekamer zo klein mogelijk maken (2,5 cm). Afstand d in kleine stappen (gezien de grootte van de te verwachten dracht) van bijvoorbeeld 0,5 cm groter maken en bij elk van de ingestelde afstanden de ionisatiestroomsterkte I aflezen.
- De stroommeter geeft de ionisatiestroomsterkte I in 10^{-11} A.
- Dracht α -deeltjes van ^{226}Ra in lucht: $R = 7,7$ cm (voor de meest energetische α -deeltjes).
- De leerlingen kunnen de achtergrondinformatie van dit experiment gebruiken (te vinden op de website van het ISP) voor hun hypothesen, werkplan en verwerking.

Experiment 2A

Onderzoeksvraag
Hypothesen

Radioactief verval van radon-220 (met stroommeter)

- Wat is de halveringstijd van radon-220?
- De ionisatiestroomsterkte I zal exponentieel afnemen in de loop van de tijd t .
- De grootte-orde van de halveringstijd $t_{1/2}$ van ^{220}Rn is 54,5 s (zie Binas).

Meetplan	• Signaalversterker afregelen op stroomsterkte van 0 mA zonder radon in de ionisatiekamer (zie practicumhandleiding). • Radon in de ionisatiekamer brengen (zie practicumhandleiding) tot de stroommeter net iets meer dan maximaal uitslaat. Stopwatch starten bij maximale uitslag van de stroommeter en (gezien de grootte van de te verwachten halveringstijd) elke 20 of 30 s de ionisatiestroomsterkte / aflezen. Alternatief: De tijd aflezen bij een aantal waarden van de ionisatiestroomsterkte (bijvoorbeeld 6, 5, 4 enzovoort mA).
Opmerkingen	• Gemeten halveringstijd ruwweg 50 s (afwijking 10%).
Experiment 4	Terugstrooiing van β-deeltjes
Onderzoeksvraag	• Wat is het verband tussen het aantal teruggestrooide β-deeltjes en het atoomnummer van het materiaal dat voor verstrooiing zorgt? Met welk onbekend materiaal hebben we te maken? (over de laatste vraag hoeft geen hypothese te worden opgesteld)
Hypothesen	• De intensiteit / van de teruggestrooide β-straling neemt toe met het atoomnummer Z van het materiaal dat voor verstrooiing zorgt: hoe groter de lading van de kern is, des te groter is de kans op terugstrooiing.
Meetplan	• Zonder verstrooiplaat in de opstelling minstens 3x de intensiteit I_0 (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling meten en gemiddelde berekenen. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). • Minstens 3x de intensiteit / (in pulsen per 10 s) van de verstrooide β-straling meten voor elk van de verstrooiplaten in de opstelling, per verstrooiplaat de gemiddelde intensiteit berekenen en corrigeren voor de gemiddelde intensiteit van de achtergrondstraling. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). Aandachtspunt: voor correctie voor de achtergrondstraling moet de meettijd bij meting van I_0 en / hetzelfde zijn, of de metingen moeten eerst worden omgerekend naar pulsen per s).
Opmerkingen	• Atoomnummers van de gebruikte verstrooiingsmaterialen opzoeken (zie Binas). • Het statistisch proces van verstrooiing veroorzaakt een grote onzekerheid in de meetwaarden, waardoor het verband tussen intensiteit / en atoomnummer Z niet nauwkeurig te tekenen is. Wel is duidelijk te zien dat de intensiteit van de teruggestrooide β-straling minder dan recht evenredig toeneemt met het atoomnummer. • Het onbekende materiaal is molybdeen. Het resultaat dat de leerlingen vinden zal daarmee veelal niet overeenkomen door de meetonzekerheid.
Experiment 8	Kwadratenwet
Onderzoeksvraag	• Wat is het verband tussen de stralingsintensiteit / en de afstand r tot de bron?
Hypothesen	• De stralingsintensiteit / neemt af bij toenemende afstand r tot de bron. Het verband tussen deze grootheden is omgekeerd kwadratisch (zie de aanwijzingen in de practicumhandleiding bij dit experiment).
Meetplan	• Zonder bron in de opstelling minstens 3x de intensiteit I_0 (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling meten en gemiddelde berekenen. Alternatief: 1x de intensiteit meten bij een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). • Minstens 3x de stralingsintensiteit / (in pulsen per 10 s) meten bij toenemende afstand r tot de bron (bijvoorbeeld in stappen van 10 cm), per afstand gemiddelde berekenen en corrigeren voor de gemiddelde intensiteit I_0 van de achtergrondstraling. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). Aandachtspunt: voor correctie voor de achtergrondstraling moet de meettijd bij meting van I_0 en / hetzelfde zijn, of de metingen moeten eerst worden omgerekend naar pulsen per s).
Opmerkingen	• De grafiek van / tegen $1/r^2$ is een stijgende rechte lijn door het nulpunt. • Op een 2x zo grote afstand r tot de bron is het oppervlak waarover de straling zich heeft verspreid 4x zo groot (want de straal R van het cirkeloppervlak is 2x zo groot). De stralingsintensiteit / is dan dus 4x (of 2^2x) zo klein. Meer algemeen: afstand nx zo groot, dan stralingsintensiteit n^2x zo klein. De stralingsintensiteit / neemt dus kwadratisch af met de afstand r tot de bron.
Experiment 12	Absorptie van γ-straling door lood
Onderzoeksvraag	• Wat is het verband tussen de dikte van het absorberende materiaal en de intensiteit van de doorgelaten straling? Wat is de halveringsdikte van lood?
Hypothesen	• De intensiteit / van de doorgelaten neemt exponentieel af met de dikte d van het absorberende materiaal.
Meetplan	• Zonder bron in de opstelling minstens 3x de intensiteit I_0 (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling meten en gemiddelde berekenen. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). • De intensiteit / (in pulsen per 10 s) van de doorgelaten straling meten bij toenemende

	dikte d van het absorberende materiaal. Bijbehorende (gegeven) absorberdiktes noteren (en eventueel door meting controleren). Varianten: 3x de intensiteit meten (in pulsen per 10 s) en gemiddelde berekenen, of 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). Aandachtspunt: voor correctie voor de achtergrondstraling moet de meettijd bij meting van I_0 en I hetzelfde zijn, of de metingen moeten eerst worden omgerekend naar pulsen per s).
Opmerkingen	- Gemeten halveringsdikte $d_{1/2}$ van lood voor γ-straling uit ^{60}Co: 1,2 cm. - Berekende halveringsdikte van aluminium en water (met $d_{1/2} = c/p$): 5,0 en 14 cm.
Experiment 15	Ionisatie van lucht door röntgenstraling
Onderzoeksvraag	Wat is het verband tussen de ionisatiestroom I en de spanning U over twee condensatorplaten waar röntgenstraling tussendoor valt? Wat is het exposietempo van de röntgenbuis?
Hypothesen	De ionisatiestroomsterkte I neemt geleidelijk steeds langzamer toe met de spanning U tot een constante waarde is bereikt: de verzadigingsstroomsterkte.
Meetplan	- Versterker afregelen op stroomsterkte 0 A bij spanning 0 V. - Ionisatiestroomsterkte I meten bij toenemende spanning U (in stappen van bijvoorbeeld 50 V). NB: Spanning maximaal 800 V.
Opmerkingen	- De stroommeter geeft de ionisatiestroomsterkte I in 10^{-9} A. - De verzadigingsstroomsterkte hangt van verschillende dingen af: de luchtvochtigheid, de precieze plaats van de condensatorplaten tov elkaar en tov de röntgenbuis. De waarnemingen van de leerlingen kunnen dus afwijken van de onderstaande waarden, maar zullen we dezelfde orde van grootte moeten hebben. - Gemeten verzadigingsstroomsterkte: $6,5 \cdot 10^{-9}$ A. Per seconde gevormde lading: $6,5 \cdot 10^{-9}$ C/s. Expositie: $2,9 \cdot 10^{-5}$ C/kg. Exposietempo: $2,9 \cdot 10^{-5}$ C/kgs. - Equivalent dose: 1 mSv. Dus expositie: $2,5 \cdot 10^{-5}$ C/kg. Inschakeltijd (uit expositie/expositietempo): 0,86 s.
Experiment 19	Dracht van α-deeltjes afhankelijk van de luchtdruk
Onderzoeksvraag	Wat is het verband tussen de dracht van α-deeltjes en de luchtdruk?
Hypothesen	- De dracht R van α-deeltjes in lucht zal toenemen bij afnemende luchtdruk p. - De grootte-orde van de dracht R van α-deeltjes in lucht is enkele cm.
Meetplan	Dracht R variëren (vanaf 3,0 cm in stappen van bijvoorbeeld 0,5 cm), bij elke ingestelde waarde van de dracht lucht wegpompen tot de teller begint te tellen en dan de luchtdruk aflezen.
Opmerkingen	- De grafiek van R tegen $1/p$ is een stijgende rechte lijn door het nulpunt. Evenredigheidsconstante: $c = 2,1 \cdot 10^3$ m·Pa. - Dracht R van α-deeltjes bij een luchtdruk gelijk aan de normale druk van de buitenlucht ($1,0 \cdot 10^5$ Pa): $R = 2,1$ cm.
Experiment 20	Radioactief verval van protactinium-234
Onderzoeksvraag	Wat is de halveringstijd van protactinium-234?
Hypothesen	- De intensiteit I van de uitgezonden straling neemt exponentieel af in de tijd t. - De grootte-orde van de halveringstijd $t_{1/2}$ van ^{234}Pa is 68 s (zie Binus).
Meetplan	- Zonder bron in de opstelling minstens 3x de intensiteit I_0 (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling meten en gemiddelde berekenen. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). - De stralingsintensiteit I (in pulsen per 10 s) meten in tijdstappen van bijvoorbeeld 20 of 30 s (gezien de grootte van de te verwachten halveringstijd) en corrigeren voor de gemiddelde intensiteit I_0 van de achtergrondstraling. Aandachtspunt: voor correctie voor de achtergrondstraling moet de meettijd bij meting van I_0 en I hetzelfde zijn, of de metingen moeten eerst worden omgerekend naar pulsen per s).
Opmerkingen	Gemeten halveringstijd ruwweg 80 s.

7.3 Werkplannen en verslagen

Op de komende pagina's zijn twee werkplannen en verslagen van deelnemende leerlingen te zien, zoals zij deze hadden opgesteld voor de werkplanbesprekingen. De aanpassingen die aan deze werkplannen moesten worden gedaan worden hieronder beschreven.

1. Een door leerlingen opgesteld werkplan voor experiment 8
2. Een door leerlingen opgesteld werkplan voor experiment 2A
3. Het verslag dat deze leerlingen hebben geschreven over experiment 8
4. Het verslag dat deze leerlingen hebben geschreven over experiment 2A

Na de werkplanbespreking hebben de leerlingen van experiment 2A twee dingen aangepast. Het I, t diagram hebben ze van een rechte lijn veranderd in een hyperbool, en ze hebben aan hun werkplan toegevoegd dat ze de gegevens in Coach gingen verwerken. De leerlingen van experiment 8 hebben na de werkplanbespreking aan hun verslag toegevoegd dat er een nulmeting moest worden uitgevoerd.

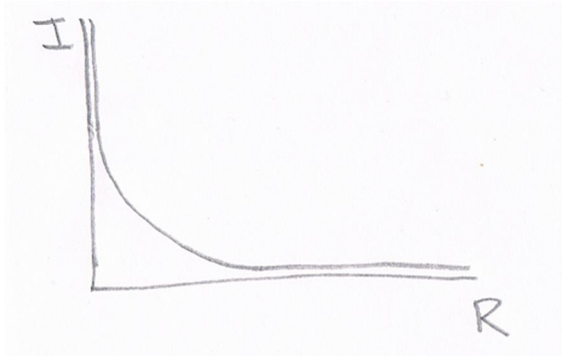
Werkplan bij ISP experiment 8 – Kwadratenwet

Onderzoeksvraag

Wat is het verband tussen de stralingsintensiteit en de afstand tot de bron?

Hypothese

Dit is een omgekeerd kwadratisch verband



Meetplan

- Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en bron van Strontium-90.
- Afstand (R) is verstelbaar. We gaan R variëren.
- We voeren ook een meting zonder bron uit voor de achtergrondstraling.
- We werken met zwakke afgeschermd radioactieve bronnen. Zorg voor
- voldoende afstand, voldoende afscherming en beperken van de tijd dat
- de radioactieve bron in gebruik is.
- Het bepalen van de meettijd
- Het bepalen van de gebruikte afstanden
- Het verrichten van de metingen
- Resultaten invoeren in coach
- Proberen met functiefit de hypothese te onderbouwen
- Het trekken van de conclusie

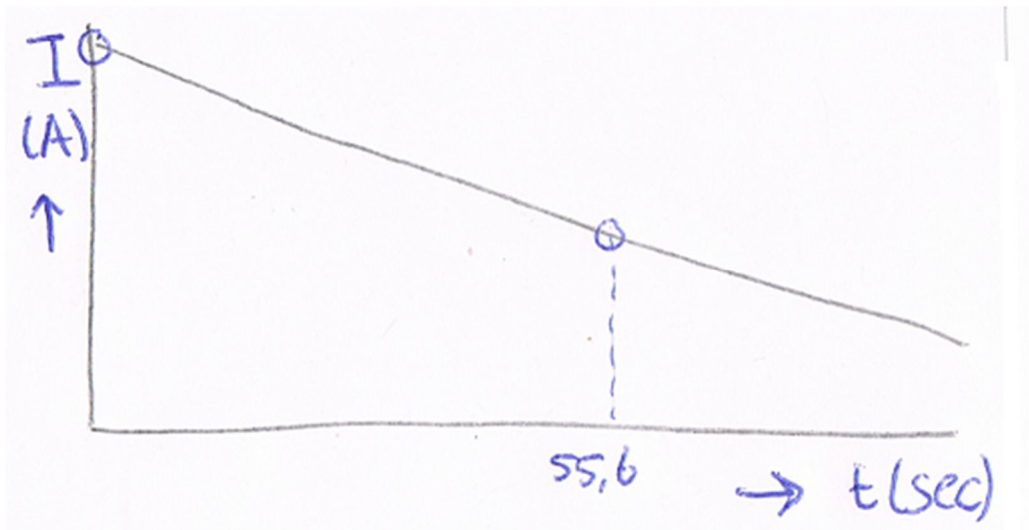
Werkplan bij ISP experiment 2A Radioactief verval van Radon-220

Onderzoeksvraag

Wat is de halveringstijd van het gasvormige radon-220?

Hypothese

Uit de BINAS hebben wij vernomen dat de halveringstijd van Rn-220: 55,6s. Dus wij verwachten dat na ongeveer 55 sec. de stroomsterkte is gehalveerd ten opzichte van de begin stroomsterkte.



Meetplan

- Schakelaar A (v.d. signaalversterker) op stand 1
- Stel de stroommeter af op $I=0$ mA
- Schakelaar A (v.d. signaalversterker) op stand 2
- Open de slangklep en knijp er een paar x in.
- Sluit de slangklep en start de stopwatch.
- Lees om de 5.0 sec het aantal mA af.
- Voer dit experiment een aantal keer uit en variër de hoeveelheid radongas (door een verschillend aantal keer in het flesje te knijpen)

Verslag bij ISP experiment 8 – Kwadratenwet

Achtergrondstraling

1 45 deeltjes

2 27 deeltjes

3 33 deeltjes

4 34

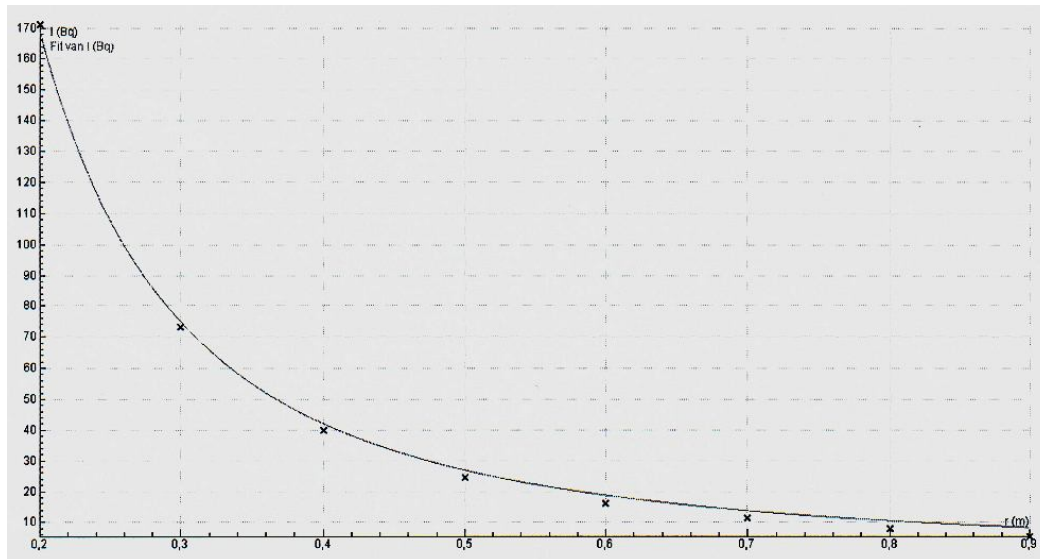
5 29

Gem = 33,6

Per minuut = $33,6/60=0,56$

3 minuten

Meting	R	Aantal deeltjes	I (Bq)
1	90	1076	5,791
2	80	1536	8,347
3	70	2155	11,79
4	60	2983	16,39
5	50	4522	24,93
6	40	7268	40,19
7	30	13294	73,67
8	20	30905	171,51

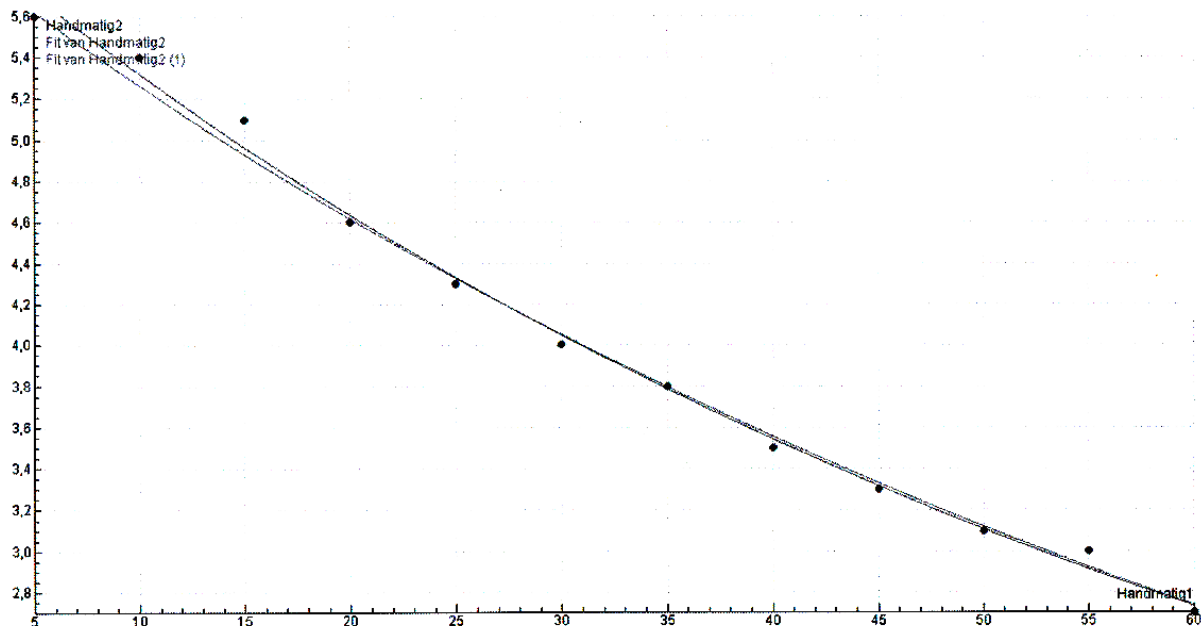


$$I = \frac{6,75}{r^2} \text{ met functiefit.}$$

Dit klopt erg goed, dus de hypothese klopt.

Verslag bij ISP experiment 2A Radioactief verval van Radon-220

t(sec)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
I(mA)	1	6	5,6	5,4	5,1	4,6	4,3	4,0	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7
	2	6	5,6	5,3	5,0	4,6	4,3	4,3	4,0	3,6	3,4	3,3	2,9	2,9
	3	6	5,7	5,5	5,1	5,0	4,5	4,2	3,8	3,5	3,4	3,3	3,0	3,0



Conclusie

Door middel van de punten die uit onze metingen zijn gekomen hebben wij d.m.v. coach de grafiek gefit.

Hieruit bleek dat het een exponentiële functie betrof.

$$5,70 \cdot 10^{-0,015} + 0,412$$

Met behulp van deze formule hebben wij met behulp van de leraar de halveringstijd kunnen vaststellen: 53 sec.

Dit wijkt significant af van de oorspronkelijke 55,6 sec maar dit zal waarschijnlijk komen door onnauwkeurige metingen.

7.4 Aangepaste documenten

Op de komende pagina's zijn de aangepaste versies van de gebruikte documenten te vinden. In paragraaf 5.2.1 zijn de aanpassingen toegelicht.

- **Aangepaste docentenmateriaal - introductie**
- **Aangepaste practicumhandleiding**
- **Aangepast docentenmateriaal - werkplanbesprekingen**

Open variant van het stralingspracticum - Introductie voor docenten

Uit een onderzoek onder docenten/gebruikers van het ISP is gebleken dat er – naast de huidige gesloten uitvoeringsvariant van het practicum – behoefte bestaat aan een meer open uitvoeringsvariant.

Deze meer open uitvoeringsvariant van het practicum is nog in ontwikkeling en is in de eerste helft van 2011 voor het eerst getest door Rob van Rijn – een van de drie practicumleiders van het ISP – en Enja Blasse in het kader van haar bacheloronderzoek aan de Universiteit Utrecht.

Karakter

Bij deze meer open uitvoeringsvariant wordt gewerkt met dezelfde opstellingen als in de gangbare gesloten variant. Bij de uitvoering van het practicum in de meer open variant worden de meetopstellingen door de practicumleider ook op de gangbare manier voor de leerlingen klaargezet, zij het dan zonder de werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant worden gebruikt. Het is gebleken dat het door de leerlingen zelf bij elkaar laten zoeken van de benodigde apparatuur voor de door hen gekozen experimenten tot een onproductieve chaos leidt. Bij deze meer open uitvoeringsvariant houden het doel van en de meetopstelling bij elk van de experimenten dus hun gesloten karakter – beide blijven ‘gegeven’.

Het verschil tussen de gesloten en de meer open uitvoeringsvariant zit in de manier waarop de leerlingen zich op het practicum voorbereiden. In tegenstelling tot de gesloten variant, moeten de leerlingen bij de gegeven opstelling en doel hun eigen werkplan opstellen. Gedetailleerde instructies voor het uitvoeren van de metingen en het uitwerken van de meetresultaten, zoals deze bij gesloten experimenten wel worden gegeven, zijn er bij de open variant dus niet.

Het open karakter van de experimenten heeft als gevolg dat van zowel leerlingen als docenten een grotere tijdsinvestering wordt gevraagd dan bij de gesloten experimenten. Bij het testen van de open experimenten is gebleken dat docenten dit de moeite waard vinden omdat de leerlingen meer leren. De leerlingen vonden de open experimenten moeilijker dan de gesloten experimenten, maar ook zij zagen de open variant als een goede aanvulling op de meer simpele experimenten.

Aanbod

Niet alle ISP experimenten worden in deze fase getest. Er zijn zes experimenten geselecteerd die door de leerlingen kunnen worden uitgevoerd in de open variant. De experimenten die nu getest worden zijn:

1. Dracht van α -deeltjes in lucht
- 2a. Radioactief verval van radon-220
4. Terugstrooiing van β -deeltjes
8. Kwadratenwet
15. Ionisatie van lucht door röntgenstraling
19. Dracht van α -deeltjes afhankelijk van de luchtdruk

Om de tijdsinvestering voor docenten, TOA's en practicumbegeleiders te beperken kunnen per klas maximaal vier tweetallen deelnemen aan het open practicum. Deze leerlingen voeren in de practicumssessie één open experiment uit, aangevuld met één of meerdere gesloten experimenten.

Vorbereiding

Voorafgaand aan het practicum ontvangt u een aantal open practicumhandleidingen om aan de leerlingen uit te delen.

De practicumhandleiding bij elk van de experimenten geeft het doel van het experiment en de beschikbare meetopstelling. Daarna wordt de leerlingen gevraagd om zelf – zij het met enige sturing – een passende onderzoeksvraag (of onderzoeksvragen) te bedenken, hypothese(n) te formuleren en het bijbehorende meetplan voor de uitvoering van het experiment op te stellen. De leerlingen leggen het resultaat van deze voorbereiding voor aan de docent of TOA, die het beoordeelt en de eventueel noodzakelijke bijstellingen met de leerlingen bespreekt.

Hiermee is de voorbereiding van de leerlingen op het practicum afgerond en kunnen ze (enkele dagen later) met de uitvoering beginnen.

In vergelijking met de gangbare gesloten variant van het practicum vraagt deze meer open variant tijdens de voorbereiding op het practicum een duidelijk grotere tijdsinvestering van de docent of TOA: de door de leerlingen opgestelde onderzoeksvraag(vragen), hypothese(n) en het bijbehorende meetplan moeten worden beoordeeld en besproken. Als dit niet of onvoldoende gebeurt, zullen tijdens de uitvoering van het practicum problemen ontstaan met leerlingen ‘die niet weten wat ze nu eigenlijk moeten doen’.

In het kader van de beoordeling en bespreking van de door de leerlingen ingeleverde hypothesen en meetplannen is mogelijk nog een tweede, zij het eenmalige tijdsinvestering nodig: het ontwikkelen van een duidelijk beeld van het doel en de mogelijke uitvoering van elk van de experimenten. Een dergelijke voorbereiding is nodig om met name het meetplan van de leerlingen te kunnen beoordelen op uitvoerbaarheid en volledigheid. Deze voorbereiding kan plaatsvinden met behulp van het bijbehorende *docentenmateriaal*.

Uitvoering

In de practicumhandleiding staat niet veel meer dan dat leerlingen het experiment volgens hun eigen, eventueel na bespreking met de docent of TOA bijgestelde meetplan moeten uitvoeren. Natuurlijk kunnen ze daarbij wel om assistentie van de ISP-practicumleider vragen.

In vergelijking met de gangbare gesloten variant van het practicum vraagt deze meer open variant een duidelijk grotere investering van de docent of TOA in de begeleiding van de leerlingen: de door de leerlingen verkregen meetresultaten zijn minder makkelijk en minder snel te controleren door het ontbreken van standaardtabellen en -diagrammen zoals op de werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant worden gebruikt.

Afronding

Het laatste onderdeel van het werkblad vraagt bij elk experiment om een verslag in de vorm van een meetrapport. Dit vormt een logische afronding van deze meer open variant van het practicum: er zijn nu immers geen ingevulde werkbladen die bij de gesloten uitvoeringsvariant als een vorm van verslag kunnen dienen. Tijdens de uitvoering van het practicum hebben de leerlingen geen tijd om deze meetrappen te schrijven, dus dat zal achteraf moeten gebeuren. Waar nodig – afhankelijk van de theorie achter het experiment – geeft de practicumhandleiding enkele aanwijzingen voor het verwerken en verklaren van de meetresultaten.

In vergelijking met de gangbare gesloten variant van het practicum vraagt deze meer open variant ook tijdens de afronding van het practicum een duidelijk grotere tijdsinvestering van de docent of TOA: de door de leerlingen geschreven meetrappen moeten worden beoordeeld en eventueel besproken. In die beoordeling kan overigens ook het werk van de leerlingen uit de voorbereidingsfase worden meegenomen.

Tijdsinvestering

Leerlingen zijn aan het voorbereiden, uitvoeren en afronden van een open experiment ongeveer vijftig minuten meer kwijt dan aan het doen van een gesloten experiment.

Docenten moeten erop rekenen dat ze per tweetal ongeveer twintig minuten kwijt zijn aan het voorbereiden en uitvoeren van het werkplangesprek.

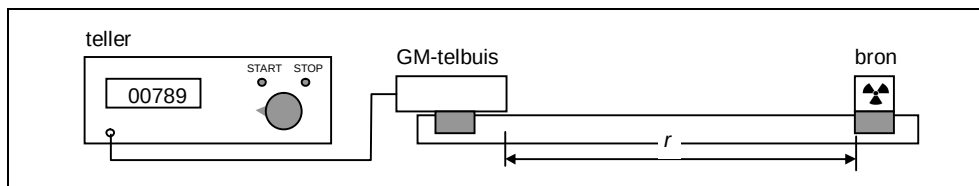
Experiment 8 Kwadratenwet

Doel

Meten van het verband tussen de stralingsintensiteit en de afstand tot een puntvormige radioactieve bron.

Meetopstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met strontium-90 (^{90}Sr). De pulsenteller is in te stellen op een meettijd van 10 s. De afstand tussen de telbuis en de bron is instelbaar.



Met de opstelling is de stralingsintensiteit I (in pulsen per 10 s) te meten als functie van de afstand r tussen de bron en de telbuis.

Onderzoeksvraag

- Formuleer een onderzoeksvraag die past bij het doel en de meetopstelling van dit experiment.

Hypothese

- Stel een beargumenteerde hypothese op over het verband tussen de stralingsintensiteit I en de afstand r tot de bron.
- Geef deze hypothese ook in de vorm van een schets van het verband tussen deze grootheden in een I, r -diagram.

Meetplan

Maak een meetplan voor het experimenteel onderzoek met de gegeven meetopstelling.

- Geef in dat meetplan aan welke grootheden je op welke manier gaat variëren en meten om het wel of niet juist zijn van de opgestelde hypothese te kunnen controleren
- Geef aan hoe je de metingen gaat corrigeren voor de achtergrondstraling.
- Geef in het meetplan ook aan of het uitvoeren van het experiment een bijdrage levert aan de stralingsbelasting tijdens het practicum, en zo ja: hoe je er dan voor zorgt dat die stralingsbelasting zo laag mogelijk blijft.
- Bespreek je onderzoeksvraag, de opgestelde hypothese en het bijbehorende meetplan met je docent of de TOA.
- Stel de hypothese en/of het meetplan zo nodig bij.

Onderzoek

- Voer het experimenteel onderzoek uit volgens je meetplan.
- Zorg daarbij voor voldoende stralingsbescherming.

Verwerking meetresultaten

Nu je de benodigde gegevens hebt verzameld, ga je die verwerken om je onderzoeksvraag te beantwoorden. Hieronder staan een aantal aanwijzingen om je te helpen bij de verwerking van je meetgegevens.

- Geef de meetresultaten in de vorm van een diagram.

In je diagram kun je misschien al een beetje zien dat de metingen op een afstand van minder dan ongeveer 20 cm afwijken van de andere metingen. Om op een nauwkeurige manier het verband tussen I en r te vinden, kun je de metingen onder de 20 cm beter niet meerekenen. Hier zijn twee redenen voor.

- Schrijf de vervalreeks van Strontium-90 op, en noteer bij elk verval de energie van het β -deeltje.
- Verklaar met behulp van de vervalreeks waarom je beter niet onder de 20 cm kunt meten.
- Als je denkt aan de werking van de GM-telbuis, wat is dan een tweede reden om niet te gaan meten onder 20 cm? (Hint: dode tijd)

Uit het I, r -diagram met de meetresultaten blijkt dat het verband tussen de (voor de achtergrondstraling gecorrigeerde) stralingsintensiteit I en de afstand r tussen bron en telbuis waarschijnlijk *omgekeerd kwadratisch* is. In een formule:

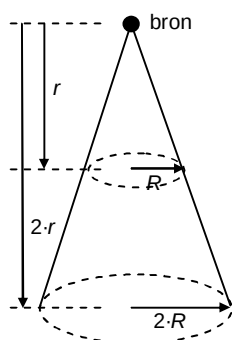
$$I = \frac{c}{r^2} = c \cdot \frac{1}{r^2}$$

In deze formule is c een evenredigheidsconstante.

- Leg uit hoe dit uit het I, r -diagram blijkt.
- Controleer of er inderdaad sprake is van een omgekeerd kwadratisch verband door de (voor de achtergrondstraling gecorrigeerde) stralingsintensiteit I in een diagram uit te zetten tegen $1/r^2$.

Het gevonden verband tussen stralingsintensiteit en afstand wordt de *kwadratenwet* genoemd: de stralingsintensiteit I neemt kwadratisch af met de afstand r tussen bron en telbuis.

- Verklaar deze kwadratische afname met behulp van de tekening hieronder.



Verslag

- Schrijf een verslag van dit onderzoek in de vorm van een *meetrapport*. In dat meetrapport staan je onderzoeksvraag, de opgestelde *hypothese*, de *meetresultaten* en de daaruit getrokken *conclusie* over het al dan niet juist zijn van die hypothese.

Aanwijzingen bij de werkplanbesprekingen

De werkplanbespreking is bedoeld om te zorgen dat leerlingen begrijpen waar hun experiment over gaat, en dat ze hun experiment uit kunnen voeren aan de hand van een duidelijk werkplan. Tijdens de gesprekken kan ook aandacht besteed worden aan de geplande verwerking: uit een getekende grafiek, logaritmisch papier, coach, Excel?

Dit docentenmateriaal bij de meer open variant van het straling practicum geeft per experiment enkele aanwijzingen voor het bespreken van de door de leerlingen opgestelde onderzoeksvra(a)g(en), hypothese(n) en het bijbehorende meetplan.

Ook staat bij de opmerkingen de vermoedelijke uitkomst van het experiment gegeven, en eventuele verklaringen voor andere uitkomsten.

Algemeen

Veiligheid

In de practicumhandleiding wordt de leerlingen gevraagd in het meetplan aan te geven of het uitvoeren van het experiment een bijdrage levert aan de stralingsbelasting tijdens het practicum en hoe ze ervoor gaan zorgen dat die stralingsbelasting zo laag mogelijk blijft. De eerste vraag is in zijn algemeenheid met ja te beantwoorden. Bij het antwoord op de tweede vraag gaat het in zijn algemeenheid om blootstellingstijd beperken, bron afschermen en afstand houden. Meer concreet: als de radioactieve bron niet nodig is voor het doen van metingen (blootstellingstijd beperken), staat deze – als dat mogelijk is – buiten de meetopstelling met het deksel erop (afschermen) op een afstand van ongeveer 1 m (afstand houden). Voor experimenten met een röntgentoestel ligt dit wat eenvoudiger: als de röntgenbuis niet nodig is voor het doen van metingen, staat deze uit.

Statistisch karakter

Wanneer de stralingsintensiteit wordt gemeten moet rekening worden gehouden met het statistisch karakter. Radioactief verval wordt veroorzaakt door een kansproces, en is daarom niet regelmatig. De leerlingen moeten hier rekening mee houden door voldoende grote tijdsintervallen te kiezen, of een aantal kleinere tijdsintervallen te middelen. Dit is ook belangrijk bij het doen van een nulmeting (experiment 4 en 8).

Onderzoeksvraag en hypothesen

Hieronder staat per experiment uitgesplitst wat belangrijke aandachtspunten zijn bij het bespreken van de onderzoeksvraag, hypothesen en het meetplan. Bij de hypothese staat vermeldt wat de uitkomst van het experiment zal zijn. Indien leerlingen een andere hypothese stellen maar deze wel kunnen beargumenteren is dat natuurlijk ook goed.

Experiment 1

Onderzoeksvraag
Hypothesen

Meetplan

Opmerkingen

Dracht van α -deeltjes in lucht

- Wat is de dracht van α -deeltjes in lucht?
- De ionisatiestroomsterkte I zal eerst ruwweg gelijk blijven bij toenemende afstand d tussen bron en ionisatiekamer, en bij een bepaalde afstand snel afnemen tot nul.
- De grootte-orde van de dracht R van α -deeltjes in lucht is enkele cm.
- Afstand d tussen bron en ionisatiekamer zo groot mogelijk maken en signaalversterker afregelen op een stroomsterkte van 0 A.
- Afstand d tussen bron en ionisatiekamer zo klein mogelijk maken (2,5 cm). Afstand d in kleine stappen (gezien de grootte van de te verwachten dracht) van bijvoorbeeld 0,5 cm groter maken en bij elk van de ingestelde afstanden de ionisatiestroomsterkte I aflezen.
- Denken aan veiligheid: blootstellingstijd beperken, afstand houden, bron afschermen.
- Verwerking: kan het beste aan de hand van een getekende grafiek, het gaat niet om het bepalen van een verband.
- De stroommeter geeft de ionisatiestroomsterkte I in 10^{-11} A.
- Dracht α -deeltjes van ^{226}Ra in lucht: $R = 7,7$ cm (voor de meest energetische α -deeltjes).
- In het gevonden I, d -diagram zijn meerdere α -deeltjes uit de vervalreeks van ^{226}Ra te zien. Achtergrondinformatie daarover is te vinden op de website van het ISP. De leerlingen worden daar ook heen verwezen om hun diagram te verklaren.
- Een uitleg over de vorm van de ionisatiekromme is ook te vinden in hetzelfde document met achtergrondinformatie.

Experiment 2A	Radioactief verval van radon-220 (met stroommeter)
Onderzoeksvraag	• Wat is de halveringstijd van radon-220? • De ionisatiestroomsterkte I zal exponentieel afnemen in de loop van de tijd t. • De grootte-orde van de halveringstijd $t_{1/2}$ van ^{220}Rn is 54,5 s (zie Binas).
Hypothesen	• Signaalversterker afregelen op stroomsterkte van 0 mA zonder radon in de ionisatiekamer (zie practicumhandleiding).
Meetplan	• Radon in de ionisatiekamer brengen (zie practicumhandleiding) tot de stroommeter net iets meer dan maximaal uitslaat. Stopwatch starten bij maximale uitslag van de stroommeter en (gezien de grootte van de te verwachten halveringstijd) elke 20 of 30 s de ionisatiestroomsterkte I aflezen. Alternatief: De tijd aflezen bij een aantal waarden van de ionisatiestroomsterkte (bijvoorbeeld 6, 5, 4 enzovoort mA). • Denken aan veiligheid: blootstellingstijd beperken, afstand houden, bron afschermen. • Verwerking: Aan de leerlingen wordt in de handleiding gevraagd om de halveringstijd zowel met een normale grafiek als met enkellogaritmisch papier te bepalen. Het kan ook in Excel of in Coach gedaan worden met een functiefit. • NB. Niet alle leerlingen leren bij wiskunde hoe ze uit een functiefit de halfwaardetijd kunnen berekenen. Voor deze leerlingen is het voldoende om in de enkellogaritmische grafiek een rechte lijn te trekken, en de tijd af te lezen bij 50% van de oorspronkelijke intensiteit.
Opmerkingen	• Gemeten halveringstijd ruwweg 50 s (afwijking 10%). • Aan de hand van een I, t diagram kan de halveringstijd bepaald worden. Met gebruik van enkellogaritmisch papier of met behulp van een functie-fit op de computer wordt een betere nauwkeurigheid behaald.
Experiment 4	Terugstrooiing van β-deeltjes
	Leerlingen vinden dit experiment vaak moeilijk te begrijpen. Als ze nog geen goed beeld hebben van het doel van het experiment, is het goed om daar wat aandacht aan te besteden. De metingen zijn niet ingewikkeld, daar kan eventueel minder tijd aan worden besteed.
Onderzoeksvraag	• Wat is het verband tussen het aantal teruggestrooide β-deeltjes en het atoomnummer van het materiaal dat voor verstrooiing zorgt? Met welk onbekend materiaal hebben we te maken? (over de laatste vraag hoeft geen hypothese te worden opgesteld)
Hypothesen	• De intensiteit I van de teruggestrooide β-straling neemt toe met het atoomnummer Z van het materiaal dat voor verstrooiing zorgt: hoe groter de lading van de kern is, des te groter is de kans op terugstrooiing.
Meetplan	• Achtergrondstraling: Zonder verstrooiplaat in de opstelling minstens 3x de intensiteit I_0 (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling meten en gemiddelde berekenen. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). • Minstens 3x de intensiteit I (in pulsen per 10 s) van de verstrooide β-straling meten voor elk van de verstrooiplaten in de opstelling, per verstrooiplaat de gemiddelde intensiteit berekenen en corrigeren voor de gemiddelde intensiteit van de achtergrondstraling. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). Aandachtspunt: voor correctie voor de achtergrondstraling moet de meettijd bij meting van I_0 en I hetzelfde zijn, of de metingen moeten eerst worden omgerekend naar pulsen per s). • Atoomnummers van de gebruikte verstrooiingsmaterialen opzoeken (zie Binas). • Denken aan veiligheid: blootstellingstijd beperken, afstand houden, bron afschermen. • Verwerking: Zelf een grafiek tekenen werkt hier het beste.
Opmerkingen	• Bij een hoger atoomnummer is de lading van de kern hoger, daardoor zijn de elektrische krachten hoger, en daardoor worden meer teruggestrooide β-deeltjes gemeten. • Het statistisch proces van verstrooiing veroorzaakt een grote onzekerheid in de meetwaarden, waardoor het verband tussen intensiteit I en atoomnummer Z niet nauwkeurig te tekenen is. Wel is duidelijk te zien dat de intensiteit van de teruggestrooide β-straling minder dan recht evenredig toeneemt met het atoomnummer. • Het onbekende materiaal is molybdeen. Het resultaat dat de leerlingen vinden zal daarmee veelal niet overeenkomen door de meetonzekerheid.
Experiment 8	Kwadratenwet
Onderzoeksvraag	• Wat is het verband tussen de stralingsintensiteit I en de afstand r tot de bron?
Hypothesen	• De stralingsintensiteit I neemt af bij toenemende afstand r tot de bron. Het verband tussen deze grootheden is omgekeerd kwadratisch (zie de aanwijzingen in de practicumhandleiding van de leerlingen bij dit experiment).

Meetplan	- Achtergrondstraling: Zonder bron in de opstelling minstens 3x de intensiteit I_0 (in pulsen per 10 s) van de achtergrondstraling meten en gemiddelde berekenen. Alternatief: 1x de intensiteit meten bij een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). - Minstens 3x de stralingsintensiteit I (in pulsen per 10 s) meten bij toenemende afstand r tot de bron (bijvoorbeeld in stappen van 10 cm), per afstand gemiddelde berekenen en corrigeren voor de gemiddelde intensiteit I_0 van de achtergrondstraling. Alternatief: 1x de intensiteit meten over een langere tijd (bijvoorbeeld 30 s). Aandachtspunt: voor correctie voor de achtergrondstraling moet de meettijd bij meting van I_0 en I hetzelfde zijn, of de metingen moeten eerst worden omgerekend naar pulsen per s). - Denken aan veiligheid: blootstellingstijd beperken, afstand houden, bron afschermen. - Verwerking: In de practicumhandleiding wordt de leerlingen gevraagd om een grafiek te tekenen van I tegen $1/r^2$ om aan te tonen dat het verband omgekeerd kwadratisch is. Dit kan ook in Excel of Coach worden gedaan met een functiefit.
Opmerkingen	- De metingen onder 20 cm kunnen het beste uit de meetserie verwijderd worden. Dit heeft twee redenen: In de vervalreeks van Strontium-90 zit één beta deeltje met een energie van 2284keV, en drie deeltjes met lagere energieën. Deze drie meet je ook op kleinere afstand. Daarnaast speelt de dode tijd van de GM-teller een rol op deze afstanden, omdat er veel deeltjes tegelijk in de teller komen. - De grafiek van I tegen $1/r^2$ is een stijgende rechte lijn door het nulpunt. - Op een 2x zo grote afstand r tot de bron is het oppervlak waarover de straling zich heeft verspreid 4x zo groot (want de straal R van het cirkeloppervlak is 2x zo groot). De stralingsintensiteit I is dan dus 4x (of 2^2x) zo klein. Meer algemeen: afstand nx zo groot, dan stralingsintensiteit n^2x zo klein. De stralingsintensiteit I neemt dus kwadratisch af met de afstand r tot de bron.
Experiment 15	Ionisatie van lucht door röntgenstraling
Onderzoeksvraag	Wat is het verband tussen de ionisatiestroom I en de spanning U over twee condensatorplaten waar röntgenstraling tussendoor valt? Wat is het exposietempo van de röntgenbuis?
Hypothesen	De ionisatiestroomsterkte I neemt geleidelijk steeds langzamer toe met de spanning U tot een constante waarde is bereikt: de verzadigingsstroomsterkte.
Meetplan	- Versterker afregelen op stroomsterkte 0 A bij spanning 0 V. - Ionisatiestroomsterkte I meten bij toenemende spanning U (in stappen van bijvoorbeeld 50 V). NB: Spanning maximaal 800 V. - Verwerking: Zelf een grafiek tekenen is hier voldoende. In de practicumhandleiding worden de leerlingen geholpen om het exposietempo te berekenen.
Opmerkingen	- De stroommeter geeft de ionisatiestroomsterkte I in 10^{-9} A. - De verzadigingsstroomsterkte treedt op als de spanning zodanig is dat alle ionen de platen bereiken. - De verzadigingsstroomsterkte hangt van verschillende dingen af: de luchtvochtigheid, de precieze plaats van de condensatorplaten tov elkaar en tov de röntgenbuis. De waarnemingen van de leerlingen kunnen dus afwijken van de onderstaande waarden, maar zullen we dezelfde orde van grootte moeten hebben. - Gemeten verzadigingsstroomsterkte: $6,5 \cdot 10^{-9}$ A.. Per seconde gevormde lading: $6,5 \cdot 10^{-9}$ C/s. Exposie: $2,9 \cdot 10^{-5}$ C/kg. Exposietempo: $2,9 \cdot 10^{-5}$ C/kg. - Equivalent dose: 1 mSv. Dus exposie: $2,5 \cdot 10^{-5}$ C/kg. Inschakeltijd (uit exposie/exposie tempo): 0,86 s.
Experiment 19	Dracht van α-deeltjes afhankelijk van de luchtdruk
Onderzoeksvraag	Wat is het verband tussen de dracht van α-deeltjes en de luchtdruk?
Hypothesen	- De dracht R van α-deeltjes in lucht zal toenemen bij afnemende luchtdruk p. - De grootte-orde van de dracht R van α-deeltjes in lucht is enkele cm.
Meetplan	- Dracht R variëren (vanaf 3,0 cm in stappen van bijvoorbeeld 0,5 cm), bij elke ingestelde waarde van de dracht lucht wegpompen tot de teller begint te tellen en dan de luchtdruk aflezen. - Denken aan veiligheid: blootstellingstijd beperken, afstand houden, bron afschermen. - Verwerking: In de practicumhandleiding wordt de leerlingen gevraagd om een grafiek te tekenen van R tegen $1/p$ om aan te tonen dat het verband omgekeerd evenredig is. Dit kan ook in Excel of Coach worden gedaan met een functiefit.
Opmerkingen	- De grafiek van R tegen $1/p$ is een stijgende rechte lijn door het nulpunt. Evenredigheidsconstante: $c = 2,1 \cdot 10^3$ m·Pa. - Dracht R van α-deeltjes bij een luchtdruk gelijk aan de normale druk van de buitenlucht ($1,0 \cdot 10^5$ Pa): $R = 2,1$ cm.