



Vrije
Universiteit
Brussel

Proefondervindelijke Aspecten van Stralings- en Kwantumfysica

Bachelor-2 Fysica
(versie academiejaar 2010-2011)

Prof. J. D'Hondt

jodhondt@vub.ac.be

buro 0-G-117

tel 02-6293483

secretariaat: Mevr. M. Goeman (1-G-006)

Assistenten S. Blyweert & M. Maes

Inhoud cursus:

0. Voorwoord
1. Inleiding tot proefondervindelijke fysica en organisatie
2. Basis instrumenten voor proefondervindelijke fysica
 - Taak: nagaan van de wetmatigheden in een elektrisch circuit
 - Workshop 1: bepalen van een weerstand
3. Proefondervindelijke aspecten van straling
 - Workshop 2: proefondervindelijke aspecten van polarisatie
 - Workshop 3: proefondervindelijke aspecten van interferentie en diffractie
 - Workshop 4: wetmatigheden van de radioactiviteit
4. Proefondervindelijke aspecten van de kwantummechanica
 - Workshop 5: het foto-elektrisch effect
 - Workshop 6: de golf-deeltjes dualiteit
 - Workshop 7: het Rutherford experiment
5. Taak: beschrijving van een belangrijk experiment
6. Referenties

Voorwoord

De inhoud van dit opleidingsonderdeel alsook de cursusnota's werden vanaf het academiejaar 2008-2009 hervormd. De huidige nota's vinden hun inspiratie in de syllabus van collega Prof. Luit Slooten, alsook in vele referentiewerken. Dit opleidingsonderdeel heeft de intentie de student inzicht te geven in het proefondervindelijke aspect van de natuurkunde of fysica. Het proefondervindelijk bestuderen van de wetmatigheden van stralings- en kwantumfysica sluit nauw aan bij de gelijkaardige hoorcolleges over de huidige theoretische modellen in de natuurkunde zoals "Vaste stof en stralingsfysica" en "Inleiding tot kwantummechanica". Soms zullen we in deze proefondervindelijke opleiding de concepten onderzoeken die reeds geïntroduceerd werden in de betreffende hoorcolleges, soms zullen we in deze cursus de fenomenen eerst proefondervindelijk benaderen. Voor een fysicus is het onontbeerlijk om de inhoud van al deze cursussen samen te beheersen, om hiermee de uitdaging aan te gaan om nieuwe inzichten te verwerven of eventueel nieuwe wetmatigheden te ontdekken.

De instructies in deze cursus verschillen sterk van deze van vorige experimentele of proefondervindelijke cursussen. Je zal geen uitgebreide nota's vinden die je gemakkelijk doorheen een namiddagje labo helpen. De nota's die voor jou liggen dienen als leidraad bij de voorbereiding die je zal uitwerken voor je experimentele werk in het laboratorium. In het laboratorium zal je de kans krijgen om je ideeën betreffende fysische fenomenen of wetmatigheden te testen aan de realiteit. Zonder adequate voorbereiding zal je dus een belangrijke kans missen in je opleiding tot fysicus. Het doel van de voorbereiding is om voordien na te denken over de concepten en een voorspelling te maken van de uitkomsten van de experimenten die je zal voorstellen om het fenomeen te doorgronden.

Men moet zich ook altijd de vraag stellen waarom we een welbepaald experiment uitvoeren, en welk verband er is met de alledaagse realiteit. Je zal moeten trachten je activiteiten in het laboratorium te kaderen in een breder geheel. Hoe kan je met je proefondervindelijke resultaten, de fenomenen of wetmatigheden verklaren die we dagelijks ondervinden, en waar kunnen we die bevindingen toepassen.

Gezien de jonge leeftijd van deze nota's zijn alle opmerkingen en/of suggesties welkom.

Prof. J. D'Hondt
Ass. S. Blyweert en M. Maes

Hoofdstuk 1:

Inleiding tot proefondervindelijke fysica en organisatie

Inhoud

1. *Proefondervindelijk wetmatigheden van de Natuur ontdekken*
2. *Enkele voorbeelden uit de geschiedenis*
3. *Organisatie van dit opleidingsonderdeel*
4. *Het laboschrift*
5. *Rapportering van het proefondervindelijk werk*

1. Proefondervindelijk wetmatigheden van de Natuur ontdekken

De wetmatigheden van de Natuur rondom ons trachten in modellen te formuleren staat centraal voor de professionele natuurkundige. Dergelijke modellen of hypothesen moeten voorspellingen kunnen maken van fenomenen die we experimenteel kunnen onderzoeken. Slechts indien de empirische gegevens de voorspellingen bevestigen, kunnen we spreken over een werkelijke theorie over de werking van meestal een deelaspect van de algemene Natuur. Dit kan gaan van de kleinste schaal van de elementaire deeltjes tot de grootste structuren in ons Universum.

Het efficiënt opstellen van modellen vergt een grondige studie van de fenomenen die men tracht te beschrijven. De creativiteit van de wetenschapper in deze taak wordt gevoed met diverse basisargumenten die aan de grondslag liggen van de modellen. Dit kan bijvoorbeeld de mathematische eenvoud zijn van het model. In de meeste gevallen echter ligt proefondervindelijk onderzoek aan de basis van onze studie van de Natuur. Door het nauwkeurig uitvoeren van experimentele observaties van natuurfenomenen krijgt de fysicus inzicht in de onderliggende wetmatigheden van de Natuur. Doorheen de geschiedenis van de wetenschap hebben dergelijke proefondervindelijke studies aanleiding gegeven tot revolutionaire inzichten en bijgevolg in nieuwe modellen en theorieën van de Natuur.

Gezien dergelijke proefondervindelijke aanpak een cruciale werkwijze is voor het doorgronden van de Natuur, behoort deze techniek ook tot de kern van jullie studies. Deze tak van de fysica opleiding is het onderwerp van deze cursus en gaat verder op de reeds verworven kennis in het opleidingsonderdeel "Meten en experimenteren" uit het eerste Bachelor jaar. Daar hebben jullie nauwkeurig leren meten in het kader van experimenten omtrent basisfenomenen in de fysica. Met deze proefondervindelijke cursus gaan we een stap verder, en zullen we jullie ook laten nadenken over de reden waarom bepaalde proeven moeten uitgevoerd worden. We zullen uitgaan van fysica concepten zoals straling en kwantum verschijnselen, en trachten de wetmatigheden van deze concepten proefondervindelijk te onderzoeken om met deze inzichten tot een model en/of theorie te komen omtrent het natuurfenomeen.

In de proefondervindelijke fysica moet men verschillende disciplines beheersen zoals het verzamelen van gegevens via data-acquisitie systemen, het conceptualiseren van de fenomenen en uiteraard het effectief realiseren van de experimenten. Dergelijke

activiteiten hebben een sterke relatie met de theoretische tak van de fysica. Door het verzamelen van empirische gegevens over de Natuur kunnen we inzichten verwerven die gebruikt kunnen worden bij het opstellen van modellen of theorieën. Ook de theoretische voorspellingen kunnen ons een motivatie geven hoe we experimenten moeten opstellen om de natuurfenomenen beter te begrijpen. Bijgevolg zijn beide aspecten essentieel in een opleiding tot fysicus en in ons doel om de Natuur beter te begrijpen.

2. Enkele voorbeelden uit de geschiedenis

Doorheen de geschiedenis van de wetenschap en meer specifiek van de natuurkunde, hebben vele proefondervindelijke studies aanleiding gegeven tot revolutionaire inzichten in de werking van de Natuur. Uiteraard kunnen we terug gaan tot in de Oudheid om voorbeelden te vinden, maar het is pas in de Middeleeuwen dat de onderzoeker een systematisch wetenschappelijke methode toepast bij het verzamelen van empirische gegevens met betrekking tot natuurfenomenen. Later, tijdens de zogenaamde Wetenschappelijke Revolutie in het moderne Europa lagen wetenschappers zoals Galilei, Huygens, Kepler, Pascal en Newton aan de basis van de concepten van proefondervindelijke fysica. Men begon empirische metingen te gebruiken om theoretische modellen te valideren of falsifiëren.

Er zijn verschillende bekende experimenten die doorheen de geschiedenis werden uitgevoerd. Het experiment van Cavendish (1797-1798) waarmee hij de dichtheid van de Aarde bepaalde en men hiermee later de gravitatieconstante en de massa van de Aarde kon bepalen. De dubbelspleet experimenten die aan de basis liggen van de golfdeeltjes dualiteit en bijgevolg een centraal fenomeen zijn bij het opstellen van de kwantummechanica. Het Frank-Hertz experiment (1914) die empirisch het atoommodel van Bohr ondersteunde. Het Michelson-Morley experiment (1887) waar men met behulp van een interferometer de zogenaamde "ether" bestudeerde. Deze interferentie techniek gebruiken we in hedendaags onderzoek om gravitationele golven trachten waar te nemen. Deze golven zijn voorspeld door de algemene relativiteitstheorie van Einstein, maar zijn nooit direct waargenomen. Ook gekend is het Rutherford of Geiger-Marsden experiment (1909) waar men tot onverwachte observaties kwam over de structuur van een atoom. De wetenschappers van vele van deze revolutionaire experimenten werden beloond met de Nobelprijs voor fysica. Een duidelijke indicatie voor het belang van de proefondervindelijke natuurkunde.

Een geweldig voorbeeld van een hedendaags proefondervindelijke studie voert men uit te CERN nabij Geneve. Men tracht er hoog energetische botsingen tussen protonen te verwezenlijken met de Large Hadron Collider (LHC) om op een experimentele wijze de inhoud van het Universum te bestuderen en empirische informatie te verzamelen voor het opstellen van modellen die de interacties tussen de elementaire deeltjes trachten te beschrijven.

3. Organisatie van dit opleidingsonderdeel

Het ontdekken of proefondervindelijk onderzoeken van de wetten van Natuur is enkel een efficiënt proces indien er een grondige voorbereiding aan vooraf gaat. Niet alleen moet men inzichten verkrijgen in de fysische modellen omtrent het te onderzoeken

fenomeen, maar moet men ook de functionaliteit van de instrumenten in het laboratorium begrijpen en het gebruik ervan beheersen. Bij elke categorie fenomenen die we zullen bestuderen, hoort bijgevolg een inleiding over de relevante instrumenten in het laboratorium. Soms in dit slechts een herhaling die we toevoegen voor de volledigheid, soms betreft dit nieuwe methoden en instrumenten. Tijdens of kort na deze lessen zullen we ook enkele specifieke fenomenen proefondervindelijk onderzoeken om het gebruik van de instrumenten te oefenen.

Elk fysisch concept of fenomeen dat we proefondervindelijk zullen benaderen, zal kort ingeleid worden. Hierbij zal het doel van de proefondervindelijk taak verduidelijkt worden. Ter voorbereiding van een labo sessie of "*Workshop*" zal je dit bestuderen en waar nodig meer informatie opzoeken in cursussen, in wetenschappelijk tijdschriften of boeken uit de bibliotheek of op internet. Je moet het onderwerp grondig bestuderen om efficiënt aan de volgende stap te beginnen. Met mag uiteraard niet vergeten referenties toe te voegen indien men ideeën, teksten en/of grafieken gebruikt.

Bij elk onderwerp zullen een of meerdere problemen proefondervindelijk bestudeerd worden. Deze problemen zullen uit ons dagelijks leven komen of uit ons begrip van de natuurkunde. De specifieke vragen die daaruit voorkomen, worden herleid tot een elementaire probleemstelling of vraagstelling bijvoorbeeld een hypothese. Deze probleemstelling is de leidraad doorheen je proefondervindelijk werk in het laboratorium.

Er wordt een beschrijving gegeven van de instrumenten die beschikbaar zijn in het laboratorium om de probleemstelling op een proefondervindelijke manier te benaderen. Het is essentieel dat je de functionaliteit van deze instrumenten bestudeert en waar nodig extra informatie verzameld hierover. Voor we echter experimentele metingen uitvoeren, moeten we uiteraard eerst voorspellen wat de uitkomst is van de meting. Want slechts in een vergelijking tussen de voorspelling en de reële empirische meting, kan men komen tot inzichten over natuurfenomenen. Deze voorspelling moet je neerschrijven in je laboschrift (zie hieronder) voor je naar het laboratorium komt. Soms zal je het resultaat analytisch kunnen voorspelling via een berekening uitgaande van de huidige theoretische kennis over het fenomeen, soms zal het echter slechts een gemotiveerd gevoel zijn waarvoor geen exacte berekening kan gemaakt worden. Je moet ook een methode voorstellen hoe je met je voorspelling en resultaat, een antwoord zal geven op je probleemstelling.

Om tot een voorstel te komen van een experimentele opstelling, moet men zich uiteraard de juiste vragen stellen. In deze cursus kan je als leidraad bij elk probleem een reeks vragen vinden die je kunnen helpen het experimentele probleem op te lossen en te doorgronden. Ze zullen je helpen om de voorspellingen te maken en je empirische data te analyseren. Voor je naar het laboratorium komt, zal je deze vragen beantwoorden. Ze zullen je helpen een voorspelling te maken en na te gaan welke effecten een invloed kunnen hebben op je experiment. Ze moeten je inzicht geven waarom je specifieke keuzes gemaakt hebt en waarom andere niet.

Nu ben je klaar om een experimenteel plan op te stellen om je proefondervindelijke studie verder te zetten. Dit plan moet je opstellen in je laboschrift voor je naar het laboratorium komt en zal besproken worden met de assistent tijdens de uitvoering

van je plan en dus tijdens de Workshops. Dit plan omvat ook een studie van de werking van de instrumenten die je zal gebruiken. Je zal namelijk moeten nagaan of die toestellen juist meten. De meeste instrumenten hebben een specifiek bereik waarbinnen ze betrouwbaar zijn. Zoek dit eventueel op en ga dit experimenteel na. Schrijf voordien in je laboschrift hoe je dit zal aanpakken en noteer de resultaten. Indien de meetinstrumenten niet functioneren volgens je vooropgesteld plan, stel je beter een alternatief plan voor. Deze stap in de voorbereiding resulteert in een chronologisch uitgewerkt plan voor je activiteiten die je zal uitvoeren in het laboratorium en staat bijgevolg in je laboschrift. In deze cursus vind je ideeën voor dit plan, maar de uitwerking is voor jullie.

Na deze voorbereidende fase kan je het effectieve experiment uitvoeren omdat je kennis hebt genomen van alle externe elementen die een effect kunnen hebben en je ook duidelijk een beeld hebt van alles wat je wil doen. Soms zal je metingen doen om heel nauwkeurig een grootte te bepalen, soms zal je metingen doen om proefondervindelijk inzicht te krijgen in een fenomeen. Ga steeds na hoeveel metingen je moet uitvoeren om je hypothese te kunnen verifiëren. Zowel de motivatie hiervoor als alle meetresultaten komen in je laboschrift.

Meestal zullen niet de individuele metingen op zich interessant zijn, maar komt men pas na een grondige verwerking van de individuele empirische metingen tot een relevante grootte. Gebruik hiervoor de methoden en technieken uit de cursussen statistiek en statistische verwerking van experimentele gegevens. Ga voordien na welke methoden je zal toepassen en beschrijf de verwerking in je laboschrift. Steeds moet men nagaan of de resultaten van de statistische analyse wel juist zijn, zowel mathematisch als kwalitatief. Ga bijvoorbeeld na of je metingen zin houden. Het is beter om na elke reeks metingen eerst de verwerking uit te voeren en na te gaan of er geen duidelijke fouten insluipen, dan pas tot deze conclusie te komen na het uitvoeren van alle metingen.

Om je proefondervindelijk werk te beëindigen moet je een conclusie formuleren over het specifieke probleem. Dit is uiteraard een wetenschappelijke wel overwogen conclusie waar men ook kritisch moet zijn over het uitgevoerde werk en eventuele gebreken vermelden.

Voor elk hoofdstuk krijgen we dus:

1. Een kort inleiding over de fysische concepten
2. Het doel van deze experimenten
3. Een of meerdere problemen:
 - A. Voorstelling specifiek fenomeen
 - B. Opstellen van een hypothese die we proefondervindelijk zullen testen
 - C. Beschrijving van de instrumenten
 - D. Motivatie voor het opstellen van een experiment en de methode dat voor bovengestelde hypothese een proefondervindelijk antwoord kan geven
 - E. Kritische benadering van je methode
 - F. Een experimenteel plan om uit te voeren in het laboratorium
 - G. De empirische metingen
 - H. De statistische analyse en verwerking van de metingen

I. De conclusie met ook kritische vragen die overblijven

Zowel je laboschrift als de eventuele rapportering zullen bijgevolg ook dergelijke structuur volgen.

3. Het laboschrift

In een laboratorium is het belangrijk om al je activiteiten te noteren (ook bij theoretisch werk overigens), zowel je ideeën, metingen, berekeningen, tussentijdse resultaten, enzovoorts. Dit uitgebreid logboek zal je nadien toelaten op een efficiënte manier een rapport te schrijven. Het is essentieel om de procedure neer te schrijven hoe je aan een wetenschappelijk resultaat gekomen bent. Als je het geluk hebt ooit een wetenschappelijke ontdekking te mogen realiseren, zal je het zeer spijtig vinden als je de methode niet hebt neergeschreven en dus je niet in staat bent je collega's te overtuigen van je ontdekking door de procedure te herhalen. Ook zal dit schrift toelaten gemakkelijker op vragen van collega's te antwoorden of je werk grondig onder de loep te nemen bij het opsporen van eventuele fouten. Het laat ons ook toe om te controleren dat de metingen goed uitgevoerd zijn alsook de verwerking tot een wetenschappelijk resultaat. Bij het indienen van een rapport over je proefondervindelijk werk, zal je bijgevolg ook je laboschrift indienen. We vragen jullie om twee schriften aan te schaffen. Terwijl je werkt in het ene laboschrift, zullen wij je rapport met nota's in het andere laboschrift verbeteren.

Beide laboschriften moeten voorzien zijn van paginanummers. Deze kan je er uiteraard met pen zelf inschrijven. De eerste drie pagina's van elk schrift dienen voor de inhoudstabel, waar je zal aanduiden op welke pagina welk experiment begint en welke onderdelen je bij elk experiment bestudeerde. Bijgevolg de verschillende onderdelen zoals uiteengezet hierboven die ook de structuur vormen van een rapport. Maak eventueel ook een schets van de experimentele opstelling in het schrift. Let er op, dat bij het schrijven in je laboschriften je steeds duidelijk schrijft. Schuur geen pagina's uit het schrift, maar doorstreep eventuele fouten. Schrijf de berekeningen heel duidelijk in het schrift, zodat je later eventuele fouten gemakkelijk kan identificeren.

4. Rapportering van het proefondervindelijk werk

In het hedendaags onderzoek worden resultaten en bevindingen meestal gecommuniceerd via wetenschappelijke publicaties of presentaties tijdens conferenties. Hiervoor volgen wetenschappers strenge regels. De wetenschappelijke nauwkeurigheid, duidelijkheid en relevantie van een publicatie wordt door een internationaal comité van experts gecontroleerd voor de publicatie verspreid word. Ook jullie rapporten zullen aan deze eisen moeten voldoen. Je moet namelijk je collega's overtuigen van je conclusie.

We zullen verschillende proefondervindelijke studies doen in deze cursus waarvoor het resultaat uiteraard moet geformuleerd worden in een rapport. Dit rapport is heel belangrijk en volgt de structuur zoals hierboven weergegeven. Met dit rapport moet je een collega wetenschapper duidelijk maken wat je onderzocht hebt, alsook welke methoden je gebruikt hebt. De proefondervindelijke resultaten geven aanleiding tot

een conclusie en je moet de wetenschapper die het verslag leest ervan overtuigen dat de conclusie of interpretatie juist is. Bijgevolg moet je aan alle elementen in je proefondervindelijke studie denken die een invloed kunnen hebben op je conclusie.

Een rapport wordt opgesteld met een elektronische tekstverwerker (met de computer dus) en dient een formele lay-out te hebben. Tijdens de eerste lessen zullen verschillende voorbeelden uitgedeeld worden van reële wetenschappelijke publicaties die als leidraad kunnen dienen. Het is niet nodig om een volledige cursus over te nemen over het bestudeerde onderwerp, daarvoor kan men namelijk (op een correcte wijze) refereren naar de relevante literatuur. Slechts een overzicht van de belangrijkste elementen nodig om van het rapport een leesbaar geheel te maken, zijn essentieel om neer te schrijven. Ook de volledige verwerking van de empirische gegevens is niet nodig weer te geven. Uiteraard wel welke methoden of technieken toegepast werden om tot het resultaat te komen. Zo moet men bijvoorbeeld niet alle individuele metingen weer te geven, maar enkele het gemiddelde (met onzekerheid!) indien dit relevant is. Een grafiek of histogram van de metingen is soms nuttig. De lengte van een wetenschappelijk rapport is afhankelijk van het uitgevoerde experiment. Soms heeft men slechts 5 pagina's nodig om de conclusie te motiveren en te kaderen binnen een fysica onderwerp, soms heeft men 30 pagina's nodig. Bijgevolg is er geen strikt voorschrift voor het aantal pagina's. Maar een goed wetenschappelijk rapport moet niet langer zijn dan nodig. Van elk Workshop die jullie uitvoeren in het kader van deze cursus, zullen jullie dergelijk wetenschappelijk rapport schrijven. De kwaliteit van deze rapporten zal een belangrijke factor zijn voor het eindcijfer van deze cursus.

Wetenschappers moeten uiteraard ook mondeling kunnen rapporteren over hun activiteiten. Zo ook zullen jullie voor enkele van deze experimenten een presentatie geven. Dergelijke presentatie geeft een overzicht van het rapport en is ook een samenhangend geheel dat de wetenschapper in het publiek zowel de omkadering moet geven van de studie als de motivatie van de conclusie.

5. Waarschuwingen

Het proefondervindelijk onderzoeken, ontdekken of beschrijven van fenomenen in de natuur is geen gemakkelijke opdracht. Dergelijke activiteiten zijn meestal slechts succesvol indien de creativiteit uit verschillende invalshoeken samenkomen. Hierdoor is het nuttig om in groep problemen te bespreken en elkaar intellectueel te verrijken. Dit mag echter geen aanleiding geven tot het copieren van het werk van collega's. Ten eerste leert men heel weinig uit dergelijke kopieeractiviteit, maar is het ook illegaal. Ook in de internationale wetenschappelijke gemeenschap staan zware sancties op plagiaat en het vervalsen van meetgegevens. Bijgevolg ook voor dit opleidingsonderdeel zijn dergelijke praktijken niet toegestaan en kunnen die aanleiding geven tot ingrijpende sancties.

6. Examen

De rapporten ingeleverd tijdens het academiejaar tellen in totaal mee voor 50% in het eindcijfer voor deze cursus. De overige 50% kan je verdienen bij het uitvoeren van de examenproef en de taak betreffende de beschrijving van een belangrijk experiment.

Indien je totaalcijfer niet geslaagd is, kan je in een 2^{de} zittijd zowel de rapporten als het examen opnieuw doen. Ook voor de 2^{de} zittijd is 50% van het eindcijfer gebaseerd op de rapporten, en de overige 50% op de examenproef en de taak. Indien je de rapporten van de 1^{ste} zittijd ook ingeeft voor de 2^{de} zittijd, krijg je voor dit onderdeel uiteraard identiek dezelfde punten.

Hoofdstuk 2: **Basis instrumenten voor proefondervindelijk fysica**

Inhoud

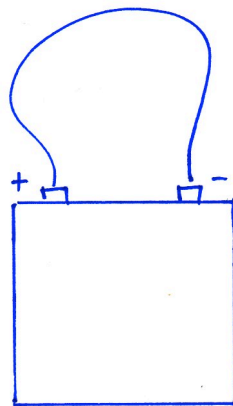
1. *Elektronische signalen en circuits*
2. *Gebruik en eigenschappen van kabels*
3. *Gebruik van stroom en batterijen*
4. *Multimeters*
5. *Oscilloscoop*
6. *Hoogspanning en laagspanning*
7. **Taak:** *wetmatigheden van een simpel elektronisch circuit*
8. **Workshop 1:** *bepalen van een weerstand*

1. Elektronisch signalen en circuits

In dit hoofdstuk zullen we de basisconcepten van elektrische circuits herhalen. Daar elektrische signalen overal voorkomen in ons dagelijks leven, is het essentieel hier inzicht in te krijgen. Ook al omdat bijna alle metingen in een modern laboratorium gebeuren aan de hand van een elektronisch signaal, bijgevolg het meten van een spanningsverschil. Het is uiteraard niet de bedoeling om jullie met dit hoofdstuk te vormen tot een electronicus.

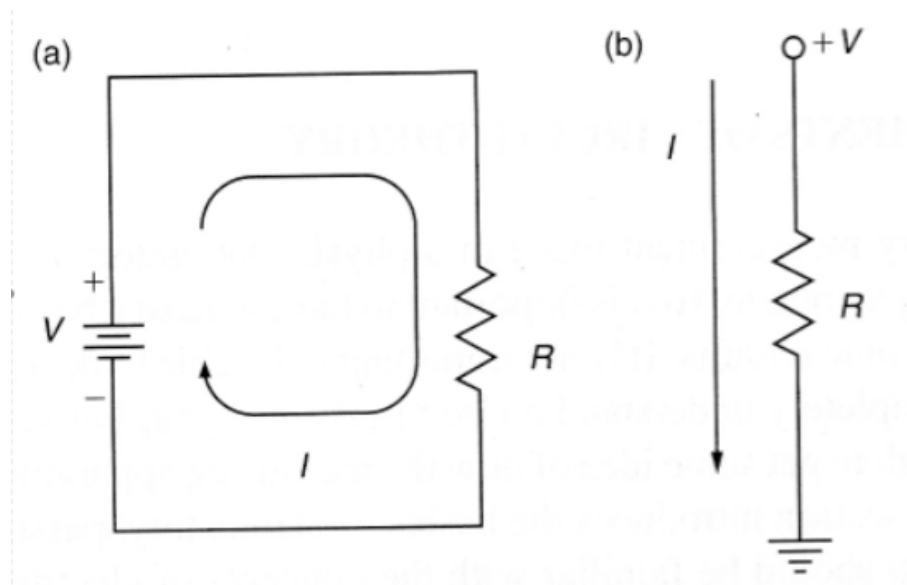
1.1. Basisbegrippen van elektrische stroomkringen

Beschouw het meest eenvoudig DC circuit in figuur 2.1. Het bestaat uit een stroomgeleidende draad die verbonden is met een batterij of een stroomgenerator. Een stroom zal lopen van de positieve potentiaal naar de negatieve potentiaal van de stroombron. Zolang de sterkte van de batterij en de weerstand van de stroomdraad constant blijven, zal ook de stroom constant blijven. Dergelijke tijdsafhankelijk circuit noemen we een gelijkstroom of *Direct Current* of DC circuit. Soms spreken we ook over gelijkspanning omdat het elektrisch potentiaalverschil tussen de twee contactpunten constant blijft.



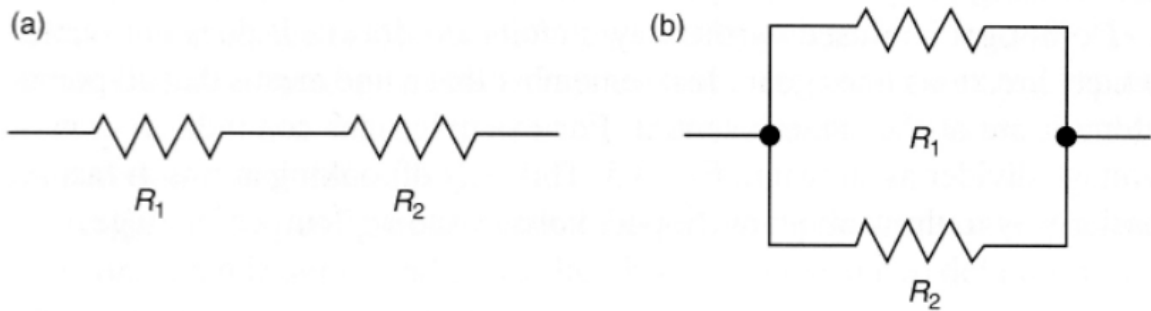
Figuur 2.1: Een stroomdraad die de twee uitgangen van een batterij verbindt.

Dergelijk schema kunnen we gemakshalve ook weergeven zoals in figuur 2.2. De batterij geeft de elektromotorische kracht of elektrische spanning V (eenheid Volt), of in het Engels *electromotive force* (emf), die de elektrische stroom I (eenheid Ampère) doorheen de weerstand R (eenheid Ohm) stuurt. Gezien enkel het spanningsverschil belangrijk is, kunnen we het linkse schema 2.2(a) ook verkort weergeven door het rechtse 2.2(b) waar alles is weergegeven relatief ten opzichte van een gemeenschappelijke aarding of grondpotentialiaal.



Figuur 2.2: Vereenvoudigde weergave van de elektrische stroomkring in figuur 2.1, de linkse als de rechtse notaties zijn equivalent.

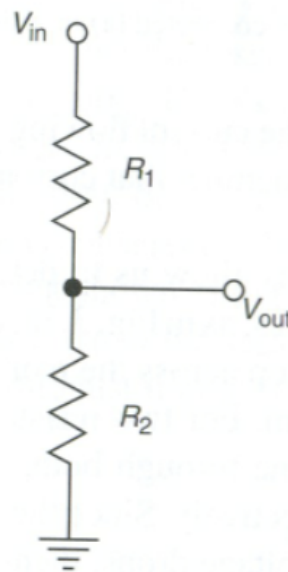
Het concept van elektrische potentiaal is gebaseerd op het concept van elektrische potentiële energie, en energie is uiteraard een behouden grootheid. Dit wil zeggen dat de totale verandering in elektrische potentiaal gelijk moet zijn aan nul indien we het volledige circuit doorlopen van figuur 2.2(a). Voor figuur 2.2(b) komt dit erop neer dat het voltage verlies over de weerstand R moet gelijk zijn aan V . Voor een ideale weerstand kan men dit bepalen aan de hand van de wet van Ohm, namelijk $V=I.R$. Ook de elektrische lading is een behouden grootheid, zo ook in dergelijke stroomkringen. De stroom van ladingen, $I=dq/dt$, wordt in elk punt in de stroomkring behouden. Bijgevolg moet de totale stroom die in het knooppunt toekomt gelijk zijn aan de totale stroom die uit het knooppunt wegstroomt.



Figuur 2.3: Weerstanden in serie (a) en in parallel (b) geschakeld.

Met deze eenvoudige concepten en behoudswetten, kunnen we de totale weerstand bepalen indien we verschillende weerstanden met enkel verbinden in een serie of in een parallel schakeling, zie figuur 2.3(a) en 2.3(b). In beide gevallen moet het voltage verschil over de totale weerstand gelijk zijn aan $V=IR$ waar I de stroom is die erdoor stroomt. Door de twee weerstanden in serie gaat een identieke stroom, bijgevolg is het spanningsverschil over beide gelijk aan respectievelijk IR_1 en IR_2 . Het voltage verschil over beide weerstanden moet de som zijn van beide spanningsverschillen. Dus we krijgen $IR=IR_1+IR_2$, en bijgevolg moeten we weerstanden in serie optellen als $R=R_1+R_2$. Indien de weerstanden in parallel staan moet het spanningsverschil over beide gelijk zijn, maar zal er wel een verschillende stroom doorheen de weerstanden lopen. We krijgen dus $IR=I_1R_1=I_2R_2$. Omdat lading een behouden grootte is, kunnen we met behulp van $I=I_1+I_2$, komen tot $R^{-1}=R_1^{-1}+R_2^{-1}$ voor weerstanden in parallel geschakeld.

Een veelgebruikt circuit is de zogenaamde spanningsverdeler of *voltage divider* zoals weergegeven in figuur 2.4. Er ontstaat een eenvoudig verband tussen binnenkomende spanning $V_{in}=I(R_1+R_2)$ en de uitgaande spanning $V_{out}=IR_2$. We hebben namelijk het verband $V_{out}=V_{in} \cdot (R_2/(R_1+R_2))$. Hiermee kunnen we dus van een batterij met een hoge spanning V_{in} herleiden tot naar een lagere spanning V_{out} . We kunnen dus artificieel een lagere spanning bekomen. Dit is heel nuttig om het meetbereik van een multimeter te vergroten (zie verder in deze cursus). Ook kan met hiermee een zogenaamde potentiometer construeren waar met de weerstand R_2 manueel kan veranderen om de uitgaande spanning te regelen. Denk maar aan een volumeregelaar van een geluidsinstallatie of een dimmer van een lichtpunt.



Figuur 2.4: Basisschema van een spanningsverdeler.

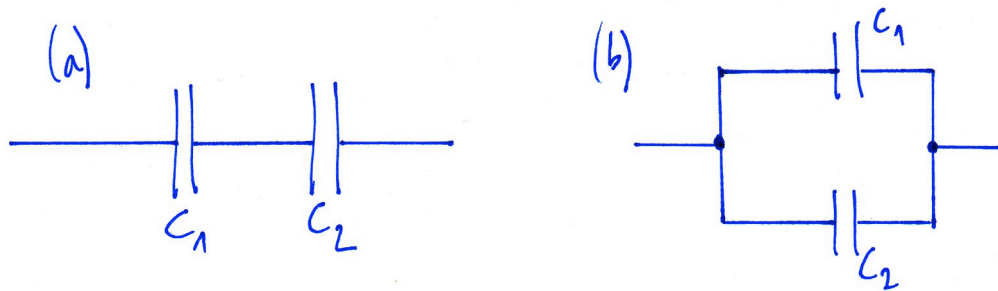
1.2. Condensatoren in wisselstroomkringen

Elke samenstelling van geleiders dat gebruikt kan worden om elektrische ladingen op te slaan, noemt met een condensator. Ze staan echter niet toe dat er elektrische ladingen doorheen stromen. Omdat er arbeid nodig is om die ladingen op te slaan, zal de condensator ook elektrische potentiële energie opslaan. Condensatoren komen voor in bijna alle elektronische toestellen die we dagelijks gebruiken. De meest eenvoudige condensator is een samenstelling van twee parallelle platen van geleiders met ertussen een isolator of een dielektricum. Indien de condensator een potentiaalverschil of spanningsverschil V heeft en langs beide kanten een ladingshoeveelheid q (eenheid Coulomb) bevat, dan definiëren we de capaciteit van de condensator als $C=q/V$ (eenheid de Farad). Een condensator die een lading van 1 Coulomb bevat en waarover een spanning van 1 Volt staat, heeft een capaciteit van 1 Farad. De capaciteit hangt af van de geometrische vorm van de twee geleiders. De meeste condensatoren die we gebruiken hebben een capaciteit van de orde van enkele microfarad (μF).

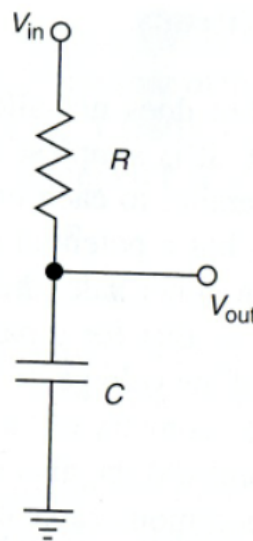
Voor gelijkstroom (DC) is een condensator weinig nuttig, gezien hij de stroom simpelweg blokkeert. Eenmaal we de stroom laten stromen, duurt het een korte tijd vooraleer de condensator opgeladen is, maar daarna zal de condensator de stroom blokkeren. Bij het aanleggen van een wisselstroom (AC of *Alternating Current*) wordt een condensator afwisselend opgeladen en ontladen.

Zoals voor weerstanden kunnen we ook nu de totale capaciteit bepalen van condensatoren die in serie of parallel geschakeld zijn. Uitgaande van de definitie van de capaciteit en de regel over het totale spanningsverschil is het eenvoudig om dit te berekenen. Omdat de bovenste platen van de twee condensatoren in een parallel schakeling, zie figuur 2.5(b), verbonden zijn, hebben ze dezelfde elektrische potentiaal. Dit geldt ook voor de twee onderste platen. Bijgevolg heerst eenzelfde

spanningsverschil in beide condensatoren in deze parallel schakeling. De ladingen zijn verdeeld over beide condensatoren, dus $q=q_1+q_2$, en we krijgen $Q=C_1V+C_2V$. Bijgevolg geldt voor condensatoren in parallel dat de totale capaciteit gelijk is aan $C=C_1+C_2$. Voor condensatoren in serie hebben we niet hetzelfde potentiaalverschil, maar ze bevatten wel dezelfde hoeveelheid ladingen. We krijgen voor het totale spanningsverschil $V=V_1+V_2=q/C_1+q/C_2$. Bijgevolg geldt voor condensatoren in serie dat de totale capaciteit gelijk is aan $C^{-1}=C_1^{-1}+C_2^{-1}$. We hebben dus omgekeerde regels voor het samenstellen van weerstanden en condensatoren.



Figuur 2.5: Condensatoren in parallel (a) en serie (b) geschakeld.



Figuur 2.6: Een spanningsverdeler met een condensator.

Beschouw nu een schema zoals voorgesteld in figuur 2.6. Indien we een gelijkstroom laten lopen, zal er dus geen stroom lopen doorheen de condensator. Bijgevolg zal de spanning V_{in} gelijk zijn aan de spanning V_{out} . Bijgevolg heeft dit schema geen enkel nut op het eerste zicht. Maar indien we een spanning gebruiken die verandert met de tijd, krijgen we andere effecten. Meestal krijgen we een verandering van de spanning volgens een sinus functie, maar laat ons beginnen met de meest eenvoudige verandering:

$$V_{in}(t) = 0 \text{ voor alle } t \leq 0$$

$$V_{in}(t) = V_0 \text{ voor alle } t > 0$$

Hierbij veronderstellen we dat er op tijdstip $t=0$ geen ladingen in de condensator zijn. Met deze spanning zal op $t>0$ de lading $q(t)$ een spanningsverschil produceren $V_{out}(t)=q(t)/C$ over de condensator. De stroom $I(t)=dq/dt$ door de spanningsverdeler geeft een spanningsverschil IR over de weerstand, en de som van de twee spanningsverschillen moet gelijk zijn aan V_0 . Bijgevolg krijgen we

$$V_0 = V_{out} + IR = V_{out} + R dq/dt = V_{out} + RC dV_{out}/dt$$

met $V_{out}(t=0)=0$. Dit is een differentiaal vergelijking die een eenvoudige oplossing heeft, namelijk

$$V_{out}(t) = V_0 (1 - e^{-t/RC})$$

We krijgen dus vanaf $t=0$ een stroom doorheen de weerstand en de ladingen zullen zich opstapelen aan de bovenste geleider in de condensator. Dit induceert een hoeveelheid ladingen aan de onderste geleider van de condensator waardoor de stroomkring verbonden wordt met de grond. Naar verloop van tijd wordt het steeds moeilijker om meer ladingen in de condensator op te slaan, en de spanning V_{out} bereikt zijn maximum, namelijk V_0 . We komen dan terug in het geval van de gelijkstroom (DC). Het gedrag van de stroomkring, ofwel AC ofwel DC, zal afhangen van de tijd relatief ten opzichte van de constante waarde van RC . Indien $t \ll RC$ hebben we een duidelijk AC gedrag, terwijl indien $t \gg RC$ de condensator reeds volledig opgeladen is en we terugkomen op het DC gedrag.

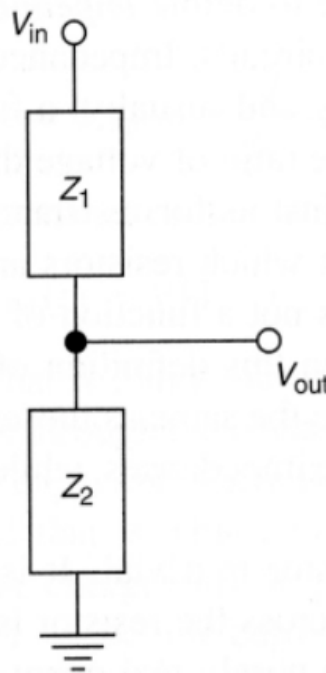
Met behulp van een Fouriertransformatie kan men de tijdsafhankelijkheid van een functie steeds weergeven als een combinatie van sinus en cosinus functies. In complexe notatie kunnen we schrijven

$$V(t) = V_{out}(t) = V_0 e^{i\omega t}$$

met hoekfrequentie $\omega=2\pi\nu$ en ν de frequentie of het aantal oscillaties per seconde. Indien we deze spanning meten, meten we het reële deel van deze complexe uitdrukking. Het voordeel is dat deze complexe uitdrukking gemakkelijk te differentiëren en integreren is.

We kunnen het concept van een weerstand in een AC kring veralgemenen tot het concept van impedantie Z . De impedantie (eenheid is Ohm) is de verhouding van het potentiaal of spanningsverschil en de stroom doorheen een elektrische component. Dit is gebruikelijk een complexe functie die afhankelijk is van de hoekfrequentie ω . Gegeven de definitie van de impedantie, komt met tot dezelfde optelregels voor impedanties in parallel of serie geschakeld. Een weerstand is een "passieve" component in een stroomkring omdat het frequentie onafhankelijk is, en met noteert eenvoudig $Z=R$. Een voorbeeld van een "actieve" component is een condensator omdat zijn impedantie frequentie afhankelijk is. Met behulp van $V(t) = V_0 e^{i\omega t} = q/C$ en $I = dq/dt = i\omega C.V_0.e^{i\omega t}$, komen we tot $Z(\omega) = 1/(i\omega C)$ als impedantie voor een condensator. Bij lage frequenties ten opzichte van de waarde RC , namelijk $\omega \ll RC$ wordt Z zeer groot en benaderen we de limiet van een gelijkspanning (DC). Bij hoge frequenties

echter, $\omega \gg RC$, wordt de impedantie zeer klein en benadert met de situatie van een kortsluiting, de stroom gaat namelijk gewoon door.



Figuur 2.7: De veralgemeende spanningsverdeler.

We kunnen het schema van de spanningsverdeler veralgemenen met impedanties, zie figuur 2.7. Nu kunnen we AC kringen beschouwen met actieve componenten. We bekommen net als vroeger de uitdrukking

$$V_{out}(t,\omega) = V_{in}(t,\omega) \frac{Z_2}{(Z_1+Z_2)} = V_{in}(t,\omega) g e^{i\phi}$$

waar we de verhouding van de impedanties geschreven hebben als een complex getal, met twee reële getallen g en ϕ . De waarde van $g = |V_{out}|/|V_{in}|$ interpreteren we als de "gain" van de stroomkring en de waarde van ϕ is de faseverschuiving van het uitgaand signaal ten opzichte van het inkomend signaal. Voor de simpele spanningsverdeler bestaande uit weerstanden krijgen we $g = R_2/(R_1+R_2)$ en $\phi=0$. Indien $V_{in}(t,\omega)=V_0 \cdot e^{i\omega t}$ krijgen we

$$V_{out}(t,\omega) = g \cdot V_0 \cdot e^{i\omega t + \phi}$$

waarvan het reële deel gelijk is aan

$$\begin{aligned} V_{in}(t,\omega) &= V_0 \cdot \cos(\omega t) \\ V_{out}(t,\omega) &= g \cdot V_0 \cdot \cos(\omega t + \phi) \end{aligned}$$

Deze functies zijn weergegeven in figuur 2.8. Het maximum van de $V_{out}(t,w)$ functie is verschoven ten opzichte van het maximum van de $V_{in}(t,w)$ functie met een tijd van $t' = -(\phi/2\pi) \cdot T = -\phi/\omega$ omdat de periode van de inkomende spanning gelijk is aan $T = 2\pi/\omega$.

Men kan dit nagaan door te stellen dat bij $t=0$ de inkomende spanning maximaal is, terwijl de uitgaande spanning maximaal is voor $t=t'$.

Laat ons nu terugkeren naar de spanningsverdeler van figuur 2.6 met een weerstand en een condensator. Uitgaande van de veralgemening hierboven krijgen we

$$V_{out}(t,\omega) = V_{in}(t,\omega) \cdot (i\omega C)^{-1} / [R + (i\omega C)^{-1}] = V_{in}(t,\omega) \cdot 1 / (1 + i\omega RC)$$

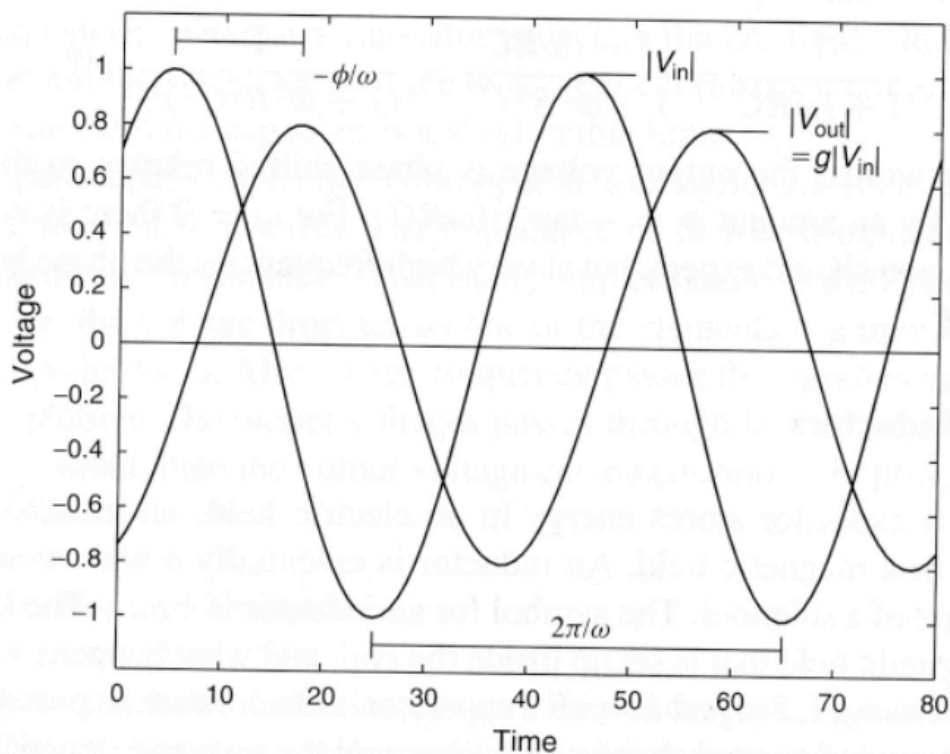
Waar de "gain" g gelijk is aan de verhouding van de amplitude

$$g = |V_{out}(t,\omega) / V_{in}(t,\omega)| = (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{-1/2}$$

Bijgevolg indien $\omega=0$ krijgen we een gelijkstroomkring (DC) en dus $g=1$. Indien de hoekfrequentie ω heel groot wordt, krijgen we een "gain" g die nul benadert. De "gain" g is steeds tussen 0 en 1. De "gain" g is gelijk aan $(1/2)^{1/2}$ indien $\omega=(RC)^{-1}$. Dit is niets nieuws vergeleken met vroeger. Wel nieuw is de fase ϕ van het uitgaande signaal ten opzichte van het inkomende signaal. Een complex getal z kan men steeds schrijven als $z=|z|.e^{i\phi}$ met $\phi=\tan^{-1}(\text{Im}(z)/\text{Re}(z))$ de fase van z . Dus kunnen we schrijven

$$V_{out}(t,\omega) = V_{in}(t,\omega) \cdot (1 + i\omega RC)^{-1} = V_{in}(t,\omega) \cdot (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{-1/2} \cdot e^{i\phi}$$

met $\phi = -\tan^{-1}(\omega RC)$ omdat we $z=1-i\omega RC$ nemen. Indien $\omega=0$ is er geen faseverschuiving, maar indien $\omega \gg 1/(RC)$ krijgen we een faseverschuiving van $\phi=-90^\circ$.



Figuur 2.8: Voorstelling van de inkomende en uitgaande spanningen.

1.3. Inductoren of spoelen

Terwijl een condensator energie opslaat in een elektrisch veld, zal een inductor of spoel energie opslaan in een magnetisch veld. Een spoel is een actieve component in een elektrische stroomkring genoteerd met L . Het gedrag zal bijgevolg veranderen indien we de stroom en spanning met de tijd veranderen. Dus is de werking ook afhankelijk van de hoekfrequentie ω . Een spoel heeft een zelfinductie $L=N\cdot\Phi/I$ (eenheid is Henry of Tesla.m²/Ampère) waar N het aantal windingen is van de spoel en Φ de magnetische flux in de spoel gegenereerd door de stroom I . Hoe groter de zelfinductie van de spoel, hoe groter de capaciteit van de spoel om energie op te slaan. Een ideale spoel heeft geen weerstand en geen capaciteit. In de realiteit kan dit anders zijn. Met telt spoelen in parallel of serie geschakeld op net zoals weerstanden.

Een verandering van de stroom I geeft ook een verandering van de magnetische flux Φ . Dit geeft een spanning $V=L\cdot dI/dt$. Indien we schrijven $V=I\cdot Z$ met $I=I_0\cdot e^{i\omega t}$ dan krijgen we $Z=i\omega L$ welke we kunnen gebruiken voor de berekeningen in de spanningsverdeler om V_{out} te bepalen. We zien dat we het tegengestelde effect krijgen als bij een condensator. Namelijk wanneer de hoekfrequentie ω klein wordt, zal de impedantie Z ook klein worden wat overeenkomt met een kortsluiting van de stroomkring. Voor hoge hoekfrequenties ω krijgen we een hoge impedantie net zoals het is moest de draad gewoon doorgesneden zijn.

Een stroomkring waar we weerstanden, condensatoren en spoelen combineren (een LRC circuit) wordt in de praktijk gebruikt voor het filteren van bepaalde signaal frequenties. De spanning bij een bepaalde resonantie hoekfrequentie ω zal groot zijn ten opzichte van andere hoekfrequenties. Dit vind men in radio's met een analoge tuner om de ontvangst af te stellen op de juiste frequentie. Zowel spoelen, weerstanden en condensatoren zijn lineaire componenten omdat er een lineair verband is tussen de spanning en de stroom, namelijk $V=I\cdot Z$. Diodes en transistors zijn echter niet-lineaire componenten. De studie van dergelijke componenten en stroomkringen behoort tot het studiedomein van andere cursussen.

2. Gebruik en eigenschappen van kabels

Bijna alle metingen die we zullen uitvoeren, gebeuren aan de hand van een elektrisch signaal, dus een spanningsverschil. Om deze informatie te meten hebben we kabels nodig die het signaal overbrengen tussen de componenten en de meetinstrumenten die we zullen gebruiken. Het is belangrijk de juiste kabels te kiezen voor de specifieke toepassing waarvoor we ze gebruiken. Een kabel moet een elektrisch signaal geleiden, dus bestaat uit een geleidend materiaal. Meestal is dat koper of aluminium. Om geen kortsluitingen te maken met mogelijke potentiaalverschillen met de omgeving, isoleren we de geleider met een isolerend materiaal (meestal een vorm van plastic). Indien we met de kabel kleine signalen moeten overbrengen, dan moeten we deze kabel zeker afschermen van externe elektromagnetische invloeden. Dit om ruis op het signaal te onderdrukken. Een voorbeeld hiervan is een coaxkabel die in het midden bestaat uit een geleider die het signaal overbrengt, daar rond een isolator met een hoge dielectrische constante en nog eens daar rond een tweede geleider die de

externe signalen naar de binnenste geleider afschermt. De buitenste geleider is meestal een dunne metaalfolie. Alles is uiteraard ingesloten in een buitenste laag van een isolerend materiaal. Met een coaxkabel kunnen we ook elektronische pulsen doorgeven.

We willen uiteraard dat het spanningsverschil tussen het begin en het einde van de kabel zo klein mogelijk is vergeleken met de reële spanningsverschillen die we willen meten. Indien we hiervoor de wet van Ohm bekijken, $V=IR$, moeten we de weerstand zo klein mogelijk houden. Deze weerstand R kan mijn bepalen aan de hand van

$$R = \rho \cdot L/A$$

met L de lengte van de kabel, A de oppervlakte van de doorsnede en ρ de soortelijke weerstand van de gebruikte geleider (in Ωm). Dus hoe korter de kabel en hoe dikker de kabel hoe beter. Koper heeft een kleine soortelijke weerstand $\rho=1.69 \times 10^{-8} \Omega\text{cm}$ en is gemakkelijk te vormen in diverse geometrieën. Zilver heeft een iets kleinere soortelijke weerstand, terwijl die van aluminium bijna twee keer zo groot is. De soortelijke weerstand van een geleider stijgt indien de temperatuur stijgt. Het uitgestraalde vermogen van een kabel is $P=I^2R$ en zal de kabel opwarmen. Indien we bijgevolg een grote stroom willen geleiden, moeten we ook voor de nodige koeling zorgen. Zoniet zal de kabel blijven opwarmen en in het extreme geval doorbranden. Een oplossing hiervoor is om heel dikke kabels te gebruiken met een intern koelsysteem, bijvoorbeeld water dat vanbinnen stroomt.

Een coaxkabel heeft een karakteristieke impedantie omdat het signalen doorzendt als een verandering van elektrische en magnetische velden. De kabel zelf heeft een karakteristieke capaciteit en zelfinductie, namelijk

$$C = 2\pi\epsilon L / \ln(b/a)$$

$$L = \mu L \ln(b/a) / 2\pi$$

met a en b de straal van de binnenste en buitenste geleider respectievelijk. De grootheden ϵ en μ zijn respectievelijk de permittiviteit en permeabiliteit van het dielektricum, en L is de lengte van de kabel. De karakteristieke impedantie Z_c van de kabel is

$$Z_c = (L/C)^{1/2} = (1/2\pi) (\mu/\epsilon)^{1/2} \ln(b/a)$$

en heeft meestal een typische waarde tussen 50Ω en 200Ω . Men moet steeds deze karakteristieke impedantie Z_c vergelijken met de input impedantie Z_L wanneer we coaxkabels verbinden. De reflectie coëfficiënt Γ definieert men als de verhouding van de stroom gereflecteerd aan het einde van de kabel en de binnenkomende stroom aan dat einde, en is gegeven door

$$\Gamma = (Z_L - Z_c) / (Z_L + Z_c)$$

Indien bijvoorbeeld een signaal door de kabel gaat en de kabel is aan het einde niet aangesloten ($Z_L = \infty$) dan is $\Gamma=1$. Bijgevolg is het signaal onmiddellijk gereflecteerd.

Indien andersom aan het einde van de kabel het signaal verbonden wordt met de buitenste geleider ($Z_L=0$), krijgen we $\Gamma=-1$ en wordt het signaal geïnverteerd gereflecteerd. Het ideale geval is indien de input impedantie even groot is als de impedantie van de coaxkabel. In dit geval is er geen verlies aan het einde van de kabel ($\Gamma=0$) en wordt het volledige signaal overgebracht. We moeten er dus voor zorgen dat bij de connecties van coaxkabels de impedantie niet te sterk verandert, of we verliezen het signaal.

3. Gebruik van stroom en batterijen

De meeste instrumenten in het laboratorium moet men voeden met een elektrische stroom en die moet uiteraard van ergens komen. Uit onze stopcontacten in België komt gewoonlijk een spanningsverschil van 220 V met een frequentie van 50 Hz. Bijgevolg een wisselstroom (AC). De instrumenten in het laboratorium vragen echter een constante spanning (DC). Men kan natuurlijk een batterij gebruiken om de instrumenten te voeden met DC, maar indien de toestellen een grote stroom trekken, zal de batterij snel leeg zijn. Als oefening kan je bijvoorbeeld eens narekenen hoe lang het duurt vooraleer een typische autobatterij leeg is indien we de beide koplampen laten aan staan en de motor uitzetten (huiswerk!).

Om onze instrumenten te voeden zullen we een DC voedingsbron ("*power supply*") gebruiken die zelf stroom krijgt van de AC bron uit onze stopcontacten. We kennen twee categorieën van voedingsbronnen, namelijk spanningsbronnen en stroombronnen. Bij spanningsbronnen wordt de spanning constant gehouden onafhankelijk van hoeveel stroom er getrokken wordt. Er is bijgevolg een maximale stroom voor dergelijke voedingen, en dus ook een maximaal vermogen, $P=IV$. Een voedingsbron die een constante spanning geeft is bruikbaar voor bijna alle instrumenten in het laboratorium. Stroombronnen daarentegen houden de stroom constant en dit is nuttig als men met magneetvelden werkt. De magnetische veldsterkte is namelijk evenredig met de stroom die door een magneet loopt. Voedingsbronnen hebben ook een interne of effectieve weerstand. Indien er een stroom loopt doorheen deze weerstand zal er bijgevolg een spanningsverschil ontstaan. De meeste voedingsbronnen zijn polyvalent en hebben een schakelaar om over te schakelen tussen spanningsbronnen en stroombronnen.

Bij sommige experimenten is het ook nodig om een specifieke tijdsafhankelijke spanning $V(t)$ te genereren. Dit is meestal onder de vorm van golven zoals sinussen, maar kan ook om het even welke vorm aannemen zoals blokvormen of piekvormen. Ook kan de frequentie verschillende waarden aannemen of kan men met pulsen werken. Bestudeer steeds de intrinsieke eigenschappen van dergelijke instrumenten vooraleer die te gebruiken voor je experimenten.

4. Multimeters

Nu ben je klaar om een stroomkring te bouwen omdat je kennis hebt van de meer frequente elektronische componenten die erin kunnen voorkomen, de kabels om deze te verbinden en de mogelijke voedingsbronnen om de stroomkring te laten functioneren. Eenmaal we dergelijke stroomkringen opbouwen, wensen we ook de eigenschappen ervan op te meten, zoals bijvoorbeeld de spanningsverschillen tussen

verschillende punten in het elektrisch schema. Indien we met gelijkstroom werken (DC) is de eenvoudigste manier om dergelijke metingen uit te voeren door gebruik te maken van een multimeter. Multimeters zijn zoals de naam het zegt multifunctioneel en kunnen meestal zowel de spanning, de stroom als direct de weerstand meten. Vergeet niet dat deze meetinstrumenten een gemiddelde nemen van hun meetgrootte over een zeker tijdsinterval. Indien er fluctuaties zijn van bijvoorbeeld de spanning binnen dit tijdsinterval zullen die niet observeerbaar zijn. Slechts het gemiddelde wordt genomen van de gemeten grootte over het tijdsinterval. Vergeet ook niet dat multimeters een intrinsieke of effectieve input impedantie hebben. Bijgevolg zullen ze de spanning die je tracht te meten een beetje veranderen. Ga dit steeds na! Stel een methode op om deze intrinsieke impedantie empirisch te bepalen. Je zal zien dat een spanningsmeter bijvoorbeeld een zeer grote intrinsieke input impedantie moet hebben om deze effecten te verwaarlozen. Voor stroommeters hebben we uiteraard een kleine weerstand nodig. Een overzicht van verschillende aspecten van het gebruik van multimeters kan je vinden in je cursus "Meten en experimenteren" uit het eerste Bachelor jaar Fysica onder de titel "Basismetingen in de elektriciteit met V- Ω -A meter".

5. Oscilloscoop

Met een oscilloscoop kunnen we de spanning meten in functie van de tijd, bijgevolg krijgen we $V(t)$ weergegeven op een scherm (cathodestraalbuis). Het spanningsverschil dat we opmeten, wordt toegepast in de cathodestraalbuis om de stralen vertikaal af te buigen. Hierdoor is de uitwijking van de straal lineair evenredig met de gemeten spanning. Met behulp van het grid patroon op het scherm van de oscilloscoop kan men de spanning aflezen. De horizontale afwijking van de stralen wordt gecontroleerd door een sweepgenerator waar de oscilloscoop met een zekere frequentie het spanningspatroon weergeeft. Indien het signaal zelf voorkomt met een zekere frequentie en dus om de zoveel tijd eenzelfde patroon geeft, wil men uiteraard voor elke "sweep" eenzelfde periode hebben die een veelvoud is van de periode van het signaalpatroon. Dit is voorzien met de oscilloscoop doormiddel van een trigger systeem. Hiermee kan je instellen bij welke typische karakteristiek je een trigger geeft voor de start van een periode waar je het signaal wil weergeven op het scherm van de oscilloscoop. Dit kan bijvoorbeeld zijn iedere keer dat het signaal $V(t)$ boven een zekere waarde komt, of simpelweg de frequentie van de inkomende spanning (50Hz). Een oscilloscoop heeft bijna altijd twee ingangen, waar je de eerste kan gebruiken om te triggeren en de tweede om het signaal weer te geven. Dit kan soms nuttig zijn om twee partonen te vergelijken en faseverschillen te bepalen. Meestal is er een automatisch functie waarmee de oscilloscoop zelf zal triggeren als er de trigger criteria niet voldaan is na een zekere tijd. Een overzicht van de werking van een oscilloscoop kan je vinden in de cursus "Meten en experimenteren" van het eerste Bachelor jaar Fysica.

6. Hoogspanning en laagspanning

Beschouw het als jullie taak om na te gaan wat we in ons leven kunnen doen met hoogspanning en laagspanning. Schrijf je bevindingen en/of ideeën op 2 pagina's. Wat is hoogspanning ten opzichte van laagspanning? Waarom hebben wij hoogspanning nodig en wat zijn de eigenschappen? Wat zijn de gevaren van hoog- en laagspanning?

7. Taak: wetmatigheden van een simpel elektrisch circuit

We bekijken hier een eenvoudig elektrisch circuit dat bestaat uit een kubus van gelijke weerstanden. Eerst zal je voorspellen wat de uitkomst is van een meting van de weerstand tussen twee hoekpunten van de kubus, daarna zal je die ook effectief empirisch bepalen. Dit is bijgevolg een eenvoudige proefondervindelijke test van de concepten van elektrische circuits.

Ga ook na of je geen verschillende weerstanden hebt tussen verschillende hoekpunten van de kubus. Hoe zou dit mogelijk zijn? Wat is de precisie waarmee je de weerstand kan meten? Moet men geen rekening houden met de interne weerstand van je multimeter? Zo ja, hoe ga je die bepalen? Kan deze interne weerstand de spanningsverschillen die je meet beïnvloeden? Zo ja, hoe ga je daarmee om?

Voor deze taak moet je uiteraard geen uitgebreid verslag schrijven. Noteer je berekeningen in je laboschrift, alsook je metingen. Noteer ook de precisie van de metingen en hoe je aan deze informatie komt. Met een kort verslag van maximaal 2 pagina's beschrijf je kort je berekeningen, metingen, bevindingen, bedenkingen en conclusie. Dit geef je aan de assistent bij het begin van de volgende les.

8. Workshop 1: bepalen van een weerstand

Hier beginnen we met de eerste proefondervindelijk workshop. Het is een eenvoudig experiment waar we concepten gebruiken die je reeds kent en in dit hoofdstuk werden herhaalt. We gebruiken dezelfde multimeter als diegene die we in dit hoofdstuk reeds gebruikt hebben voor de metingen. Hiermee zal je de proefondervindelijke werkwijze leren die je ook nodig hebt voor de volgende workshops die een grotere uitdaging zullen vormen.

Het concept van de brug van Wheatstone is bijna 200 jaar oud en wordt gebruikt om de weerstand te bepalen. Het is nu aan jullie om deze concepten op te zoeken en te bestuderen. Tijdens het labo zal je een elektronische component krijgen waarvan je de weerstand moet bepalen met behulp van een brug van Wheatstone. Je zal dus voordien nagaan welke instrumenten je zal gebruiken, alsook de berekeningen kan je voordien uitvoeren in je laboschrift. Alle mogelijke externe factoren kan je voordien bestuderen. Tijdens het uitvoeren van het experiment zelf, kan je uiteraard steeds met professor of assistenten discussiëren over de verschillende concepten en/of technieken.

Je kan ook eens nadenken waar men dergelijke techniek van de brug van Wheatstone zou kunnen toepassen. Zou je de brug van Wheatstone ook kunnen gebruiken om de weerstand tussen de uiterste punten van je kubus te bepalen?

Je werkwijze zal in je laboschrift genoteerd worden volgens de richtlijnen die uiteengezet werden voor de rapportering. Je laboschrift dien je in ten laatste zoals vermeld op het rooster bij professor of assistenten (of bij afwezigheid bij het

secretariaat). Om alle problemen met papierwerk te vermijden, moet je je rapport indienen via email.

Eenmaal je de brug van Wheatstone hebt gebruikt om een weerstand te bepalen, kan je dit concept ook uitbreiden. Toon aan hoe je het concept van de brug van Wheatstone kan gebruiken om een capaciteit C of zelfinductie L van een elektronische component empirisch te bepalen. Dit zal je niet expliciet in het labo moeten uitvoeren maar is wel onderdeel van je verslag.

Hoofdstuk 3:

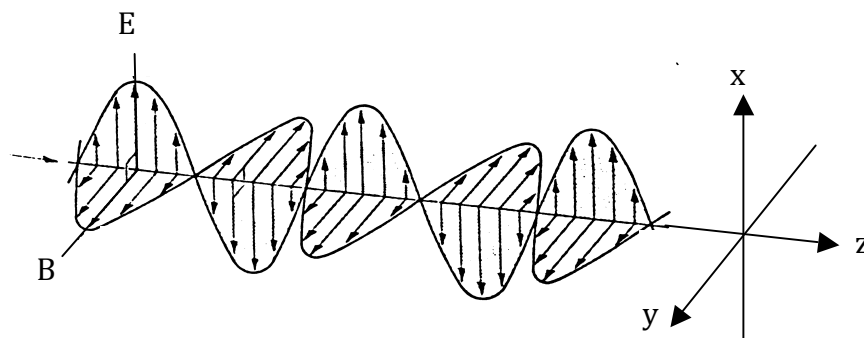
Proefondervindelijke aspecten van straling

Inhoud

1. *Wat is licht: korte herhaling*
2. *Polarisatie van licht*
3. **Workshop 2:** *proefondervindelijke aspecten van polarisatie*
4. **Workshop 3:** *interferentie en diffractie aspecten van licht*
5. *Wat is radioactiviteit: korte herhaling*
6. **Workshop 4:** *wetmatigheden van de radioactiviteit*
7. *Bijlage: werking van de goniometer*
8. *Bijlage: werking van een Geiger-Muller teller*

1. Wat is licht: korte herhaling

Licht is de dagelijkse benaming van een fenomeen dat eigenlijk elektromagnetische straling is. In het dagelijks leven spreken we uiteraard over zichtbaar licht, althans voor het menselijk oog (golflengte tussen 400 nm en 700 nm). Bijgevolg wordt licht beschreven door de vergelijkingen van Maxwell, waarmee we de intensiteit, polarisatie en frequentie kunnen bepalen. Dit zijn vier differentiaal vergelijkingen die de eigenschappen van het elektrisch en magnetisch veld beschrijven in de aanwezigheid van elektrische ladingen en stroomdichtheden. De oplossing van deze vergelijkingen in vacuüm geeft ons een elektromagnetische golf zoals voorgesteld in figuur 1. Met deze illustratie kan men duidelijk het oscillerend karakter zien van de sterkte van het elektrisch en magnetisch veld. Het betreft hier een vlakke golf waarvoor het elektrisch en magnetisch veld loodrecht op elkaar staan.

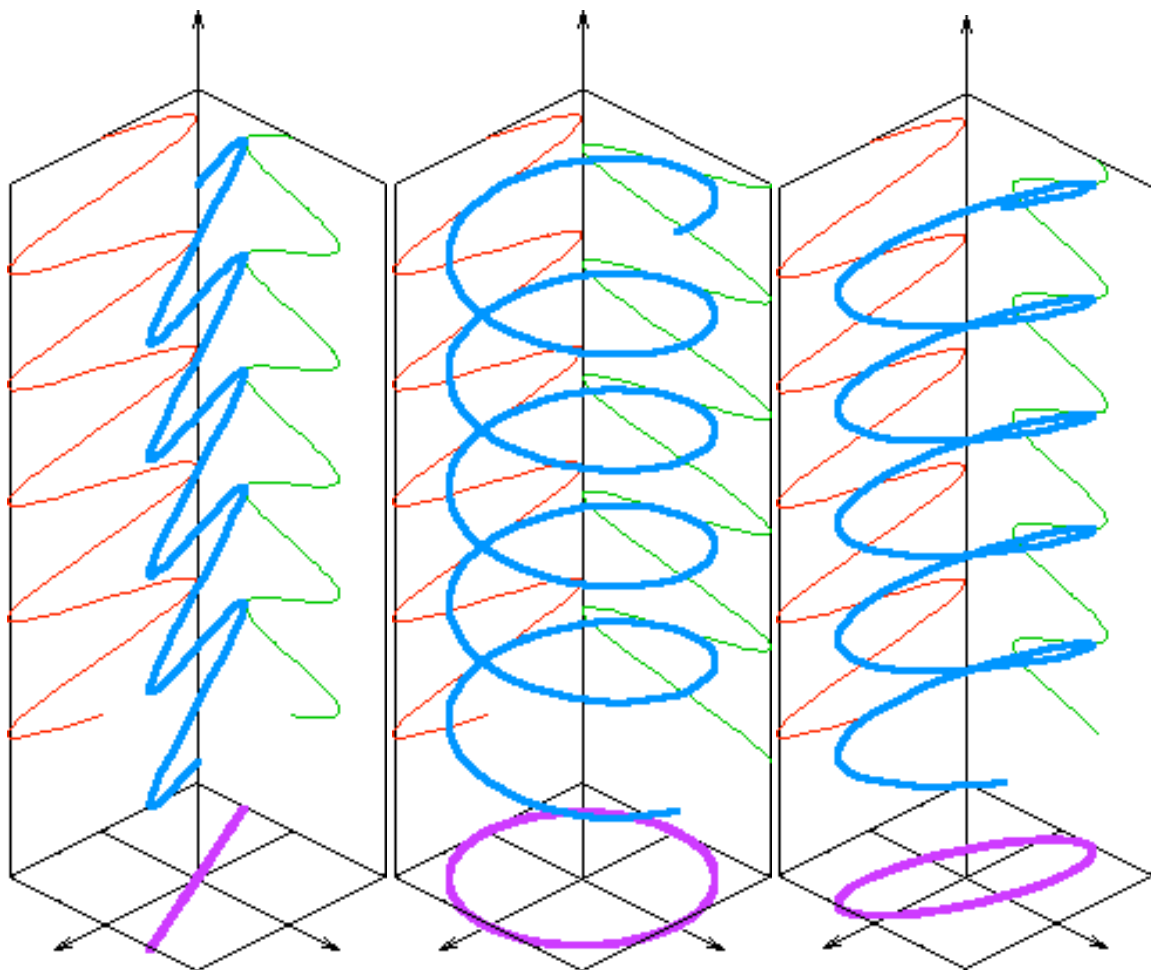


Figuur 1: Golfkarakter van de voortplanting van licht (hier een vlakke golf).

2. Polarisatie van licht

De oplossingen van de Maxwell vergelijkingen beschrijven de voortplanting van licht als een transversale golf of met andere woorden een golf waarvan de oscillaties gebeuren in het vlak transvers op de voortplantingsrichting. Een belangrijke

eigenschap van golven is de richting waarin de magnitude oscilleert wat aanleiding geeft tot polarisatie. Indien de oscillaties in een enkele richting gebeuren spreken we van lineaire polarisatie. Maar de oscillaties kunnen ook in verschillende richtingen gebeuren, wat aanleiding geeft tot circulaire of elliptische polarisatie. Voor vlakke golven weten we dat het elektrisch en magnetisch veld loodrecht op elkaar staan, en moeten we bijgevolg enkel de vector van het elektrisch veld beschouwen. Deze vector kunnen we beschrijven door de som te nemen van twee willekeurige loodrechte componenten, bijvoorbeeld langs de X en Y as in figuur 1. In figuur 2 wordt het verloop van de elektrische veld vector geïllustreerd aan de hand van de vectoriële som van twee loodrechte componenten. Afhankelijk van het faseverschil tussen de twee componenten krijgt men lineaire, circulaire of elliptische polarisatie.



Figuur 2: Lineaire, circulaire en elliptische polarisatie van een vlakke golf.

Het algemene geval is uiteraard elliptische polarisatie, waarvan lineaire polarisatie (perfect in fase) en circulaire polarisatie (90° uit fase) extremen zijn. In de natuur is licht afkomstig van verschillende bronnen, met dus vele onafhankelijke golven. Men spreekt van incoherent licht met een breed spectrum aan frequenties.

3. Workshop 2: proefondervindelijke aspecten van polarisatie

In deze workshop zullen we de concepten van gepolariseerd licht van nabij bestuderen. Hoe kunnen we in eerste instantie licht polariseren? Ga na en denk na

welke mogelijkheden er allemaal zijn, en motiveer uiteraard je bevindingen. We zullen in het labo twee mogelijkheden onderzoeken: door gebruik te maken van een polaroid filter en door terugkaatsing op een glad oppervlak.

Zoek op wat een polaroid filter is en bestudeer de eigenschappen hiervan. Wat gebeurt er indien niet gepolariseerd licht invalt op een polaroid? Wat gebeurt er indien gepolariseerd licht op een polaroid invalt? Ga specifiek voor lineair gepolariseerd licht na wat de intensiteit is nadat dit licht doorheen een polaroid gaat. Wat zijn de vrije parameters in dergelijke opstelling of van wat hangt de uitgaande intensiteit af? Kan je deze wetmatigheid proefondervindelijk testen doormiddel van een experiment? Stel vóór het effectieve labo een experiment voor in je laboschrift dat gebruik maakt van een of meerdere polaroid filters om deze wetmatigheid te testen. Tijdens het labo zullen we nagaan of je experiment inderdaad uitvoerbaar is en kan je met je eigen voorgestelde experiment, je eigen uitgewerkte wetmatigheid betreffende de polarisatie eigenschappen van licht testen. Denk voordien goed na over hoeveel metingen je wil uitvoeren en welke grafieken je eventueel wil maken om je wetenschappelijke wetmatigheden te argumenteren. Ga met je opstelling eens na of je eigen zonnebril een goede polaroid is (breng deze gerust mee tijdens de workshop!) en denk eens na wat de eigenschappen van een goede zonnebril moeten zijn.

Ook kunnen we door ongepolariseerd licht te laten terugkaatsen op een glad oppervlak, gepolariseerd licht verkrijgen. Het invallend licht zal slechts gedeeltelijk teruggekaatst worden, afhankelijk van de brekingsindex van het medium waar het inkomend licht zicht in bevindt en de brekingsindex van het materiaal van het gladde oppervlak. Geef een theoretische beschrijving hoe dit mogelijk is. Argumenteer met andere woorden dit idee. Hoe kunnen we dit concept proefondervindelijk testen? Je zal in het labo een goniometer krijgen om je experimenten uit te voeren. Het gebruik van deze goniometer wordt toegelicht in de bijlage in dit hoofdstuk en je zal het apparaat grondig leren gebruiken tijdens de workshop. Hiermee zal je nauwkeurig de inval- en uitvalshoek van het licht kunnen meten. Op deze draaitafel kunnen we ook een vlak oppervlak fixeren. Stel in je laboschrift een experiment voor waarmee je kan aantonen dat we inderdaad gepolariseerd licht kunnen bekomen door het terugkaatsen van ongepolariseerd licht op een vlak oppervlak. Vergeet niet dat je moet nadenken hoe je de lamp en kijker van de goniometer kan uitlijnen. Zal het uitgaand licht steeds eenzelfde polarisatie hebben? Motiveer je antwoord zowel in je laboschrift en in je verslag. Wat we reeds prijsgeven voor jullie is het volgende: bij een bepaalde invalshoek tussen het inkomend licht en het oppervlak, wordt het teruggekaatst licht volledig gepolariseerd. Hoe kan je dit theoretisch aantonen? Van welke fysische grootheden hangt de grootte van deze hoek af? Stel vóór het effectieve labo een theoretisch verband op tussen deze hoek en de afhankelijke fysische grootheden al of niet eigen aan de opstelling. Noteer alles duidelijk in je laboschrift, wat later de basis is voor je verslag. Ook deze wetmatigheid (die bijna 200 jaar oud is) zullen we nu proefondervindelijk testen. We zullen dus experimenteel deze hoek bepalen met behulp van de goniometer. Stel in je laboschrift een methode voor hoe je deze hoek kan bepalen met behulp van de goniometer en ga alle mogelijk stappen na die moeten gecontroleerd worden bij het uitvoeren van dit experiment. Denk goed na welke getallen en grafieken je experimenteel wil bepalen om je wetmatigheden op een wetenschappelijke manier te ondersteunen. Kan je aan de hand van deze hoek ook de brekingsindex van het gebruikte plaatje bepalen? Zo ja, doe dit.

Schrijf in je verslag ook waar we de polarisatie eigenschap van licht kunnen toepassen in ons dagelijks leven en/of in industriële toepassingen. Is er een verband met de wetmatigheden die je proefondervindelijk onderzocht hebt?

4. Workshop 3: interferentie en diffractie aspecten van licht

Het golfkarakter van licht of elektromagnetische straling komt onder andere tot uiting in interferentie en diffractie experimenten. De basisconcepten van interferentie en diffractie, alsook andere golfverschijnselen komen in verschillende cursussen aan bod en hiermee zijn jullie vertrouwd. Voor deze workshop moet je de leerstof over de concepten grondig onder de knie hebben. Het is leerzaam om in jullie laboschrift een opsomming te maken van toepassingen van interferentie en diffractie in het dagelijks leven of het wetenschappelijk onderzoek. Schrijf in je laboschrift ook de belangrijkste kenmerken op van interferentie en diffractie zodat je tijdens je proeven een leidraad hebt. Onder andere, wat is diffractie en wat is interferentie, en hoe verklaar je deze fenomenen.

Om de diffractie en interferentie fenomenen te bestuderen krijg je een optische balk met daarop een He-Ne laser die een nagenoeg evenwijdige, coherente, quasi-monochromatische lichtbundel produceert met een golflengte van 632.7 ± 0.1 nm. Let op: om je ogen te beschermen mag je niet rechtstreeks in de lichtbundel kijken! Je zal ook een scherm krijgen om op de optische balk te plaatsen, alsook een fotodiode waarmee je de intensiteit van het licht kan bepalen. Nu is het aan jullie...

1. Stel nu, uitgaande van onder andere bovenbeschreven materiaal, een eenvoudige proef voor waarmee je de diffractie fenomenen kan aantonen en het diffractiepatroon kan opmeten. Denk bijvoorbeeld aan het waarnemen van een Fraunhofer diffractiepatroon van het laserlicht nadat het een smalle spleet heeft gepasseerd. Met behulp van je kennis over golven kan je het resulterende diffractiepatroon voorspellen en zal je moeten nagaan dat je empirische observaties met je voorspelling overeenkomt. Tracht genoeg metingen te doen om er zeker van te zijn dat je voorspellingen (hopelijk) juist zijn.
2. Stel nu ook een eenvoudige proef voor waarmee je interferentie fenomenen kan aantonen en bestuderen. Denk bijvoorbeeld aan het waarnemen van een intensiteitspatroon nadat het laserlicht een dubbele spleet heeft gepasseerd. Hoe zal het waargenomen patroon afhangen van de afstand tussen beide spleten? Stel een methode op om uitgaande van de observatie van het intensiteitspatroon de afstand tussen de spleten te bepalen. Hou rekening met alle externe effecten die eventueel belangrijk zijn.
3. Je zal nu ook een rooster krijgen met meerdere parallelle spleten. Hiervoor moet je een opstelling en methode voorstellen om de afstand tussen de spleten te bepalen alsook de spleetbreedte uitgaande van het geobserveerde intensiteitspatroon. De afstand tussen alle spleten is identiek en ook hebben alle spleten eenzelfde breedte. Maak hiervoor gebruik van je kennis over interferentie en diffractie fenomenen.

Eenmaal je een proefopstelling hebt voorgesteld, moet je ook nagaan welke metingen je wenst te doen en hoeveel keer je deze wenst te doen. Denk bijgevolg ook na hoe je de onzekerheden zal bepalen, zowel de statistische als de systematische onzekerheden te wijten aan bijvoorbeeld de calibratie van je instrumenten.

Nadien zal je de afstand tussen de spleten en de spleetbreedte opmeten met een microscoop. Bijgevolg kan je je metingen via interferentie en diffractiefenomenen vergelijken met de metingen met behulp van de microscoop. Om aan te tonen dat beide overeenkomen, en je interpretaties van de golfverschijnselen en je proeven juist zijn, zal de bepalen van de onzekerheden dus essentieel zijn.

5. Wat is radioactiviteit: korte herhaling

Radioactiviteit is een natuurfenomeen en een oud concept in de fysica en heeft vooral in de laatste decennia een waaier van toepassingen gevonden vooral in de medische wereld. Het is een mooi voorbeeld van een fenomeen dat proefondervindelijk ontdekt werd door Becquerel in 1896. Vandaag kennen we drie soorten straling: α -straling, β -straling en γ -straling. Het radioactief verval van de atoomkernen kan men karakteriseren door middel van enkele typische grootheden. De vervalconstante λ is gedefinieerd als het aantal onstabiele atomen dat vervalst per seconde relatief ten opzichte van het oorspronkelijk aantal atomen N

$$\lambda = -(\Delta N/N) / \Delta t$$

waar de vervalconstante enkel afhankelijk is van de soort atoomkern. In de limiet dat $\Delta t \rightarrow 0$ kan men eenvoudig komen tot de differentiaalvergelijking

$$N(t) = N(t=0) \cdot \exp(-\lambda t)$$

Met $N(t=0)$ het oorspronkelijk aantal atomen. De activiteit uitgedrukt in Becquerel (Bq) geeft het aantal desintegraties per seconde van een blok materie. De halfwaardetijd is de tijd waarna nog de helft van de radioactieve materie overblijft, en is gegeven door

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

eenvoudigweg bekomen via vorige differentiaalvergelijking.

De interactie van de vrijgekomen straling met de materie kan atomen ioniseren. Ook deze interactie kan men karakteriseren door middel van een beperkt aantal grootheden. We beperken ons in deze cursus tot β - en γ -straling. Het elektron is het meest gekende deeltje voor β -straling, terwijl γ -straling eigenlijk elektromagnetische straling is met een groot doordringend vermogen. Het is duidelijk dat een hoeveelheid materie een fractie van de straling kan absorberen en de overige fractie zal via transmissie doorgaan. Hoe meer materie de straling moet doorkruisen, hoe groter de absorptie en hoe kleiner de transmissie. Dit levert een transmissiecurve van de flux van doorgaande straling als functie van de dikte van het absorberend materiaal. Bij

lage absorptiediktes verloopt de flux $F(x)$ bij een zekere dikte x van het materiaal volgens

$$F(x) = F(x=0) \cdot \exp(-\mu x)$$

met μ de lineaire absorptiecoëfficiënt. Men kan ook in plaats van de dikte x , de oppervlakedichtheid d gebruiken

$$d = \rho x$$

met ρ de dichtheid van het materiaal. Bijgevolg heeft d een eenheid van kg/m^2 en kunnen we het verband herschrijven als

$$F(d) = F(d=0) \cdot \exp(-\mu d/\rho)$$

Vanaf een bepaalde dikte van het materiaal wordt er geen straling meer doorgelaten. Dit noemen we de draagwijdte van de β -straling. Gezien voor grotere diktes de bovenstaande exponentiële uitdrukking niet geldig is, moet men nagaan of de draagwijdte via gewone extrapolatie kan bepaald worden. Uiteraard is er een verband tussen de draagwijdte van β -straling in een materiaal en de energie van de β -straling.

In tegenstelling tot de ionisatie die de β -straling stopt in een materiaal, zal de γ -straling wordt geabsorbeerd door foto-elektrisch effect, Compton-verstrooiing en paarproductie van een elektron en positron. Op gelijkaardige manier kan men een absorptievergelijking neerschrijven voor γ -straling

$$dI/dx = -\mu I$$

waar I de intensiteit is of het aantal deeltjes per seconde en per oppervlakte eenheid loodrecht op de stralingsrichting. Bijgevolg is

$$I(x) = I(x=0) \cdot \exp(-\mu d)$$

of

$$I(d) = I(d=0) \cdot \exp(-\mu d/\rho)$$

met ρ de soortelijke massa en d de oppervlakte dichtheid. Ook voor deze straling kan men een absorptiecurve bekomen.

6. Workshop 4: wetmatigheden van de radioactiviteit

Tijdens deze workshop zullen we het radioactief verval bestuderen van atoomkernen en de kenmerken van de straling die hierbij vrijkomt. We zullen dit doen met behulp van een Geiger-Muller teller, waarover meer uitleg in de bijlage.

- Bepaal de absorptiecoëfficiënt en de draagwijdte van β -stralen in aluminium. Hiervoor kan je de bron ^{36}Cl gebruiken met een halfwaardetijd van ongeveer $3,1 \cdot 10^5$ jaar. Beschadig de aluminium absorbers niet!
- Bepaal de halveringstijd van het $^{234\text{m}}\text{Pa}$ isotoop waarvoor we een zogenaamde ^{238}U -koe gebruiken. Zoek bijgevolg op hoe we via ^{238}U dit isotoop $^{234\text{m}}\text{Pa}$ kunnen bekomen
- Bepaal de absorptiecoëfficiënt van β -stralen en γ -stralen met behulp van een ^{22}Na bron in lood.

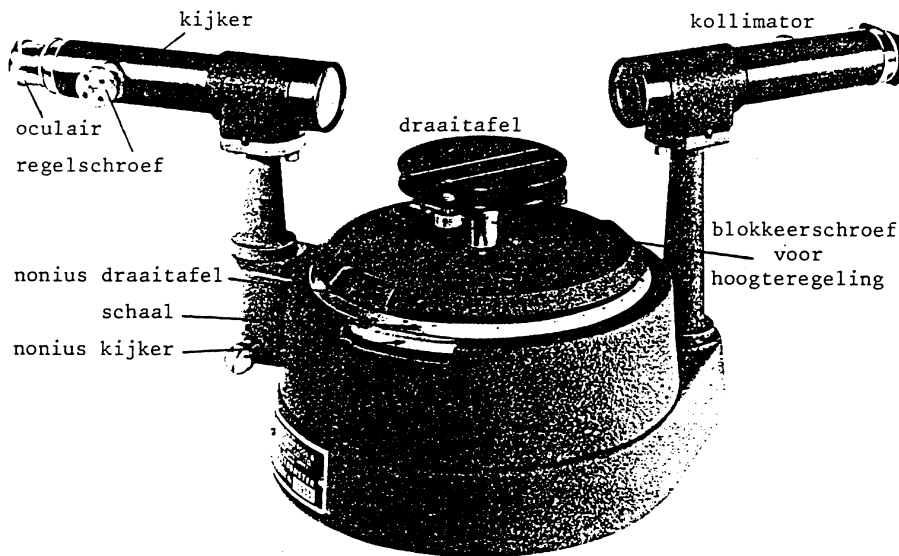
Stel voor elke doelstelling een proef voor die dit kan verwezenlijken en schrijf op hoe je te werk zal gaan, met welke effecten je rekening moet houden. Geef ook weer hoe je de verwerking van de empirische gegevens zal uitvoeren.

Voor de metingen die je uitvoert tijdens deze workshop zal je rekening moeten houden met verschillende externe factoren alsook de eigenschappen van de Geiger-Muller teller.

7. Bijlage: werking van de goniometer

De nauwkeurige meting van de invalshoek i bij het uitvoeren van jullie experimenten wordt uitgevoerd met een goniometer (zie figuur Go.1). Het bestaat uit:

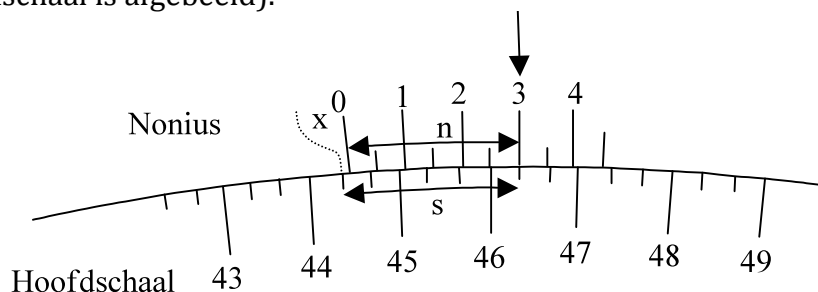
- Een horizontaal platform of **draaitafel**, waarop de te bestuderen voorwerpen (in dit geval het glasplaatje) kunnen opgesteld worden. Het platform kan draaien om een centrale, verticale as. Een nonius, verbonden aan het platform, beweegt zich langs een cirkelvormige gradenschaal, die dus van 0 tot 360° loopt. Een graad is onderverdeeld in drie gelijke delen, dus $20'$. De nonius dient om de aflezing te verfijnen (zie onder). Ter wille van het gebruiksgemak zijn er in feite twee noniussen verbonden met de draaitafel; ze staan juist 180° tegenover elkaar. Het platform kan vastgezet worden door middel van een fixerschroef. Kleine verplaatsingen kunnen dan nog gerealiseerd worden door te draaien aan een stelschroef.



Figuur Go.1 : Goniometer zoals gebruikt in jullie laboratorium.

- Een **kijker**, bestaande uit een oculair dat met de hand kan in- en uitgeschoven worden en een lenzensysteem dat kan verschoven worden door middel van een draaiknop. De kijker is eveneens draaibaar omheen de centrale, verticale as en zijn positie kan weer bepaald worden d.m.v. een nonius die langsheen een gegradueerde schaal schuift. Ook de kijker heeft twee noniussen die juist 180° tegenover elkaar staan. Hij bezit tevens een fixeer- en stelschroef.
- Een vast opgestelde collimator, met hetzelfde lenzensysteem en ook overigens dezelfde bouw als de kijker.

Zonder nonius zou je met deze goniometer metingen kunnen verrichten, nauwkeurig tot op $1/3^\circ$ of $20'$ (zie figuur Go.2 , waar slechts een gedeelte van nonius en hoofdschaal is afgebeeld).



Figuur Go.2: aflezen van de goniometer

Het nulstreepje van de noniusschaal geeft de eigenlijke positie van de kijker (of draaitafel) aan. Het kleinste hoofdschaalinterval is 20'. In het voorbeeld van Figuur Go.2 zouden we de kijkerpositie, zonder nonius, kunnen bepalen als: $44^{\circ}20' + x$. De vraag is dus, hoe groot is x ?

De nonius bestaat uit 40 gelijke intervallen. Deze 40 intervallen komen juist overeen met 39 intervallen van de hoofdschaal. Een nonius-interval is dus $39/40$ ste van een hoofdschaalinterval.

Op de figuur valt het streepje gemerkt "3" van de noniusschaal net samen met een streepje van de hoofdschaal. Gemeten vanaf deze streepjes is

$$x = s - n = 6 \text{ hoofdschaalintervallen} - 6 \text{ noniusintervallen}$$

$$x = 6 \text{ hoofdschaalintervallen} - 6 \times (39/40) \text{ hoofdschaalintervallen}$$

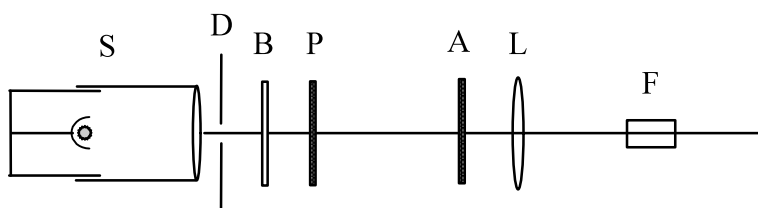
$$x = 6 \times (1/40) \text{ hoofdschaalinterval} = 3'$$

Het volstaat dus te zoeken naar het streepje van de noniusschaal dat zo goed mogelijk samenvalt met een streepje van de hoofdschaal en de noniusaanduidingen 0, 1, 2, ... te interpreteren als minuten en de tussenstreepjes als halve minuten (30") om te weten hoeveel je bij de hoofdschaalaanduiding moet bijtellen. De bepaling (in dit geval $44^{\circ}23'$) zal nu nauwkeurig zijn op 30".

Houd er wel rekening mee dat er zowel aan de kijker als aan de draaitafel twee aflezingen mogelijk zijn (twee plaatsen om af te lezen met 180 graden verschil).

Behalve de goniometer, gebruiken we een opstelling met de volgende componenten (zie figuur Go.3).

- Een 30 W gloeilamp S met diafragma D. Gebruik steeds het grootste diafragma.
- Een houder waarop enerzijds een blauw kleurfilter B, en anderzijds de polarisator P is gemonteerd.
- Een draaibare analysator A waarop hoekposities door middel van een nonius worden afgelezen.
- Een lens L en een fotodiode F.



Figuur Go.3: gebruikte componenten

(NB: De lens L is in feite de voorste lens van de kijker van de goniometer).

De lamp emitteert zowel zichtbaar licht als infrarood licht. De polaroid filters polariseren wel zichtbaar licht, maar geen infrarood licht. Het blauwfilter laat echter geen infrarood door. Het door dit filter doorgelaten licht kunnen we wel bijna volledig polariseren. Belangrijk: Let erop dat de polarisator geplaatst is zoals aangegeven, dwz achter, en niet voor het blauwfilter. Als de polarisator te dicht bij de lamp staat, kan

hij door warmte ontwikkeling voldoende smelten om het polarisatie-effect te verliezen. Dat is onherstelbaar.

De fotodiode is via een operationele versterker verbonden met een mA-meter. De uitwijking van de meter is evenredig met de lichtintensiteit uitgedrukt in W/m^2 of in lux (een lux is een "subjectieve" eenheid die overeenkomt met de intensiteit teweegebracht door een kaars op 1 meter afstand). De evenredigheidsfactor is niet gekend, en is ook niet van belang. De mA-meter en versterker zitten ingebouwd in een kastje waarvan het frontpaneel een schakelaar S met twee standen (" $\times 0.1$ " en " $\times 1$ "), en een draaiknop met drie standen (" 10^2 ", " 10^3 ", en " 10^4 ") bevat. Deze drie standen komen overeen met meetbereiken van 0-100, 0-1000 en 0-10000 relatieve eenheden (RE) (met schakelaar S op " $\times 1$ "), ofwel 0-10, 0-100 en 0-1000 RE (met schakelaar S op " $\times 0.1$ "). Om af te lezen moet je een drukknop op het frontpaneel indrukken.

8. Bijlage: werking van een Geiger-Muller teller

De beschrijving van deze apparatuur is essentiële kennis voor de workshop betreffende radioactiviteit. Deze teksten werden geschreven door Prof. Luit Slooten.

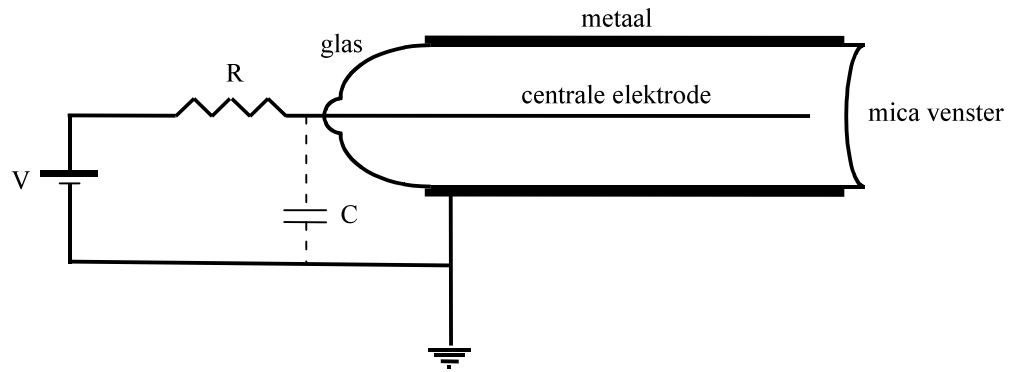
8.1. Geiger-Muller buis

De Geiger-Muller buis bestaat uit een metalen of gemetalliseerde glazen cilinder welke een dunne geleider omvat (Figuur GM.1). De twee elektroden welke we aldus gevormd hebben zijn van elkaar geïsoleerd; de centrale elektrode wordt uitgevoerd langs één einde van de cilinder; de andere zijde van de cilinder wordt afgedekt met een zeer dun mica venster; de "buis" is gevuld met een gas op lage druk.

Aan de centrale elektrode wordt een positieve spanning t.o.v. de wand aangelegd. De in stippellijn getekende condensator symboliseert de capaciteit C die bestaat tussen de centrale elektrode en het omhulsel (2 coaxiale geleiders). Deze wordt gegeven door:

$$C = \frac{Q}{V},$$

met Q de lading op -, en V de spanning tussen de elektroden. De detectie van de deeltjes is gebaseerd op het feit dat het invallende deeltje het gas ioniseert: zo worden elektron-ion paren gevormd. Onder invloed van het elektrisch veld verzamelen de elektronen zich op de centrale elektrode, terwijl de (positieve) ionen zich naar de wand begeven. Door keuze van een geschikte druk, gas en spanning kunnen we ervoor zorgen dat die vrije ladingen inderdaad de elektroden bereiken. In dat geval zal, bij doorgang van een ioniserend deeltje, de totale lading op de condensator C afnemen met een bedrag ΔQ .



Figuur GM.1

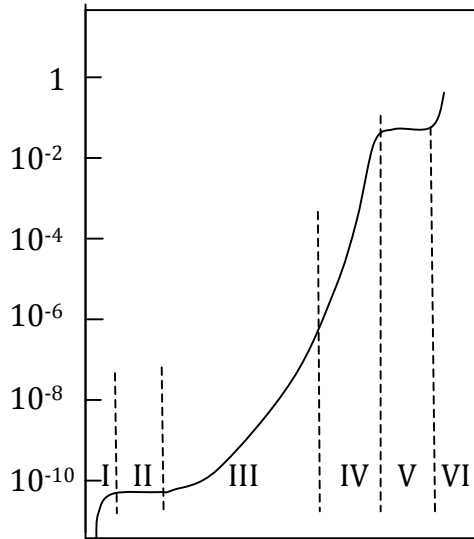
De spanning tussen de elektroden zal dan eveneens afnemen. De afname ΔV wordt gegeven door $\Delta V = \Delta Q/C$. Nadien verdwijnt die spanningspuls exponentieel met karakteristieke tijd ongeveer gelijk aan RC : over de G-M buis staat terug de voedingspanning V .

Elke puls correspondeert met één invallend deeltje, dus de buis fungeert in elk geval als teller (zie verder § 8.2). Verder is de grootte van de spanningspuls evenredig met ΔQ , dus met de gecreëerde lading, dus met het aantal ionisaties in die puls. Het aantal ionisaties per puls is op zijn beurt evenredig met de energie die wordt afgestaan door het invallende deeltje. De hoogte van de spanningspuls is dus een maat voor de energie afgestaan door het invallende deeltje. Bij een geschikte gasdruk staat het invallende deeltje al zijn energie af door ionisaties. In dat geval is de grootte van de puls evenredig met de energie van het invallende deeltje. Deze werking noemt men de werking als ionisatiekamer.

Vergroten we nu de gelijkspanning tussen de twee elektroden, dan zullen de vrije ladingen die bij een ionisatie ontstaan, zo versneld kunnen worden dat zij op hun beurt ionisaties teweeg brengen, zodat de puls versterkt wordt: in dit gebied werkt de buis als proportionele teller. Het voordeel is dat de pulshoogte nog steeds evenredig is met de energie van het invallende deeltje, maar dat de signalen 100 tot 10^4 maal groter zijn.

Als we nog hogere spanningen aanleggen zal een zeer groot aantal ionisaties veroorzaakt worden, en krijgen we een zeer groot signaal, maar niet meer evenredig met de energie van het invallende deeltje. Dit is de werking als Geiger-Muller teller: groot signaal, dat bijna zonder versterking een impulsteller kan sturen, maar we verliezen de informatie over de energie van het gedetecteerde deeltje. In Figuur GM.2 geven we een overzicht van de verschillende werkingsgebieden, voor β -deeltjes.

ΔV (Volt) (logschaal)



Zone:

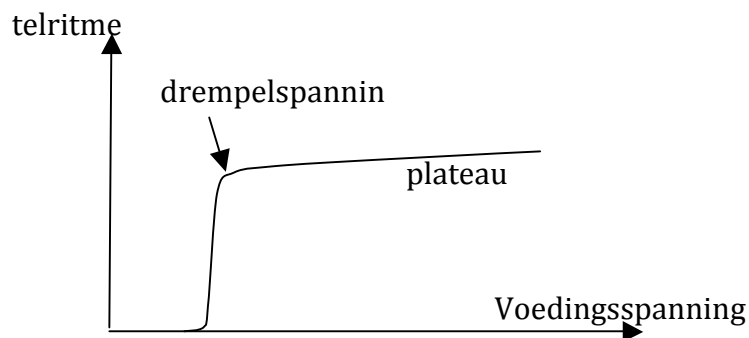
- I: recombinitie vóór het bereiken van de elektroden
- II: ionisatiekamer
- III: proportionele teller
- IV: niet-proportionele teller
- V: Geiger-Müller
- VI: doorslag buis

Voedingsspanning (Volt)

Figuur GM.2

8.2. Drempelspanning. Plateau. Dode tijd

De telbuis is verbonden met een elektronische teller (zie onder) die echter niet reageert op spanningspulsen kleiner dan 10^{-4} V. Dat betekent dat alleen de werkingsgebieden IV en V van Figuur GM.2 voor ons toegankelijk zijn. Als we de voedingsspanning verhogen (dus in gebied V brengen), wordt de gevoeligheid van de telbuis vlug bijna onafhankelijk van de aangelegde spanning: dit is het plateau. De spanning waarbij het plateau begint, noemen we de drempelspanning (zie Figuur GM.3). Meestal wordt de buis gebruikt bij een voedingsspanning die 50 à 100 Volt boven de drempelspanning ligt.



Figuur GM.3

Heeft een deeltje een ionisatie veroorzaakt, dan is een elektronenwolk gecreëerd rond de positieve centrale elektrode, en een ionenwolk welke zich naar de buitenmantel toe beweegt. Wanneer nu een volgend deeltje invalt vóór het verdwijnen van die ruimtelading, welke het elektrisch veld "afschermt", dan zal de buis ongevoelig zijn

voor de ionisatieprocessen geïnitieerd door het tweede deeltje. Deze periode waarin de buis ongevoelig is, wordt dode tijd τ genoemd. Bij hoge telritmes gaat de dode tijd een belangrijke systematische fout introduceren. Als F_{reg} de geregistreeerde flux is, dwz het aantal getelde deeltjes per tijdseenheid, dan was de buis ongevoelig gedurende een fractie $F_{\text{reg}}\tau$ van die tijdseenheid. De per tijdseenheid geregistreeerde deeltjes zijn dus ingevallen in de $(1 - F_{\text{reg}}\tau)$ tijdseenheid dat de buis open stond. De werkelijke flux F_w is dus

$$F_w = \frac{F_{\text{reg}}}{1 - F_{\text{reg}}\tau}$$

(inslagen per tijdseenheid). We mogen dus schrijven: $F_w = F_{\text{reg}} g_\tau$, waar

$$g_\tau = \frac{1}{1 - F_{\text{reg}}\tau}$$

de dode tijd correctiefactor is. De dode tijd van de GM-buis gebruikt in het labo, bedraagt ongeveer 75 microseconde.

(NB: F_{reg} en τ moeten in dezelfde tijdseenheden worden uitgedrukt voor het berekenen van g_τ).

Voorbeeld.

Stel dat we na 1 minuut 30000 deeltjes hebben geteld. Dus $n_{\text{reg}} = 30000$

Dan is $F_{\text{reg}} = n_{\text{reg}}/60 = 500$ deeltjes/s. Dus $g_\tau = \frac{1}{1 - F_{\text{reg}}\tau} = \frac{1}{1 - 500 * 75 * 10^{-6}} = 1.039$

Dus $n_w = 1.039 n_{\text{reg}} = 31169$ deeltjes in werkelijkheid ingevallen in 1 minuut.

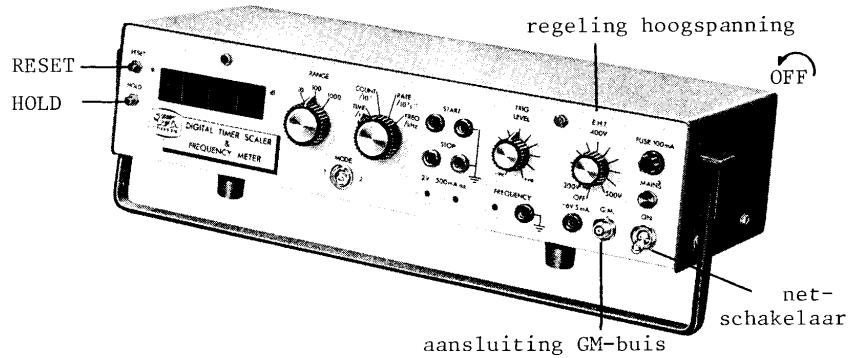
8.3. Gevoeligheid voor γ -fotonen

Gamma stralen hebben een groot doordringingsvermogen, en de waarschijnlijkheid dat een gasmolecule geïoniseerd wordt door één van de mechanismen is praktisch nihil. Toch kan de GM buis γ -stralen detecteren, alhoewel met een zeer klein rendement. Een γ -quantum wordt door de teller geregistreeerd wanneer het in de wand van de GM-buis geabsorbeerd wordt en een elektron of positron vrijmaakt, en in het gevoelige volume van de buis zendt: het is het e^- of e^+ deeltje dat dan de ionisatie teweeg zal brengen. De gevoeligheid voor γ -fotonen van de GM-buis is echter zeer klein vergeleken met die voor β -stralen: slechts 1% of minder van de fotonen zullen in de mantel van de meeste GM buizen geabsorbeerd worden en aanleiding geven tot een ionisatie.

8.4. Toebehoren bij de GM-buis

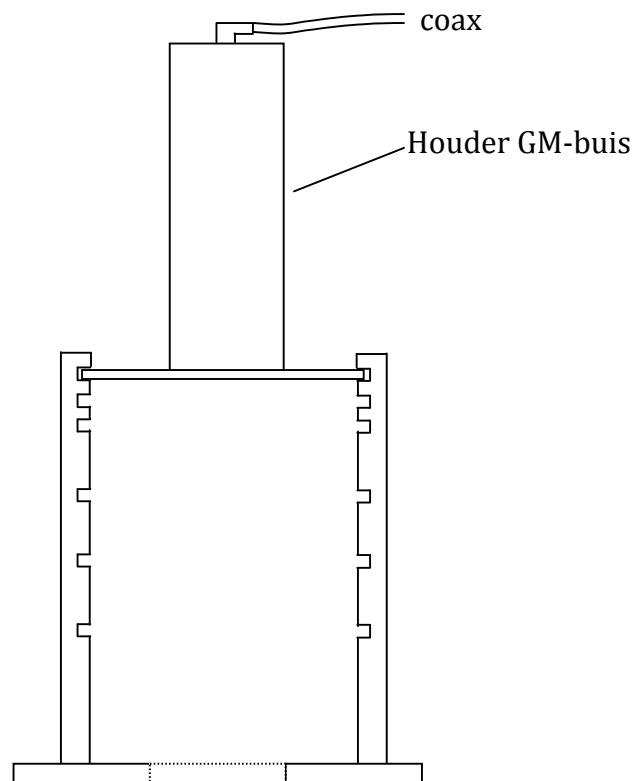
Voor het registreren van het aantal ontladingen in de GM-buis beschik je over een elektronische teller die tegelijkertijd de hoogspanning aanlegt aan de GM-buis (zie

Figuur GM.4).



Figuur GM.4

De experimentele opstelling bestaat uit een aluminium constructie (Figuur GM.5) met bovenaan een cilindrische houder voor de GM-buis. Deze GM-buis is via een coaxiale kabel ("coax" = 2 cilindrische geleiders met gemeenschappelijke as) verbonden met de "GM"-bus van de teller/voeding. Het mica-venster van de GM-buis staat horizontaal, ongeveer ter hoogte van de bodem van de cylinder. Onderaan de opstelling is een reeks gleuven aangebracht. De GM-buis zit in de bovenste gleuf. In de gleuven daaronder kunnen de radioactieve bron, en absorbers geschoven worden. Tenslotte beschik je over een set aluminium en loden absorbers.

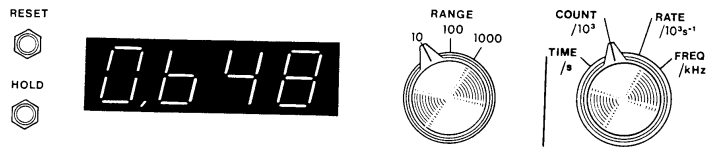


Figuur GM.5

Opgelet! De hoogspanning (300 - 500 Volt) mag enkel ingeschakeld worden als de GM-buis reeds aangesloten is.

8.5 Ingebruikstelling van de teller

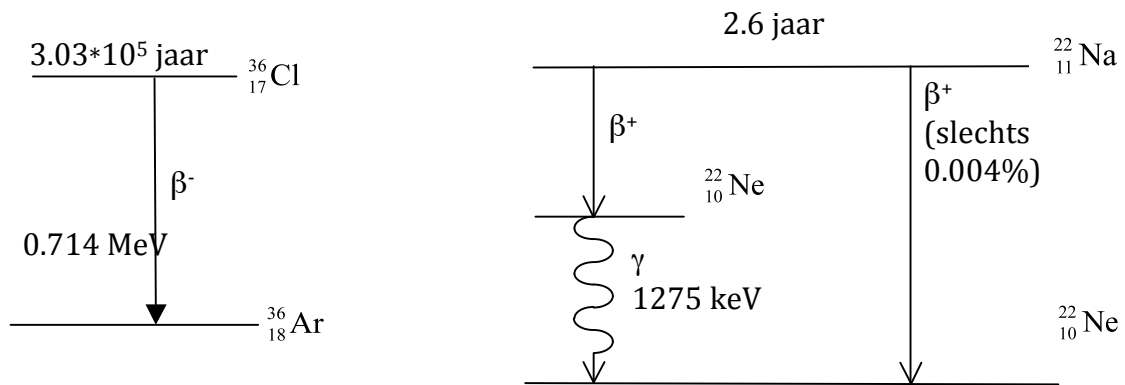
1. Controleer of de hoogspanningsschakelaar helemaal links gedraaid is (je moet een "klik" horen); bevestig dan de coaxiale kabel aan de GM-buis aansluiting.
2. Zet de functieschakelaar in "COUNT/10³" en de "range" schakelaar op "10". Deze instellingen gelden voor de hele proef. Uitleg: "Count/10³" wil zeggen dat de teller duizendtallen weergeeft. In het geval van Figuur 16 (volgende blz) zijn er dus $0.648 \times 1000 = 648$ pulsen geregistreerd. De teller kan 4 significante cijfers weergeven. "Range 10" wil zeggen dat de teller 1 cijfer voor en 3 cijfers achter de komma plaatst. Het hoogste weergegeven getal is dus 9,999. Dus de teller kan maximaal $9.999 \times 1000 = 9999$ pulsen aangeven (de factor 1000 wegens "Count/10³"). Tel je verder, dan zal de teller slechts de vier laatste cijfers weergeven.
3. Schakel de netspanning in. Plaats de ³⁶Cl-bron die in de doos zit, onder de GM-buis. Schakel de "EHT" ("Extra High Tension = hoogspanning) in door de knop naar rechts te draaien en vergroot de spanning tot de teller begint te tellen: dan heb je de drempelspanning bereikt. Om de werkingsspanning te bereiken op het Geiger plateau voeg je 60 Volt bij de drempelspanning. Daarna de Cl-bron terug in de doos steken.



Figuur GM.6

8.6. Radioactieve bronnen

Je beschikt over een ^{238}U koe waaruit je $^{234\text{m}}\text{Pa}$ kan melken. Het termschema en verval werden beschreven in § 2.4. Verder beschik je over een perspex plaatje met een Chloor 36 (^{36}Cl) bron en over een Natrium 22 (^{22}Na) bron. De termschema's voor deze isotopen vind je in Figuur GM.7.



Figuur GM.7

Hoofdstuk 4: **Proefondervindelijke aspecten van de kwantummechanica**

Inhoud

1. *Het wat en waarom van de kwantummechanica: korte herhaling*
2. *Workshop 5: het foto-elektrisch effect*
3. *Workshop 6: de golf-deeltjes dualiteit*
4. *Workshop 7: het experiment van Rutherford*

1. Het wat en waarom van de kwantummechanica: korte herhaling

In het vorige hoofdstuk hebben we licht bestudeerd dat we beschreven hebben als golven bekomen via de vergelijkingen van Maxwell. We weten echter dat licht ook een deeltjeseigenschap heeft, de zogenaamde golf-deeltjes dualiteit. De deeltjes die we associëren met licht, de kwanta van licht, noemen we fotonen. Het klassiek beeld van de fysica onderging een geweldige conceptuele revolutie rond de jaren 1900 wanneer men de zwartlichaamstraling begon te bestuderen. In een gesloten en donkere caviteit kon met het spectrum bepalen van elektromagnetische straling. De stralingswetten van onder andere Max Planck waren de eerste stappen in de kwantummechanica. Door het invoeren van een kwantisatie van energie kon men de opgemeten stralingspectra begrijpen. Planck had hiervoor begrippen nodig uit de Statistische Fysica en Thermodynamica.

Tijdens de daarop volgende decennia heeft de kwantummechanica aanleiding geven tot het opstellen van de atoomtheorie, zoals het concept van elektronen die rond een atoomkern cirkelen. De beweging van de elektronen wordt beschreven door de golven die we bepalen door het oplossen van de Schrödingervergelijking rekening houdend met de randvoorwaarden van de situatie. Op een probabilistische wijze kunnen we hiermee onder andere de positie van het elektron bepalen.

Vandaag ligt de kwantummechanica aan de basis van vele fundamentele fysica modellen. De atoomfysica, de vaste stof fysica, de elementaire deeltjes fysica, en nog veel meer modellen worden beschreven vanuit de kwantumfysica. Het is dus cruciaal als fysicus om enkele van deze revolutionaire concepten op een proefondervindelijke manier onder de loep te nemen. De theorie van de kwantummechanica blijft echter moeilijk te rijmen met de algemene relativiteitstheorie die de zwaartekracht beschrijft.

2. Workshop 5: het foto-elektrisch effect

In 1905 heeft Albert Einstein aangetoond dat de stralingswet van Planck begrepen kon worden indien met de energie van de straling kwantiseerde. Terwijl Planck het oscillatie patroon in de wanden van de zwarte caviteit ging kwantiseren, baseerde Einstein zich op deze ideeën maar ging er vanuit dat het de elektromagnetische straling zelf was die gekwantiseerd was en bestond uit pakketjes energie, namelijk fotonen. Met deze concepten kon Einstein ook het geobserveerde foto-elektrisch effect

verklaren en kreeg hiervoor de Nobelprijs in 1921. Wanneer elektromagnetische golven invallen op een metaal en geabsorbeerd worden, kunnen er elektronen loskomen uit het metaal. Er bestaat een verband tussen het aantal uitgezonden elektronen en de intensiteit van het invallend licht, maar dat de energie van de uitgezonden elektronen onafhankelijk is van deze intensiteit. Deze energie is enkel afhankelijk van de frequentie van de invallende elektromagnetische golven. Als herhaling, schrijf je in je laboschrift wat je weet over het foto-elektrisch effect. Dit zal de basis vormen om een experiment uit te werken die dit effect en bijhorende verbanden te bestuderen. Begin hieraan door na te denken (en/of op te zoeken) hoe de energieniveaus bezet zijn in een monovalent metaal bij 0°K. Hiermee kan je de werkfunctie definiëren als de energie die nodig is bij 0°K om een deeltje in een energieniveau bij het Fermi-niveau tot aan $E=0$ te brengen, dus los te maken van het metaal.

Het foto-elektrisch effect werd voor het eerste in 1887 waargenomen door Heinrich Hertz. Stel je nu even voor dat je ongeveer een 100-tal jaar geleden een fysicus was en deze geweldig revolutionaire concepten van Einstein wou testen met niet te ingewikkelde toestellen. Stel een proef voor waarmee je het foto-elektrisch effect en de bovenvermelde verbanden kan aantonen. Beschrijf de toestellen die je nodig hebt in dit experiment, alsook welke nauwkeurigheid ze moeten hebben om uiteindelijk een conclusie te kunnen formuleren. In het eerste deel van deze Workshop zullen we de voorgestelde proeven bespreken om te komen tot een finaal werkplan die je in het tweede deel van de Workshop zal uitvoeren.

De constante van Planck heeft een belangrijke rol in de interpretatie van het foto-elektrisch effect. Stel bijgevolg ook een methode op om met je experiment de verhouding h/e te bepalen, waar h de constante van Planck is en e de lading van een elektron. Ga na hoe je de empirische gegevens zal verwerken om tot het resultaat te komen en hoe je zal rekening houden met de verschillende onzekerheden.

Kan je ook enkele toepassingen geven waar het foto-elektrisch effect het belangrijkste concept is dat de toepassing doet werken. Geef er ook de nodige uitleg bij om aan te tonen dat je goed begrijpt hoe de toepassing werkt.

3. Workshop 6: de golf-deeltjes dualiteit

Een van de basisprincipes van de kwantumfysica is de dualiteit tussen het golf en deeltjes karakter van materie, zie cursus "Inleiding tot de kwantumfysica". De beweging van elk materie deeltje is in de kwantumfysica beschreven door de Schrodinger vergelijking, die een golfvergelijking is. In deze workshop moeten jullie een experiment voorstellen dat ontegensprekelijk dit merkwaardig concept van de dualiteit tussen het golf karakter en het deeltjes karakter van licht aantoonst. Werk dit volledig uit in je laboschrift, en dit op een manier dat je de proef aan je collega's kan uitleggen aan het bord tijdens de workshop. Belangrijk is trachten creatief te zijn, en durven nieuwe strategieën uit te proberen. Dit is onderdeel van het leerproces, en niet onderdeel van het examen of een andere beoordeling! Jullie moeten proefondervindelijk leren denken hoe je dit aanpakt en niet hoe je een standaard proefopstelling uit de literatuur kopieert.

4. Workshop 7: het experiment van Rutherford

Met het experiment van Ernest Rutherford zullen we proefondervindelijk inzicht krijgen in de structuur van een atoom. Dit doen we aan de hand van de verstrooiing van geladen deeltjes aan atoomkernen. In deze workshop krijgen jullie een dunne goudfolie die jullie zullen beschieten met alfadeeltjes. Hiermee moeten jullie de straal van de atoomkern van goud bepalen. We zullen hetzelfde doen met een aluminiumfolie om het ladingsgetal van aluminium te bepalen.

Voor deze workshop moet je eerst de verstrooiing van alfadeeltjes op atomen bestuderen. Uiteindelijk moet je de differentiële werkzame doorsnede voor verstrooiing opstellen als functie van de verstrooiingshoek. Deze uitdrukking zal afhankelijk zijn van het ladingsgetal van de atomen. Via de differentiële werkzame doorsnede kan je ook komen tot een methode om de kernstraal te bepalen van de atomen.

Bij het opstellen van de uitdrukkingen voor het verwachte verstrooiingspatroon moet men enkele benaderingen maken. Bijvoorbeeld kan men aannemen dat er geen overdracht van energie is tussen de alfadeeltjes en de atoomkernen. Bijgevolg kan men beschouwen dat de atoomkernen in rust zijn. Je moet uiteraard wel een verantwoording vinden voor deze benadering.

Stel bovenstaande uitdrukkingen op en ga na dat je alle details van deze berekeningen begrijpt. Doe dit voor de aanvang van de workshop in je laboschrift.

Voor de uitvoering van het effectieve experiment zal je gebruik maken van een vacuümpomp om er zeker van te zijn dat je alfadeeltjes geen andere interacties ondergaan. In je berekeningen mag je deze benadering gebruiken. Stel wel een experimentele methode op om de verstrooide alfadeeltjes te detecteren onder een bepaalde verstrooiingshoek. Hoe gaan we die bijvoorbeeld detecteren, hoe lang moeten we detecteren en hoe zullen moeten we de verwerking van de empirische gegevens aanpakken. Stel ook een methode op om de onzekerheden te bepalen. Misschien zijn er externe factoren waarmee je rekening moet houden.

Hoofdstuk 5:

Taak: Beschrijving van een belangrijk experiment

Inhoud

1. *Taak omschrijving*

1. Taak omschrijving

Het onderzoek in de fysica en sterrenkunde is een hele reeks historische experimenten rijk. Het is uiteraard onmogelijk om al deze proefondervindelijke verwezenlijkingen te behandelen tijdens één cursus. Bijgevolg moet een student in een opleiding fysica en sterrenkunde ook op een zelfstandige manier zich kunnen verdiepen in een specifiek experiment dat bijgedragen heeft aan het onderzoek van de algemene of een specifieke tak van de wetenschap.

Jullie mogen zelf individueel een experiment kiezen en voorstellen aan professor en assistenten. Na goedkeuring van het onderwerp, kunnen jullie je verdiepen in deze materie. Dit wil zeggen de motivatie voor het experiment, het gekende (of nog onbekende) fysica kader dat betrekking heeft tot de te onderzoeken fenomenen, de experimentele opstelling, de proefondervindelijke technieken die men gebruikte om tot de resultaten te komen, en uiteraard de resultaten en hoe die bijdragen aan de wetenschap.

Elk van jullie zal een korte samenvatting schrijven over het gekozen project van maximaal 5 pagina's. Na het bespreken van deze tekst met professor en assistenten, zal jullie gevraagd worden om een presentatie over te geven van maximaal 15 minuten over het project.

Referenties

De functionaliteit en het gebruik van de vele instrumenten die we besproken hebben, is moeilijk als geheel te vinden in een enkel boek. Hieronder heb je enkele referenties waar men informatie kan vinden.