



Vrije
Universiteit
Brussel

Proefondervindelijke Aspecten van Stralings- en Kwantumfysica

Bachelor-2 Fysica
(versie academiejaar 2008-2009)

Prof. J. D'Hondt

jodhondt@vub.ac.be

buro 0-G-117

tel 02-6293483

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

Ass. O. Depaepe

Inhoud cursus:

0. Voorwoord
1. Inleiding: concepten van proefondervindelijke fysica en organisatie
2. Basis instrumenten in een labo
 - Taak: nagaan van wetmatigheden in een elektrisch circuit
 - Experiment 1:
3. Gebruik van licht in een laboratorium
 - Taak: nagaan dat licht gepolariseerd is
 - Experiment 2:
4. Proefondervindelijke ontdekkingen in de kwantummechanica
 - Taak:
 - Experiment 3:
5. Enkele belangrijke experimenten
6. Projecten:
 - Ga proefondervindelijk na dat de zon een zwart lichaam is
 - Ga proefondervindelijk na dat de ideale gaswet juist is
7. 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 beheerst, 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. O. Depaepe

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 werkelijk 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 wetenschappelijk 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 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.

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 volgt 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 van 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. 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 grootheid te bepalen, soms zal je metingen doen om proefondervindelijk inzicht te krijgen in een fenomeen. Ga steeds voor 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 grootheid. 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 is, 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 wordt. 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!) in 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 experiment dat 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. Dus 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.

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

Inhoud

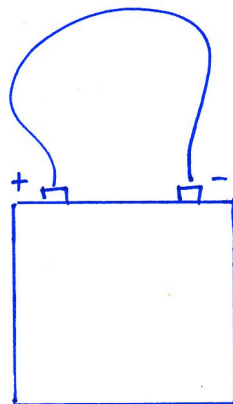
1. *Elektronische signalen en circuits*
2. *Gebruik en eigenschappen van kabels*
3. *Gebruik van stroom en batterijen*
4. *Multimeters*
5. *Oscilloscoop*
6. *Hoogspanning en laagspanning*
7. *Taak: wetmatigheden van een simpel elektronisch circuit*
8. *Experiment:*

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.

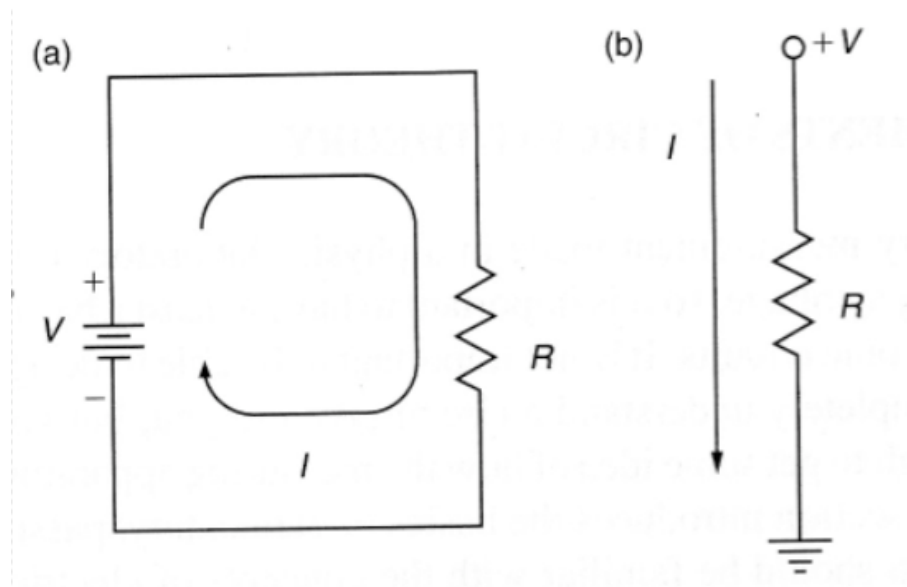
1.1. Basisbegrippen van elektrische stroomkringen

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.



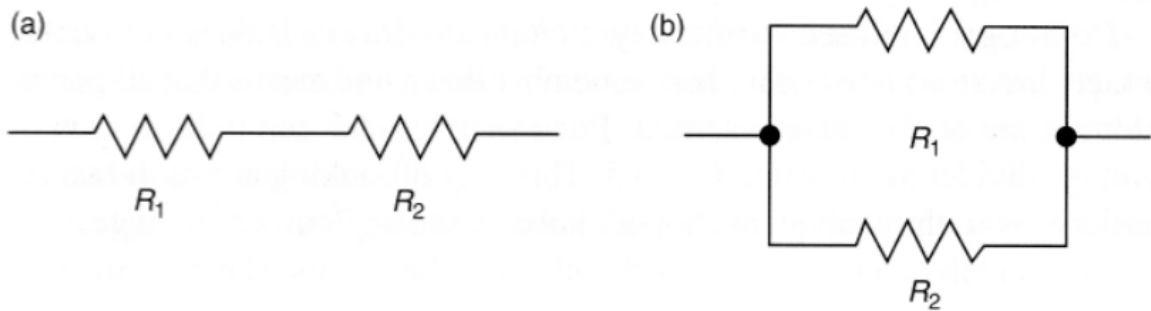
Figuur 2.1: Een stroomdraad die de twee uitgangen van een batterij verbindt.

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.

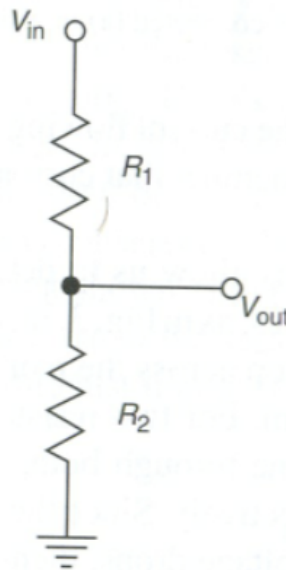
Het concept van elektrische potentiaal is gebaseerd op het concept van elektrische potentiële energie, en energie is uiteraard een behouden grootheid. Dit wil zeggen dat de totale verandering in elektrische potentiaal gelijk moet zijn aan nul indien we het volledige circuit doorlopen van figuur 2.2(a). 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.

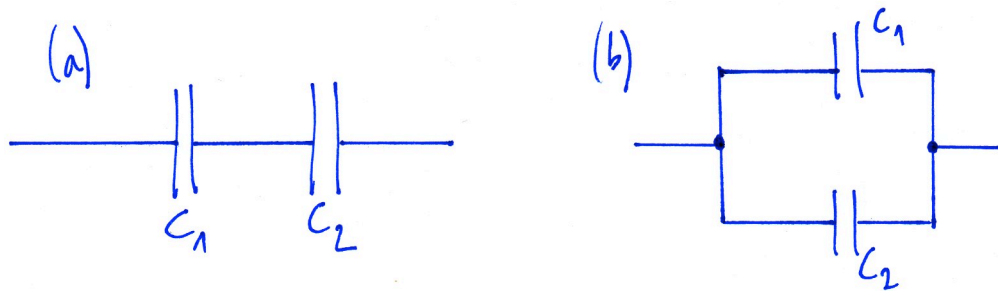
1.2. Condensatoren in wisselstroomkringen

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).

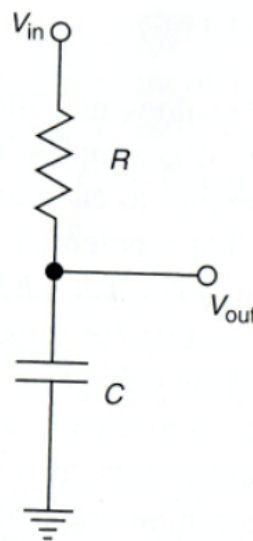
Voor gelijkstromen (DC) is een condensator weinig nuttig, gezien hij de stroom simpelweg blokkeert. Eenmaal we de stroom laten stromen, duurt het een korte tijd vooraleer de condensator opgeladen is, maar daarna zal de condensator de stroom blokkeren. Bij het aanleggen van een wisselstroom (AC of *Alternating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

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

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.

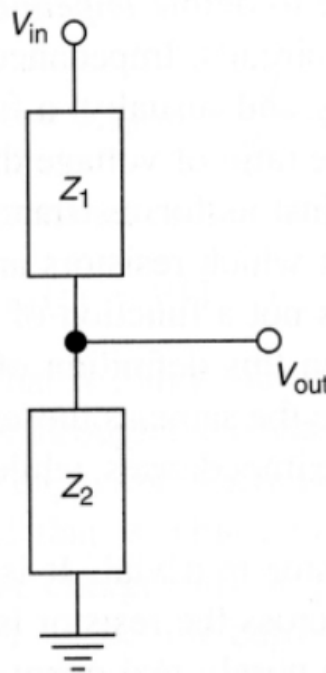
Met behulp van een Fouriertransformatie kan men de tijdsafhankelijkheid van een functie steeds weergeven als een combinatie van sinus en cosinus functies. In complexe notatie kunnen we schrijven

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

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 bekomen 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 functie zijn weergegeven in figuur 2.8. Het maximum van de $V_{out}(t,\omega)$ functie is verschoven ten opzichte van het maximum van de $V_{in}(t,\omega)$ 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

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

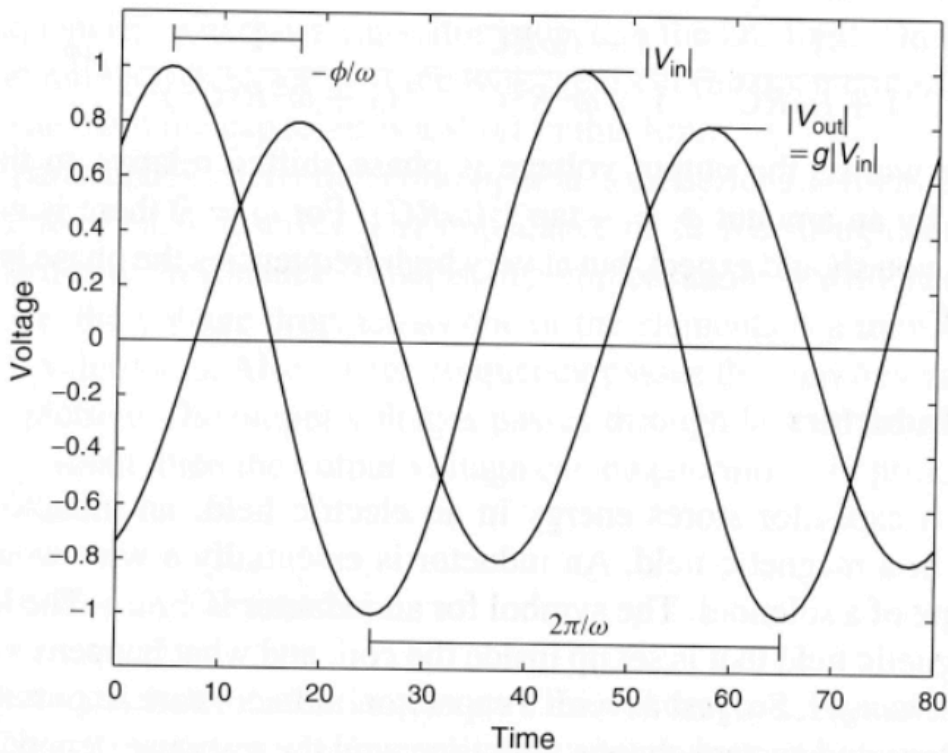
Waar de "gain" g gelijk is aan

$$g = (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{-1/2}$$

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 0.5 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 geometrien. 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 die 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. De bedoeling is dat je met behulp van een soldeerbout dergelijke structuur in elkaar knutselt en daarna je creatie gebruikt om je begrip van elektrische circuits te testen. Eerst zal je voorspellen van 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. Experiment: De brug van Wheatstone

Hier beginnen we met het eerste proefondervindelijk experiment. 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 experimenten 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 aan de hand 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 assistent 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 rapport en laboschrift dien je in ten

laatste twee werkdagen voor de volgende les bij professor of assistent (of bij afwezigheid bij het secretariaat). Dit kan ook via email uiteraard.

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.

Hoofdstuk 3: Proefondervindelijke aspecten van licht

Hoofdstuk 4: Proefondervindelijke aspecten in de kwantummechanica

Hoofdstuk 5: Enkele belangrijke experimenten

Hoofdstuk 6: Projectwerk

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.