Module 1 – Fusie Basis

FuseNet educatiemateriaal voor middelbare scholen

Docentenhandleiding v.1.0

Introductie

Energie spelt een fundamentele rol in onze hedendaagse samenleving. Met de toename van energieverbruik per persoon en de toename van het aantal personen op Aarde, wordt ingeschat dat de wereldwijde energieconsumptie sterk zal toenemen. Als wij doorgaan met de huidige mate van (duurzame) energieproductie, dan zal de vraag het aanbod sterk overstijgen. Het verdere verbruik van fossiele energieën is geen houdbare optie. Daarom kijken wij in deze lessenserie naar een mogelijke energiebron van de toekomst: kernfusie.

De serie bestaat uit vijf modules. De eerste module (*Fusie Basis*) biedt een startpunt met een brede behandeling van het energieprobleem en de verschillende natuurkundige onderwerpen die nodig zijn om kernfusie te begrijpen. De andere vier modules behandelen vier verschillende aspecten van fusie: *De Weg naar Fusie*, *Plasma Controle*, *Fusie Materialen*, en *Toepassing*. Deze modules kunnen worden gevolgd in elke volgorde, na het volgen van module 1.

Deze lessenserie is bedoelt voor gebruik op de middelbare school, op het niveau van de 5^{e} of 6^{e} klas HAVO of VWO.

Het gebruik van de modules

Elke module bestaat uit het volgende:

- Een student reader: inclusief fel-gekleurde blokken, beginnend met het woord “Aside”, die zorgen voor extra uitleg over onderliggende onderwerpen; en inclusief licht-gekleurde blokken met klassikale opdrachten, die gebruikt kunnen worden voor verdere discussie en als controle of de leerlingen het materiaal begrijpen. Beide onderdelen zijn natuurlijk optioneel om te gebruiken tijdens de les.
- Een set met extra opdrachten: ingedeeld per hoofdstuk van de student reader, met zowel introducerende opdrachten als meer uitdagende opdrachten.
- Een PowerPoint presentatie: ingedeeld op de hoofdstukken van de student reader, inclusief slides met de klassikale opdrachten en de antwoorden hierop.
- Een docentenhandleiding: inclusief een tabel met constanten en omreken factoren, antwoorden op de klassikale opdrachten, en antwoorden op de extra opdrachten.

Inhoudsopgave van deze handleiding

Docentenhandleiding 1
Introductie 1
Het gebruik van de modules 1
Hoofdstuk 1: Leerdoelen 3
Hoofdstuk 2: Gerelateerde onderwerpen 3
Hoofdstuk 3: Onderwerpen van module 1 per hoofdstuk 3
Hoofdstuk 4: Korte samenvatting van module 1 4
Hoofdstuk 5: Mogelijke lesschema's 5
- 15-minuten introducerende les voor gemiddelde leerlingen 6
- 15-min introducerende les voor gevorderde leerlingen 7
- 1-uur les voor gemiddelde leerlingen 8
- 1-uur les voor gevorderde leerlingen 10
Hoofdstuk 6: Gebruik van PowerPoint en andere materialen 12
Hoofdstuk 7: Verdere informatie voor leren en leuk, module 1 12
- Voor docenten 12
- Voor leerlingen (en docenten) 13
Appendix A: Tabel met constanten en omrekenfactoren 15
Appendix B: Antwoorden van klassikale opdrachten 16
Appendix C: Antwoorden op de extra opdrachten 19

Hoofdstuk 1: Leerdoelen

Aan het eind van module 1 *Fusie Basis* kunnen de leerlingen:

- De link begrijpen tussen klimaatverandering en het energieprobleem.
- De basis principes van kernfusie uitleggen.
- Reactievergelijkingen van kernreacties begrijpen en opstellen.
- Uitleggen wat een plasma is en waar het voor gebruikt wordt.
- De basis begrijpen van magnetisch opgesloten kernfusie.
- De geometrie begrijpen van een tokamak.
- De verschillen uitleggen tussen de drie magnetensets van een tokamak.
- De basis begrijpen van de magnetische velden in een tokamak.

Hoofdstuk 2: Gerelateerde onderwerpen

De inhoud van deze module kan dienen als voorbeeld of toepassing van eerder geleerde kennis. Echter, deze kennis is *niet* vereist om aan de module te beginnen. Dit is zeker waar als er eerder lessen zijn gehouden over één van de volgende onderwerpen:

- Atoomfysica
- Elektriciteit
- Magnetisme
- Ideale gaswet
- Energie en de wet van behoud van energie

Als er al lessen zijn gegeven over één of meer van deze onderwerpen, dan kan de module gebruikt worden als herhaling van de stof.

Hoofdstuk 3: Onderwerpen van module 1 per hoofdstuk

De eerste module begint met een brede behandeling van het energieprobleem en de gerelateerde onderwerpen binnen de natuurkunde:

1. Energie en haar rol in onze wereld
    - Problemen en oplossingen voor de toenemende energieconsumptie
        - Klimaatverandering
        - Toename van de wereldbevolking
        - Energiegebruik en -productie
    - Kernfusie
    - Kinetische energie
2. Fusie in de Zon
    - De Zon
    - Atoomfysica
        - Het model van Rutherford
        - Fusiereacties met betrekking tot waterstof
        - Isotopen en ionen
3. Plasma
    - Gassen

        - Dichtheid
        - Temperatuur
    - Elektrostatische interactie
        - Ladingen
        - Elektrische velden
    - Charged particles in magnetic fields
        - Magnetic field
        - Lorentz force
4. Een fusiereactor maken
    - Elektriciteit
        - Stroomsterkte
        - Transformators
            - Ideale transformator
    - Elektromagnetisme
        - Spoelen
        - Elektromotorische kracht
        - Magnetische flux
        - Magnetische veldsterkte
        - Magnetisch opgesloten fusie
    - Geometrie van een torus
        - Tokamak

Hoofdstuk 4: Korte samenvatting van module 1

Het doel van dit hoofdstuk is om een introductie of samenvatting te geven van de gerelateerde onderwerpen. Weinig achtergrond kennis over deze onderwerpen is vereist om deze samenvatting te gebruiken in de lessen.

In het eerste hoofdstuk (*Energie en haar rol in onze wereld*) wordt er van uitgegaan dat de leerlingen eerder hebben gehoord over klimaatverandering, maar diepere kennis over het broeikaseffect of de politieke discussies hieromheen zijn niet nodig. Klimaatverandering wordt gebruikt als startpunt, vanaf waar we redeneren naar het energieprobleem.

In het tweede hoofdstuk (*Fusie in de zon*) wordt de basis van atoomfysica uitgelegd. Als de leerlingen deze kennis al bezitten, dan kan het hoofdstuk worden gebruikt voor herhaling. De rol van elektrische ladingen in atomen en atoomkernen worden uitgelegd op het basisniveau. Zodoende kan dit hoofdstuk ook worden gebruikt om atoomfysica te introduceren bij de leerlingen die deze kennis nog niet bezitten. Tot slot worden de concepten van temperatuur en dichtheid besproken.

In het derde hoofdstuk (*Plasma*) wordt het concept plasma geïntroduceerd. Er wordt van uit gegaan dat het woord “plasma” al bekend is door het gebruik hier van in popcultuur en gebruik in sommige alledaagse producten (tv’s, bijvoorbeeld). Echter, er wordt vanuit gegaan dat de natuurkunde van een plasma nog volledig onbekend is. Er ligt een focus op elektrische ladingen en de aantrekking/afstoting van onderlinge ladingen.

In het vierde hoofdstuk (*Een fusiereactor maken*) wordt de meest gebruikte fusiereactor geïntroduceerd: de tokamak. Na een introductie hierover wordt er gekeken naar twee aspecten van

de tokamak: de geometrie (van een torus) en de magneetsystemen die gebruikt worden voor de magnetisch opgesloten fusie. Er zijn drie magneetsystemen, die per stuk worden besproken: de toroïdale-veld magneten, de poloïdale-veld magneten, en de centrale spoel. Deze drie leveren samen het vereiste helisch magnetisch veld. Het hoofdstuk bevat dan ook een basisuitleg over spoelen en de transformator. Magnetische inductie is een belangrijk onderwerp hierbij, wat behandelt wordt in een Aside. Het is aangeraden om hiermee te beginnen als dit onderwerp nog onbekend is bij de leerlingen.

Hoofdstuk 5: Mogelijke lesschema's

Op de volgende pagina's worden vier mogelijke lesschema's gegeven voor het gebruik van module 1. Deze schema's zijn ontworpen aan de hand van de hoeveelheid tijd die bestaat kan worden aan de les, en de kennis van de leerlingen. Er is gekozen voor een 15-minuten schema en een 1-uur schema voor een introducerende les voor gemiddelde en gevorderde leerlingen.

Het beginnersschema kan worden gebruikt als meerdere onderwerpen onbekend zijn voor de leerlingen. Het gevorderde schema kan worden gebruikt als de leerlingen al meer achtergrondkennis bezitten. Het gevorderde schema bestaat dan ook minder tijd aan deze onderwerpen, en besteedt meer tijd aan discussie en opdrachten. De docent moet zich vrij voelen om selectief onderwerpen of hoofdstukken uit te kiezen die geschikt zijn voor diens klas.

Voor alle schema's: de activiteiten voor de leerlingen bestaan uit luisteren, bespreken, vragen stellen, en werken aan de opdrachten.

15-minuten introducerende les voor gemiddelde leerlingen

Deze les heeft twee doelen: een korte introductie geven over klimaatverandering en het energieprobleem, en enthousiasme en nieuwsgierigheid opwekken over het onderwerp.

De lesstof beslaat slechts het eerste hoofdstuk van de module: pagina's 1-8, inclusief klassikale opdracht 1.1. Dit heeft betrekking tot slides 1-6 van de PowerPoint, de extra video "Do we need nuclear energy to stop climate change" (zie hoofdstuk 7 van deze handleiding!), en de extra opdrachten van hoofdstuk 1 van de module. De Aside van dit hoofdstuk bevat extra leesmateriaal.

Het is een optie om een klassikale discussie te houden over het onderwerp, of om dit op te breken in kleinere groepjes en de gevonden conclusies klassikaal te bespreken. Na de introductie en discussie, kunnen de leerlingen zelfstandig de student reader lezen en werken aan de opdrachten.

De voorbereiding voor deze les omvat:

- De PowerPoint downloaden.
- De module en opdrachten beschikbaar maken voor de leerlingen.
- Het voorbereiden van klassikale opdracht 1.1. Kijk bijvoorbeeld op de website van het CBS, of van Energie In Nederland (via Energie Beheer Nederland).

Het lesschema ziet er als volgt uit:

Tijdsduur	Docent activiteit	Materialen	Leerlingen activiteit
3 min	Introductie van het onderwerp	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 1 en 2 En/of extra video *Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?*	Luisteren
5 min	Bespreek klassikale opdracht 1.1	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 3 en 4	Klassikale discussie / discussie in groepjes van 4
3 min	Presenteer de slides van hoofdstuk 1	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 5 en 6	Luisteren / vragen stellen
5 min		Hoofdstuk 1 Extra opdrachten A.1 tot en met A.3	Lezen van hoofdstuk 1. Werken aan de opdrachten, individueel/tweetallen, in de les of als huiswerk

15-min introducerende les voor gevorderde leerlingen

Deze les heeft drie doelen. Ten eerste, een korte introductie geven over klimaatverandering en het energieprobleem. Ten tweede, enthousiasme en nieuwsgierigheid opwekken voor het onderwerp. Ten derde, de herhaling van één of meer onderwerpen gerelateerd aan het energieprobleem.

Dit beslaat het eerste hoofdstuk van de module: pagina 1-8 inclusief klassikale opdracht 1.1. Hierna kan de docent kiezen welk hoofdstuk verder te behandelen, bijvoorbeeld hoodstuk 3 *Plasma*. Deze combinatie (hoofdstukken 1 en 3) heeft betrekking tot slides 1-6 en 18-29 van de PowerPoint. De extra opdrachten zijn ingedeeld per hoofdstuk, en kunnen ook zo gebruikt worden. Gevorderde leerlingen kunnen opdrachten maken van alle moeilijkheidsniveau's (*,**, en ***). Dit zijn opdrachten A.1-A.3 en A.9-A.10. Er zijn ook extra video's die gebruikt kunnen worden, zie hoofdstuk 7 van deze handleiding.

De voorbereiding van deze les bestaat uit:

- De PowerPoint downloaden.
- De module en opdrachten beschikbaar maken voor de leerlingen.
- Het voorbereiden van klassikale opdracht 1.1. Kijk bijvoorbeeld op de website van het CBS, of van Energie In Nederland (via Energie Beheer Nederland).

Het lesschema ziet er als volgt uit:

Tijdsduur	Docent activiteit	Materialen	Leerlingen activiteit
1 min	Introductie van het onderwerp	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 1 en 2	Luisteren
3min	Klassikale opdracht 1.1 bespreken	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 3 en 4	Klassikale discussie, of bespreken in groepjes van 4.
2 min	Presenteer hoofdstuk 1	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 5 en 6	Luisteren, vragen stellen
4 min	Presenteer een hoofdstuk naar keuze (bijvoorbeeld hoofdstuk 3)	Hoofdstuk 3 PowerPoint: slides 18-21	Luisteren, vragen stellen
5 min	Presenteer een hoofdstuk naar keuze (bijvoorbeeld hoofdstuk 3)	Hoofdstuk 3 PowerPoint: slides 24-29	Luisteren, vragen stellen
	Huiswerk	*Module 1* *Extra opdrachten: A.1-A.3 en A.9-A.10*	*Lees het hoofdstuk in de module, werk aan de opdrachten individueel/tweetallen.*

1-uur les voor gemiddelde leerlingen

Het doel van deze les is om enthousiasme en nieuwsgierigheid op te wekken over het onderwerp, en om kennis op te doen van de onderliggende natuurkundige onderwerpen. Allereerst moet de focus liggen op de opbouw van het atoom, en het begrijpen van kernreacties. Daarna kan er kort aandacht worden besteed aan plasma's en magnetische velden.

Deze les behandelt heel module 1, met een focus op hoofdstukken 1, 2 en 3. De Asides kunnen zelfstandig worden gelezen door de leerlingen. Van de extra opgaves, de opdrachten met één of twee sterren (*, **) kunnen worden gebruikt. De volledige PowerPoint kan worden gebruikt.

De voorbereiding van deze les bestaat uit:

- De PowerPoint downloaden.
- De module en opdrachten beschikbaar maken voor de leerlingen.
- Het voorbereiden van klassikale opdracht 1.1. Kijk bijvoorbeeld op de website van het CBS, of van Energie In Nederland (via Energie Beheer Nederland).

Afhankelijk van de leerlingen is het mogelijk om één 1-uurs les te geven, of dit op te delen in vier delen. Elk deel kan dan focussen op één hoofdstuk uit de module, en tijd overlaten voor klassikale besprekingen en opdrachten maken. In het 1-uurs schema is geen tijd voor een klassikale bespreking van hoofdstuk 4, dit wordt opgegeven als huiswerk.

Het lesschema van een 1-uurs les ziet er als volgt uit:

Tijdsduur	Docent activiteit	Materialen	Leerling activiteit
3 min	Introductie geven van het onderwerp	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 1-2 En/of extra video *Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?*	Luisteren
5 min	Bespreek klassikale opdracht 1.1	Chapter 1 PowerPoint: slide 3 and 4	Klassikale discussie / bespreken in groepjes van 4.
3 min	Presenteer hoofdstuk 1	Chapter 1 PowerPoint: slide 5 and 6	Luisteren, vragen stellen
5 min		Module 1 Extra opdracht A.1	Opdracht maken: individueel, in tweetallen, of klassikaal
10-15 min	Presenteer hoofdstuk 2, tot aan klassikale opdracht 1.2	Hoofdstuk 2 PowerPoint: slides 7-13	Luisteren, vragen stellen
5 min	Bespreek klassikale opdracht 1.2	Hoofdstuk 2 PowerPoint: slides 14-15	Klassikale discussie / bespreken in groepjes van 4.

2 min	Presenteer de rest van hoofdstuk 2	Hoofdstuk 2 PowerPoint: slides 16-17	Luisteren, vragen stellen
5 min		Module 1 Extra opdracht A.4	Opdracht maken: individueel, in tweetallen, of klassikaal
10-15 min	Presenteer hoofdstuk 3 tot aan klassikale opdracht 1.3	Hoofdstuk 3 PowerPoint: slides 18-21 Mogelijk extra video *Ted-ed – Solid, liquid, gas and … plasma*	Luisteren, vragen stellen
2 min	Bespreek klassikale opdracht 1.3	Hoofdstuk 3 PowerPoint: slides 22-23	Klassikale bespreking van de meerkeuze antwoorden
5-7 min	Presenteer de rest van hoofdstuk 3	Hoofdstuk 3 PowerPoint: slides 24-27	Luisteren, vragen stellen
2 min	Bespreek klassikale opdracht 1.4	Chapter 3 PowerPoint: slides 28-29	Klassikale bespreking
	Huiswerk	*Module 1* *Hoofdstuk 4, alle extra opdrachten met één of twee sterren*	*Lees het hoofdstuk in de module, werk aan de opdrachten individueel/tweetallen.*

1-uur les voor gevorderde leerlingen

Het doel van deze les is om enthousiasme en nieuwsgierigheid op te wekken over het onderwerp, en om kennis op te doen van de onderliggende natuurkundige onderwerpen. Het is aangeraden om te beginnen met een herhaling van de al-bekende onderwerpen, alvorens de nieuwe bespreking te beginnen over plasma's en magnetische velden.

Deze les behandelt heel module 1, met een focus op hoofdstukken 1, 3 en 4. De Asides kunnen zelfstandig worden gelezen door de leerlingen. Alle extra opgaves kunnen worden gebruikt. De volledige PowerPoint kan worden gebruikt.

De voorbereiding van deze les bestaat uit:

- De PowerPoint downloaden.
- De module en opdrachten beschikbaar maken voor de leerlingen.
- Het voorbereiden van klassikale opdracht 1.1. Kijk bijvoorbeeld op de website van het CBS, of van Energie In Nederland (via Energie Beheer Nederland).

Als veel onderwerpen al bekend zijn bij de leerlingen, is het een idee om de rol van docent en leerling om te draaien. De docent stelt vragen, en de leerlingen moeten de onderwerpen uitleggen. De leerlingen kunnen met elkaar overleggen als zij verschillende antwoorden geven.

Het is ook mogelijk om de klassikale opdrachten te gebruiken als introductie naar elk hoofdstuk, door de leerlingen deze opdrachten te laten bespreken voor het hoofdstuk te presenteren.

Het lesschema van ziet er als volgt uit:

Tijdsduur	Docent activiteit	Materialen	Leerling activiteit
2 min	Introductie van het onderwerp	Hoofdstuk 1 PowerPoint: slides 1-2	Luisteren
3 min	Bespreek klassikale opdracht 1.1	Chapter 1 PowerPoint: slides 3-4	Klassikale bespreking, of in groepjes van 4.
2 min	Presenteer hoofdstuk 1	Chapter 1 PowerPoint: slides 5-6	Luisteren, vragen stellen
5 min	Begin met een bespreking van klassikale opdracht 1.2	Chapter 2 PowerPoint: slides 14-s15	Klassikale bespreking, of in groepjes van 4.
10 min	Verander de rol: docent wordt leerling, leerling wordt docent. Bespreek slechts de slides van onderwerpen die al bekend zijn.	Chapter 2 PowerPoint: slides 7-11	Kort uitleggen van het onderwerp / de slides.
5 min	Presenteer de rest van hoofdstuk 2	Chapter 2 PowerPoint: bijvoorbeeld slides 12, 13, 16 and 17	Luisteren, vragen stellen

5 min	Presenteer hoofdstuk 3, tot aan klassikale opdracht 1.3	Chapter 3 PowerPoint: slides 18-21	Luisteren, vragen stellen
3 min	Bespreek klassikale opdracht 1.3	Chapter 3 PowerPoint: slides 22-23	Klassikale bespreking
5 min	Presenteer de rest van hoofdstuk 3	Chapter 3 PowerPoint: slides 24-27	Luisteren, vragen stellen
5 min	Bespreek klassikale opdracht 1.4	Chapter 3 PowerPoint: slides 28-29	Klassikale bespreking
15 min	Presenteer hoofdstuk 4, mogelijk uitgezonderd van klassikale opdrachten	Chapter 4 PowerPoint: slides 30-31, 36, 39-45, 48	Luisteren, vragen stellen
	Huiswerk	*Klassikale opdrachten 1.5-1.7*	*Reader lezen, opdrachten maken*

Hoofdstuk 6: Gebruik van PowerPoint en andere materialen

Elke module heeft een eigen PowerPoint, beschikbaar als .pdf of als .ppt op onze website: https://fusenet.eu/education/material.

De PowerPoint behandelt de volledige module, inclusief de klassikale opdrachten + antwoorden, en kan direct worden gebruikt in de les. De PowerPoint bevat extra afbeeldingen. De docent moet zich vrij voelen om de PowerPoint aan te passen naar de beoogde les.

In hoofdstuk 7 van deze handleiding (hieronder), staan enkele mogelijke extra video's die gebruikt kunnen worden tijdens de PowerPoint presentatie.

Om de onderwerpen van module 1 te introduceren is het mogelijk om de leerlingen vooraf een huiswerkopgave te geven. Dit kan elke opdracht zijn met één ster (*) van de extra opgaven. Voor deze voorbereiding kunnen ook de onderwerpen worden gebruikt van de lijst uit hoofdstuk 7 van extra video's.

Hoofdstuk 7: Verdere informatie voor leren en leuk, module 1

Voor docenten

De volgende bronnen bevatten extra achtergrond informatie (in het Engels) voor docenten. Dit is puur bedoelt om de eigen kennis uit te breiden, en het onderwerp beter te begrijpen. Het is mogelijk om deze bronnen te gebruiken in de les, maar mogelijk moet het niveau aangepast worden naar de leerlingen.

Sommige website geven informatie over de onderwerpen uit module 1. Andere websites geven extra afbeeldingen, opdrachten (met en zonder antwoorden) en extra uitgeschreven materiaal. Onder elke URL staat een korte omschrijving van het materiaal dat hier te vinden is.

a. FuseNet website - https://www.fusenet.eu/education/material
   Hier staan de andere modules ook. Verder zijn hier interessante papers, lessen en experimenten over kernfusie beschikbaar.

b. MIT Open Course Ware - https://ocw.mit.edu/courses/simulations-applets-and-visualizations/#materials-science-and-engineering
   Op deze website staan lecture notes, oude examens en opdrachten over kernfysica onder "nuclear science and engineering".

c. EUROFusion - https://www.euro-fusion.org/
   Hier staat een speciale pagina voor leerlingen en docenten. Docenten vinden meer informatie over de basis van de kernfusieonderwerpen, inclusief Q&A over fusie. Er staan ook meer PowerPoint presentaties die gebruikt kunnen worden. Leerlingen vinden hier dezelfde inhoudt, maar op een beknoptere wijze. Deze bron kan gerbuikt worden door de gemiddelde en gevorderde leerling.

d. Fusion for energy - https://fusionforenergy.europa.eu/
Deze website heeft mooie animaties over fusie. Het gebruikt heldere uitleg over de verschillende onderwerpen van module 1 en het ITER project. De website kan traag reageren door de vele animaties.

Voor leerlingen (en docenten)

De volgende websites kunnen worden gebruikt om de onderwerpen van module 1 verder uit te leggen, en om nieuwe onderwerpen aan te snijden. Sommige kunnen worden gebruikt naast de PowerPoint van module 1. Het is aangeraden om een Windows computer te gebruiken voor de Phet simulaties (registratie is niet nodig). De bronnen staan genoemd bij het hoofdstuk van module 1 waar deze betrekking tot heeft. Na elke URL staat een korte omschrijving van de informatie die gevonden kan worden bij deze bron.

Hoofdstuk 1: *Energie en haar rol in onze wereld*

- Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?
  https://www.youtube.com/watch?v=EhAemz1v7dQ
  Duur: 10 minutes.
  Het eerste deel van de video kan worden gebruikt als introductie van de module, tot aan 2:49, of 6:00 wat ook een deel van hoofdstuk 1 uitlegd.

Hoofdstuk 2: *Fusie in de Zon*

- Phet - atoms, ions and charge
  https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_en.html
  De eerste Phet kan worden gebruikt om de relatie tussen deeltjes en de atomische naamgeving te verduidelijken. De ionen en lading kan worden achterhaald door elektronen of protonen toe te voegen. Een vrij makkelijke simulatie, kan door alle leerlingen worden gebruikt.
- Phet – relationship between pressure, volume and temperature
  https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html
  Kies voor de eerste “ideale” Phet om de relatie tussen druk en temperatuur te zien. De grootheden kunnen worden verandered tijdens het process. Tip: stel het volume in als een constante.

Hoofdstuk 3: *Plasma*

- Phet – effect of charges within a field
  https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html
  Leerlingen kunnen één of meer ladingen plaatsen in een veld, waarna de elektrische veldlijnen verschijnen. Het toevoegen van meer ladingen leidt tot veranderingen in het veld.
- Phet – electrical field hockey
  https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/electric-hockey/latest/electric-hockey.html?simulation=electric-hockey
  Leuk voor de leerlingen: het elektrische-veld hockey bestaat uit drie levels. Elektrische ladingen moeten worden neergelegd om de puck in het doel te krijgen.
- Ted-ed – Solid, liquid, gas and … plasma by Michale Murillo
  https://www.youtube.com/watch?v=tJplytSR-ww

Duur: 3:15
Een korte video op YouTube die uitlegt wat een plasma is, op heldere manier. Kan worden gebruikt voor alle leerlingen (mogelijk met wat opheldering door de docent).

Hoofdstuk 4: *Een fusiereactor maken*

- Kurzgesagt - in a nutshell: Fusion power explained
  https://www.youtube.com/watch?v=mZsaaturR6E
  Duur: 6:15
  Een YouTube video over het verschil tussen magnetisch opgesloten fusie en inertiële fusie, met een korte uitleg over fusieapparaten en de verschillende mogelijkheden. Dit kan worden gebruikt als korte herhaling na afloop van de les, of als introductie van de module.
- TSG Physics Lenz's law with copper pipe
  https://www.youtube.com/watch?v=N7tIi71-AjA
  Duur: 1:39 minutes
  Deze YouTube video (zonder geluid) laat een voorbeeld zien van magnetische inductie. Een kleine ijzeren bal en een bolvormige magnet gaan door een koperen buis. Er wordt uitgelegd waarom er een verschil te zien is tussen deze twee.
- Simon Lloyd- demonstrating Lenz's law with a copper tube and a neodymium magnet
  https://www.youtube.com/watch?v=nrkOZsECrZI
  Duur: 2:40 minutes
  Deze YouTube video laat ook de effecten zien van magnetische inductie. Deze video bevat meer uitleg over de werking er van.

Appendix A: Tabel met constanten en omrekenfactoren

Grootheid	Eenheid	Omrekenfactor naar SI eenheden
Energie[1]	1 calorie	4.184 J
Energie[3]	1 toe*	$4.2 * 10^{10}$ J
Energie[1]	1 kWh*	$3.6 * 10^{6}$ J
Massa[1]	1 Ton	$1.0 * 10^{3}$ kg
Massa [1]	1 amu/u/ame	$1.66 * 10^{-27}$ kg
Temperatuur[1]	0 °C	273.15 K
Druk[1]	1 bar	$1.0 * 10^{5}$ Pa

Tabel A.1 omrekenfactoren

*de leerlingen wordt gevraagd om deze zelf te vinden in extra opdracht A.2.

Constante	Waarde
Kern temperatuur van de Zon[2]	$1.571*10^{7}$ K
Oppervlakte temperatuur van de Zon[1]	5780 K
(gemiddelde) Dichtheid van de Zon[2]	1408 kg/m^3
Dichtheid van de Zonnekern[2]	$1.622*10^{5}$ kg/m^3
Druk in de Zonnekern[2]	$2.477*10^{11}$ bar
Oppervlakte temperatuur Aarde[1]	295 K
(gemiddelde) Dichtheid Aarde[2]	5514 kg/m^3
Massa van een elektron[1]	$9.109 *10^{-31}$ kg
Lading van een elektron[1]	$-1.602*10^{-19}$ C
Massa van een proton[1]	$1.673*10^{-27}$ kg
Lading van een proton[1]	$1.602*10^{-19}$ C
Massa van een neutron[1]	$1.675*10^{-27}$ kg

Table A.2 constanten

[1] Noordhoff uitgevers & NVON (2021). *Binas HAVO/VWO Informatieboek 6de editie (6e havo/vwo)* (01 ed.). Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers.

[2] Sun Fact Sheet. (2018). Geraadpleegd op 13 Juli 2021, van: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html

[3] IEA Unit converter and glossary, for common energy units. Van: https://www.iea.org/reports/unit-converter-and-glossary

Appendix B: Antwoorden van klassikale opdrachten

Klassikale opdracht 1.1

Let op: de gevonden data wisselt behoorlijk van informatiebron tot informatiebron. De leerlingen moeten aandacht er aan besteden dat zij een betrouwbare bron raadplegen.
Op de site van het CBS, in de tabel van 15 december 2022, getiteld "Energiebalans; aanbod, omzetting en verbruik":

- Totale energieverbruik Nederland per jaar: 3020 PJ
- Waarvan hernieuwbare energie: 344 PJ (= 11,4% van het totaal)

Ook leuk, voor andere landen zie bijvoorbeeld: https://ourworldindata.org/energy-mix

Klassikale opdracht 1.2

De materialen met hun energiedichteheid van hoog naar laag:
Deuterium – Uranium – Kool – Olie – Benzine – Ethanol – Hout – Waterstof (gas)

De energiedichtheid van deuterium is afhankelijk van de gebruikte fusiereactie. Daar staat los van dat fusiereacties de hoogste energiedichtheid hebben van alle soorten reacties (ook hoger dan splijtingsreacties). De energie per reactive is vaak hoger bij splijtingsreacties, maar deze splijtingsmaterialen (uranium) hebben een hoog volume. Het fuseren van een bepaald volume deuterium levert daardoor meer energie op, dan het splijten van eenzelfde volume uranium. De drie fossiele brandstoffen (kool, olie, benzine) hebben een -relatief- niet veel lagere energiedichtheid, ondanks dat het chemische reacties zijn. Hiervoor zijn wel de hoogste warden genomen van onderstaande bronnen:

Uranium: 1 539 842 000 MJ/L, bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density
Kool: 34-42 MJ/L (anthracite), of 26-49 MJ/L (bituminous) bron: idem
Oliel: 37 MJ/L bron: idem
Benzine: 34.2 MJ/L, bron: idem
Ethanol: 24 MJ/L, bron: idem
Hout: 2.56-21.84 MJ/L, bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel)
Waterstof (gas): 0.01005-0.01188 MJ/L, bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

Klassikale opdracht 1.3

Antwoord B

Door het recombinatieproces kunnen vrije elektronen en ionen recombineren tot een neutral gasdeeltje, en daarbij een foton uitzenden. Verschillende recombinatiereacties zijn mogelijk, afhankelijk van de ionen. Voor elk ion zijn de fotonen die uitgezonden kunnen worden vast, als gevolg van de specifieke energieniveau's die ionen (en atomen) hebben (quantum theorie). Hierdoor is de kleur van het plasma afhankelijk van de gasdeeltjes die gebruikt worden.
Door het recombinatieproces is een plasma vaak instabiel, want plasmadeeltjes recombineren tot neutrale deeltjes. Gasdeeltjes moeten dus constant geïoniseerd blijven worden. Neutrale deeltjes kunnen bijvoorbeeld geïoniseerd worden door te botsen met een ion in het plasma.

Over antwoord A: niet alle plasma's hebben een hoge temperatuur, er bestaan ook koude plasma's. Hitte is een manier om een gas te ioniseren, maar niet de enige (verder worden deze niet behandelt in de module). Koude plasma's kunnen ook gloeien.
Over antwoord C: De meeste kernreacties geven geen licht. Bijvoorbeeld, de D-T fusiereacite, hierbij komt geen foton vrij. Daarnaast zijn er veel plasma's waar geen kernreacties in plaatsvinden, maar die wel gloeien.

Klassikale opdracht 1.4

a. De elektrische stroom komt uit het papier, het magnetische veld draait hier omheen tegen de klok in.

Door de rechterhandregel te gebruiken, vinden we de richting van het magnetisch veld. Als de stroom het papier in gaat, draait ook de richting van het magnetisch veld om.

b. Het magnetisch veld binnen de cirkel (gevormd door de draad) komt het papier uit. Het magnetisch veld buiten de cirkel gaat het papier in.

Dit antwoord wordt wederom gevonden door gebruik te maken van de rechterhandregel.

c. Het magnetisch veld heft dezelfde richting voor beide deeltjes, want de verschillen door tegengestelde ladingen en tegengestelde richtingen heffen elkaar op.

Uitwerking: als wij op papier een elektron tekenen dat met de klok mee beweegt in een cirkelbeweging, dan genereert dit een magnetisch veld het papier uit (in de cirkel). Als wij een proton tekenen dat tegen de klok in beweegt, dan komt het magnetisch veld ook het papier uit (in de cirkel).
De tegengestelde lading zou eigenlijk er voor zorgen dat het magnetisch veld de andere kant op georiënteerd staat. Echter, de tegengestelde beweging doet hetzelfde. Dit leidt ertoe dat het veld hetzelfde is voor beide deeltjes (het idee van een dubbele-negatief: "min keer min maakt plus").

d. De richting van het magnetisch veld staat altijd loodrecht op de richting van de stroom.

Klassikale opdracht 1.5

a. Een donut
b. De docut wordt meer bolvormig. De bijradius kan echter niet groter worden dan de hoofdradius, want dan is het geen torus meer.
c. In de limiet hiervan is de bijradius even groot als de hoofdradius, en wordt de torus een bol.
d. De torus verandert van vorm als de aspectverhouding verandert.
e. Wederom, in de limiet dat de bijradius even groot is als de hoofdradius, is aspectverhouding gelijk aan 1.

Klassikale opdracht 1.6

a. Toroïdale doorsnede, een ronde donut:

b. Poloïdale doorsnede, twee cirkels:

Extra: 3D aanzicht:

Klassikale opdracht 1.7

a. De toroïdale-veld magneten zijn zichtbaar in de poloïdale doorsnede. Er loopt in deze magneten een elektrische stroom in de poloïdale richting, wat leidt tot een magnetisch veld in de toroïdale richting (rechterhandregel, de toroïdale richting staat loodrecht op de poloïdale richting). De naamgeving is de logisch (ookal is het mogelijk even verwarrend). Om het makkelijker voor te stellen: de toroïdale-veld magneten staan verticaal.

b. Precies vise versa: de poloïdale-veld magneten zijn zichtbaar in de toroïdale doorsnede, en genereren het poloïdale magnetisch veld. Om het makkelijker voor te stellen: de poloïdale-veld magneten liggen horizontaal.
De centrale spoel staat in het gat van de donut.

Klassikale opdracht 1.8

a. Magnetische inductie is afhankelijk van een veranderende magnetische flux. De flux kan niet eindeloos blijven veranderen, want de magneten bereiken een limiet van de stroom die zij kunnen dragen. De stroom moet dus fluctueren (als een sinus-functie bijvoorbeeld), in pulsen. De centrale spoel werkt dus in tijdelijks pulsen, en daardoor de hele tokamak ook.

b. Ideaal zou een fusiereactor constant aan staan, een constant energie leveren. Dit is dus helaas niet mogelijk met de centrale spoel.

Appendix C: Antwoorden op de extra opdrachten

Hoofdstuk 1: *Energie en haar rol in onze wereld*

Opdracht A.1 (*)

a. In basis SI eenheden: 1 J = 1 kg m^2 s^{-2} .
Denk er aan dat: m^2s^{-2} = $(m/s)^2$. Dit is de eenheid van snelheid *in het kwadraat*. Snelheid-kwadraat zien wij ook terug in de formule van kinetische energie: $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. In deze formule staat een product van massa en snelheid-kwadraat. De eenheid hiervan is dus: kg m^2 s^{-2} = J.
Bij de vergelijking van de eenheden J en m/s^2 (versnelling), "mist" er duidelijk nog een product met een massa (dit geeft kg) en afstand (dit geeft m): $E = mxa$. Dit is de energie die nodig is om een massa *m* een versnelling *a* te geven over een afstand *x*.

b. Antwoord D "Alle bovenstaande antwoorden zijn correct" is het correcte antwoord.
Aannames: een tennisbal weegt 55 gram, een appel weegt 100 gram.
De kinetische energie van de tennisbal = $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.055 \cdot \left(\frac{22}{3.6}\right)^2 = 1{,}03$ J.
De potentiële energie van de appel = $E_h = mg\Delta h = 0.1 \cdot 9{,}8 \cdot 1 = 0{,}98$ J.
Let op dat je de snelheid van de tennisbal omrekent naar m/s!
Naast de SI basiseenheden, is een joule dus ook gedefinieerd als de energie om een vermogen van 1 W te leveren gedurende 1 s: 1 J = 1 W/s.
Een joule is een eenheid, en kan dus prima worden omgerekend naar andere eenheden.

c. Volgens het IEA (betrouwbare bron), bedroeg de wereldwijde energieconsumptie 418 EJ/jaar in 2019 (= 418 x 10^{18} J = 1,16 x 10^8 GWh).
Bron: https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption

Opdracht A.2 (*)

a. Eigen antwoord van de leerling. Betrouwbare informatiebronnen hiervan zijn bijvoorbeeld Energie-Nederland of de IEA.

b. Eigen antwoord van de leerling.

c. 1 joule = 1/(3,6 x 10^6) kWh = 2,78 x 10^{-7} kWh
1 joule = 2,39 x 10^{-11} toe
1 joule = 2,39 x 10^{-17} Mtoe
Belangrijk om mee te geven: wanneer het gaat om de energieconsumptie van een land en dit staat in kWh of toe, dan gaat dit dus om enorme hoeveelheden energie!

d. Primaire energie is de energie die geproduceerd wordt in een energiebron. Een deel van deze energie wordt vervolgens gebruikt in de energiecentrale zelf (het kost veel energie om een centrale "aan" te hebben staan), of bij het transport van de energie naar de consument.

e. Voorbeeld voor Nederland: in 2019 werd 8.5% van de energieconsumptie (niet elektriciteitsconsumptie!) geleverd door hernieuwbare energiebronnen.
Bron: https://www.iea.org/countries/the-netherlands

f. Denk aan het verschil tussen "duurzame energie" en "hernieuwbare energie": duurzaam betekent "kan langdurig worden gebruikt zonder op te raken" (uranium, grote bulken kool, zonne-energie

vallen hier onder), hernieuwbaar betekent "wordt van nature aangevuld" (biobrandstof, zonne-energie).

Opdracht A.3 (*)
a. Een huishouden (in Nederland, of ander welvarend land) verbruikt ongeveer 1,3 x 10^{10} J/jaar (zie Module 5 *Toepassing*). Een (middelgrote tot grote) stad verbruikt ongeveer 2,4 x 10^{18} J/jaar (zie Module 5 *Toepassing*). Een land verbruikt bijvoorbeeld J. De hele wereld verbruikt 418 EJ/jaar (zie Opdracht A.1).

b. Een grove schatting van IEA zegt dat het energieverbruik van de industriesector 40% is van de totale consumptie wereldwijd (bron: https://www.iea.org/topics/industry). Dit is dus 40% van 418 EJ/jaar = 167 EJ/jaar.
Een simplistische inschatting van het energieverbruik van alle personen op Aarde: een Nederlands huishouden -bestaande uit gemiddeld 2,1 personen- verbruikt 1,3 x 10^{10} J/jaar. Elke Nederlander verbruikt dus 6,2 x 10^{9} J/jaar. Er zijn 8 miljard mensen op Aarde. Als al deze mensen even veel energie verbruiken als de gemiddelde Nederlander (wat zeker niet zo is, Nederlanders verbruiken meer energie dan gemiddeld), dan is het totale energieverbruik van individuen op Aarde:
(8 x 10^{9}) x (6,2 x 10^{9}) J/jaar = 50 x 10^{18} J/jaar = 50 EJ/jaar. Dit is ongeveer 30% van het verbruik van de energie.

c. Eigen antwoord van de leerling. Let op dat het een betrouwbare bron is.

d. Eigen antwoord van de leerling.

e. Eigen antwoord van de leerling. Bijvoorbeeld: dat de cijfers van verschillende bronnen nogal uiteenlopen. Het gaat hier vooral om een "orde van grootte" schatting. Het energieverbruik van de hele wereld is moeilijk om te meten.

Hoofdstuk 2: *Fusie in de Zon*

Opdracht A.4 (*)
a. Figuur 4 laat een atoom zien met: 4 protonen, 5 neutronen, 4 elektronen. Het element wordt bepaald door het aantal protonen: beryllium. Dit metaal kent vele toepassingen in verschillende industriële sectoren. Binnen kernfusie wordt het metaal gebruikt als "neutronen vermenigvuldiger" in de wand van de fusiereactor, zie Module 4 *Fusie Materialen* voor meer informatie hierover.

b. Een schets van één proton met daaromheen één elektron.

c. Een schets van één proton en één neutron met daaromheen één elektron.

d. Een schets van één proton en twee neutronen met daaromheen één elektron.

Opdracht A.5 (*)
Allereerst: 1 calorie = 4,2 J. Een Marsreep bevat 229 kilocalorieën = 961,8 kJ.
Benzine heeft een energiedichtheid van 34,2 MJ/liter (zie klassikale opdracht 1.2). Er zit dus evenveel energie in een Marsreep als in (0,9618/34,2) = 28,1 milliliter benzine.
Kool heeft een energiedichtheid van 42 MJ/liter (zie klassikale opdracht 1.2). Er zit dus evenveel energie in een Marsreep als in (0,9618/42) = 22,9 milliliter kool.

Kernsplijting (uitgaande van uranium) biedt een energiedichtheid van 1539842 GJ/liter (zie klassikale opdracht 2). Er zit dus evenveel energie in een Marsreep als in ((961,8 x 10^3) / (1539842 x 10^9)) = 0,62 nanoliter uranium.
Kernfusie (uitgaande van D-T fusie) biedt een energiedichtheid van

Opdracht A.6 (**)
a. Bij kernfusie komen twee (kleine) atoomkernen samen, deze smelten samen tot één grotere en zwaardere atoomkern (en bijproducten, zoals het losse neutron bij de D-T fusiereactie). Bij kernsplijting splitst één (grote) atoomkern, waardoor die uiteenvalt tot twee kleinere atoomkernen (en bijproducten).

b. Hier is het belangrijk om op te merken dat de grafiek de gemiddelde bindingsenergie per kerndeeltje weergeeft. Een grote en zware kern bevat veel deeltjes. Dus alhoewel de gemiddelde bindingsenergie per kerndeeltje afneemt voor elementen zwaarder dan Fe-56, de totale bindingsenergie van de kern neemt toe. Deze zware kernen kunnen dus meer energie leveren bij kernsplijting dan minder zware kernen, en zijn dus instabieler.

c. Af te lezen uit de grafiek: Fe-56 (ijzer) heeft de hoogste gemiddelde bindingsenergie van alle atoomkernen. Dit atoom is dus het moeilijkste om te veranderen (te fuseren of te splitsen), het kost namelijk het meeste energie. Omgekeerd levert het dus energie op door andere kernen te veranderen naar Fe-56. Alles wat meer kerndeeltjes bevat (of: zwaarder is dan) Fe-56 kan energie produceren door te splijten. Alles wat minder kerndeeltjes bevat (of: lichter is dan) Fe-56 kan energie produceren door te fuseren. Let op: niet alle splijtings- of fusiereacties geven ijzer als eindproduct, en kunnen nog steeds energie geven. De reactieproducten van deze reacties kunnen (theoretisch) verder splijten/fuseren en nog meer energie geven, totdat uiteindelijk Fe-56 wordt bereikt.

d. Fe-56. De oude sterren hebben de tijd en energie gehad om alle fusiereacties te laten leiden tot Fe-56, waarna er geen/nauwelijks energie meer wordt geproduceerd.

Opdracht A.7 (**)
a. Einstein's formule: $E = mc^2 = (m_{deuterium} + m_{tritium} - m_{He-4} - m_{neutron}) \cdot c^2$

$$= (2{,}014101 + 3{,}016049 - 4{,}002603 - 1{,}008665) \cdot (1{,}66054 \cdot 10^{-27}) \cdot c^2$$
$$= 0{,}018882 \cdot (1{,}66054 \cdot 10^{-27}) \cdot c^2$$
$$= 2{,}817983 \cdot 10^{-12} J$$
$$= 17.58847\ MeV$$

Waar de massa's van de deeltjes eerst zijn uitgedrukt in [u], om vervolgens omgerekend te worden naar kilogram. De massa's van de deeltjes zijn te vinden op het internet (Wikipedia). Dit zijn de massa's van de deeltjes inclusief elektronen (voor deuterium, tritium, en helium), dit maakt echter niet uit, want de massa van het elektron wordt weggestreept tegen elkaar. Let op om voldoende cijfers achter de komma mee te rekenen om uit te komen op de eerder-besproken 17.6 MeV.

b. Uitgaande van de splijtingsreactie: ${}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$
Via dezelfde methode als hierboven wordt de hoeveelheid energie berekent als: 173.3 MeV. Let op bij het opzoeken van de massa's van barium en krypton om te kijken naar de massa van de desbetreffende isotopen.

Opdracht A.8 (***)
In een fusieplasma: in het midden van het plasma is de temperatuur ongeveer 150 miljoen kelvin, en de deeltjesdichtheid ongeveer 10^{20} deeltjes/m^3. Met een gemiddelde deeltjesmassa van 2.5 u, is de massadichtheid 4.2 x 10^{-7} kg/m^3
In de Zon: in de zonnekern is de temperatuur ongeveer 15 miljoen kelvin, en een massadichtheid van ongeveer 150 x 10^6 kg/m^3.
De temperatuur in ons fusieplasma is dus 10 keer hoger dan in de zonnekern, maar de dichtheid is ontzettend veel lager. De hogere temperatuur in het fusieplasma moet ervoor zorgen dat er nog steeds genoeg fusiereacties plaatsvinden om een brandend plasma te krijgen. Let op bij deze vergelijking in het verschil in opsluiting van het plasma: op de Zon gebeurt dit door de Zon's zwaartekracht, en in het fusieplasma door de magneten om de reactor. De enorme dichtheid in de zonnekern hoeven wij op Aarde niet na te bootsen voor de opsluiting van het plasma (al zouden wij zo'n dichtheid kunnen bereiken met materialen).

Opdracht A.9 (*)
In het kort: het zichtbare licht van een plasma tv ontstaat door een fosforlaagje dat oplicht onder invloed van UV licht. Het UV licht is afkomstig van allemaal kleine plasma's die achter het beeldscherm zitten. Deze plasma's ontstaan door een elektrische spanning te plaatsen aan weerszijden van een edelgas (neon of xenon bijvoorbeeld). De plasma's zijn afgezonderd van elkaar met behulp van glas. Elke pixel in het tv scherm bestaat uit drie plasma's: voor groen, rood, en blauw licht. Om een beeld te plaatsen op de tv bepaald een computer voor elke pixel hoeveel licht vereist is in elk van deze drie kleuren.
Enkele belangrijke verschillen tussen een fusieplasma en het plasma van de plasma tv:

- Het fusieplasma moet lange tijd aanwezig zijn, het plasma van de tv bestaat slechts enkele milliseconden. Het fusieplasma houdt zichzelf in stand door zijn hoge temperatuur. Het plasma-tv plasma wordt steeds opnieuw gemaakt door de elektrische spanning.
- Alle deeltjes in (het midden van) een fusieplasma zijn volledig geïoniseerd, er zijn geen atoom-gebonden elektronen meer. In het plasma van de tv zijn niet alle atomen geïoniseerd, er bestaan nog steeds neutrale atomen, en geen enkel edelgas deeltjes zal volledig geïoniseerd zijn (dit zou te veel energie kosten en onnodig zijn).
- Het fusieplasma is veel groter (enkele meters) dan het plasma in de plasma tv (enkele millimeters).
- Niet onbelangrijk om te noemen: de industriële plasma's als die van een plasma tv worden al langer toegepast in allerlei apparaten en hoeven niet duur te zijn. Fusieplasma's op Aarde bestaan vooralsnog alleen in (dure) onderzoekslaboratoria.

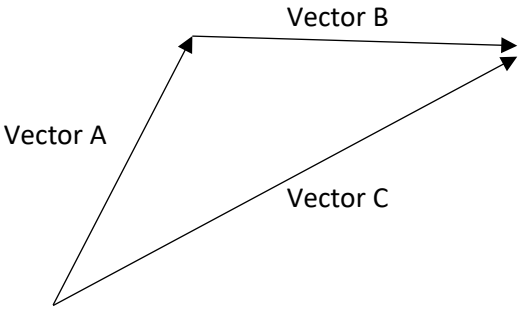
Opdracht A.10 (**)

a. Plasma's zenden licht uit over een breed spectrum: infrarood licht, zichtbaar licht, en ultraviolet licht. Dit komt doordat de plasma's elektrische ladingen bevatten (dat zit in de definitie van een plasma), die veel versnellen en vertragen. Dit komt in een fusieplasma o.a. door de hoge temperatuur, de elektrische en magnetische velden, en door botsingen met andere deeltjes. Daarnaast wordt er in de rand van een fusieplasma licht uitgezonden door atoom-gebonden elektronen die terugvallen tussen energieniveaus. Veel van deze processen vinden ook plaats in de algemenere industriële plasma's.

Een belangrijk natuurkundig concept is dat versnellende lading licht uitzendt. Een (fusie)plasma zendt dus licht uit op allerlei golflengtes, ook in het zichtbare spectrum.

b. Zoals hierboven genoemd, de rand van het fusieplasma zendt licht uit door atoom-gebonden elektronen. Dit gebeurt niet in de kern van het fusieplasma, want hier is het plasma volledig geïoniseerd (geen atoom-gebonden elektronen). Echter, dit is slechts één van de bronnen van licht in een (fusie)plasma. Een volledig geïoniseerd plasma kan licht uitzenden door versnellende ladingen: botsingen tussen ladingen, en elektrische en magnetische velden zorgen ervoor dat er alsnog licht wordt uitgezonden in een volledig geïoniseerd plasma.
In een heet fusieplasma valt dit uitgezonden licht echter veelal buiten het zichtbare spectrum. Een fusieplasma gloeit vaak alleen maar aan de randen, waar het niet volledig geïoniseerd is.

Opdracht A.11 (*)
Zie hieronder het voorbeeld van drie vectoren in een willekeurige richting, waarbij: **C** = **A** + **B**.
Een poloïdale vector en een toroïdale vector staan haaks op elkaar. Een optelling van twee zulke vectoren is een helische vector: die een poloïdaal en een toroïdaal deel heeft.



This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.