Module 1

Fusie Basis

Geschreven door: Sander Korteweg

In deze module introduceren we kernfusie met een focus op het “waarom” en “hoe”. Waarom is kernfusie interessant, niet alleen voor wetenschappers, maar voor iedereen? Hoe werkt kernfusie, zowel als natuurkundig concept en als energiebron?

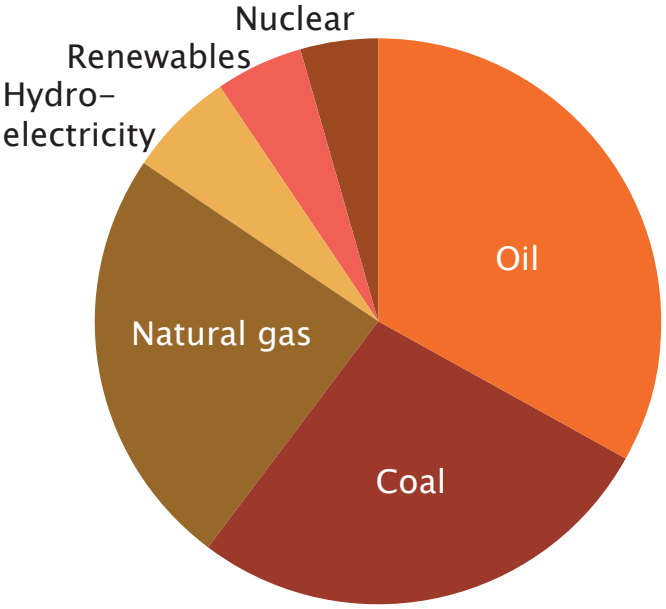
Aan de hand van deze hulpvragen beantwoorden we de hoofdvraag van deze module: waarom is het zo lastig om energie te produceren door middel van kernfusie?

Na deze module begrijp je de basis van kernfusie en kan je kernfusie als toekomstige energiebron vergelijken met andere bronnen. Je kan discussiëren over de mogelijkheden die kernfusie biedt en je begrijpt waarom het pad naar kernfusie-energie zo lastig is.
Als je na deze module nog meer wilt leren over kernfusie, dan kan je ook de andere modules lezen. Deze gaan dieper in op specifieke technische aspecten van kernfusie.

1.1 Energie en haar rol in onze wereld

De energiemix

De eerste vraag die belangrijk is voor onze discussie over kernfusie is: “waarom is kernfusie überhaupt interessant?” Om die vraag te beantwoorden moeten we allereerst niet kijken naar fusie, maar naar energie in het algemeen. Sinds de ontwikkeling van de stoommachine is het concept van energie steeds belangrijker geworden. Energie wordt gebruikt om onze huizen op te warmen tijdens een koude winter en om deze te koelen tijdens een hete zomer. Energie is wat machines, auto’s en apparaten arbeid laat verrichten: van transport tot elektrische apparaten, de moderne wereld kan niet



Figuur 1. De energiemix van de wereld in 2019, verdeeld per energiebron. Verreweg het grootste aandeel wordt gevormd door olie, gevolgd door kool en aardgas. Waterkrachtenergie, duurzame energie en nucleaire energie volgen daarna. Bron: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

zonder energie. Alle energie die we nodig hebben moet op een manier geproduceerd worden. Sinds de industriële revolutie heeft de mensheid nieuwe manieren ontdekt en ontwikkeld om nuttige energie te produceren: zogenoemde energiebronnen. Deze bronnen kunnen worden gecategoriseerd op meerdere manieren. Zo wordt er onderscheid gemaakt tussen bronnen die hernieuwbare energie leveren en bronnen die niet-hernieuwbare energie leveren. Er wordt ook

onderscheid gemaakt tussen bronnen die duurzame energie leveren en bronnen die niet-duurzame energie leveren.

De termen hernieuwbaar en duurzaam worden vaak door elkaar heen gebruikt. Hernieuwbaar betekent echter niet hetzelfde als duurzaam. “Hernieuwbaar” geeft aan dat de bron vanzelf aangevuld wordt in de loop van tijd. “Duurzaam” geeft aan dat de bron kan worden gebruikt voor een lange tijd zonder uitgeput te raken (en zonder gevaarlijke consequenties te hebben voor de toekomst). Bomen kappen en nieuwe bomen aanplanten is een hernieuwbaar proces, maar niet perse duurzaam: de jonge boompjes groeien uit tot grote bomen, en na genoeg tijd worden deze weer vervangen door nieuwe boompjes en het proces begint opnieuw. Als er echter meer bomen worden gekapt dan aangeplant, dan is het proces niet meer duurzaam: uiteindelijk zijn er geen bomen meer over. Aan de andere kant kunnen processen ook niet-hernieuwbaar zijn, maar wel duurzaam: kernsplijting (let op: splijting is niet hetzelfde als fusie!) is niet een hernieuwbare energiebron, want uraniumbronnen in de Aarde worden niet op natuurlijke wijze aangevuld. Er is wel genoeg uranium om een heleboel splijtingsreactoren voor een lange tijd energie te laten produceren en -indien er goed wordt omgegaan

ASIDE

En groene of schone energie?

De begrippen “groene energie” en “schone energie” komen wij vaak tegen in het dagelijks leven. “Groen” en “schoon” zijn labels die de klimaatimpact van een energiebron weergeven: ze geven aan dat een bron geen schadelijke emissies veroorzaakt (zoals broeikasgassen). Er is geen consensus over wat nou echt een schone energiebron is, want de productie van een schone energiebron kan nog steeds leiden tot emissies tijdens de constructie van de bron of het transport van de brandstof. Het begrip “duurzame energie” geeft aan dat de bron voor een lange tijd energie kan produceren, zonder gevaarlijke consequenties voor de toekomst. Aangezien dit beter is gedefinieerd, ligt de nadruk in deze module op duurzame energie, in plaats van op schone energie.

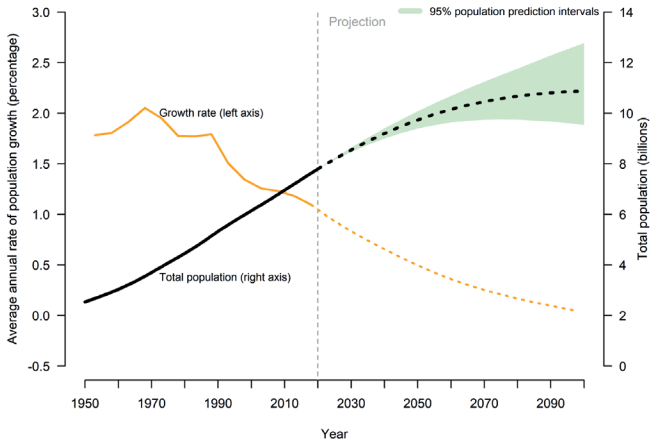
Klassikale opdracht 1.1
(a) Schat hoeveel procent van de Nederlandse energie wordt geproduceerd door hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne-energie, windenergie, waterkrachtenergie, etcetera. Leg jouw redenering uit. Welke aannames heb jij gedaan?
(b) Vergelijk jouw schatting met die van een andere leerling. Verschillen jullie aannames veel? Vergelijk ook jullie redeneringen, hebben jullie andere aannames gedaan?
(c) Zoek op het internet de energiemix op van Nederland. Vergelijk jullie schattingen met deze data. Zaten jullie schattingen in de buurt van de werkelijke data?

Zie ook opdrachten: A.1, A.2, A.3.

met het nucleaire afval- zijn er geen gevaarlijke consequenties voor de toekomst. Kernsplijting wordt daarom gezien als een niet-hernieuwbare energiebron, maar het kan wel een duurzame energiebron zijn.

Het energieprobleem

Nu hebben wij wat meer inzicht in de energiemix en hoeveel energie er nodig is om de moderne maatschappij te laten draaien, maar het is nog niet duidelijk waarom kernfusie hier belangrijk voor is. Om dit te begrijpen, moeten wij kijken naar het energieprobleem, dat gelinkt is aan de volgende ontwikkelingen.



Figuur 2: De sterkte van de groei van de wereldbevolking is aan het afnemen sinds de jaren '70. Dit is aangegeven met de oranje lijn, die daalt. Als gevolg hiervan is de bevolking -aangegeven in zwart- langzaam maar zeker aan het doorgroeien tot ongeveer 11 miljard wereldbewoners. Het groene vlak geeft de onzekerheid van het model aan. Bron: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

De wereldbevolking is aan het groeien. De bevolking is gegroeid van 6 miljard in 1999 naar 8 miljard in 2022. Het is de verwachting dat deze doorgroeit tot 8,5 miljard in 2030, 9.7 miljard in 2050 en 10,9 miljard in 2100.

Het gemiddelde energieverbruik per persoon is aan het toenemen. Landen zijn zich verder aan het ontwikkelen, wat leidt tot een hogere levensstandaard. Dit gaat vaak gepaard met een stijging in energiebehoefte, door bijvoorbeeld meer gebruik van infrastructuur, elektriciteit en internet. Zoals de Verenigde Naties hebben gezegd, ieder mens heeft recht op een adequate levensstandaard voor diens gezondheid en welzijn. Het heeft een hogere prioriteit om te verzekeren dat iedereen toegang heeft tot een adequate levensstandaard, dan om proberen het gemiddelde energieverbruik te verminderen door mensen hun toegang te ontnemen tot een basis levensstandaard, wat onethisch is.

De meeste energie komt van bronnen die schadelijk zijn voor het milieu, specifiek door de uitstoot van broeikasgassen. Fossiele brandstoffen overheersen de energiemix. Hernieuwbare energiebronnen zijn bezig met een inhaalslag, maar zij groeien niet snel genoeg om de fossiele brandstoffen te vervangen voordat onomkeerbare klimaatverandering waarschijnlijk zal plaatsvinden. Klimaatverandering zal vele negatieve effecten hebben op de wereld: de stijgende temperaturen zullen waarschijnlijk leiden tot meer extreem weer (bijvoorbeeld hittegolven en orkanen). Daarnaast zal klimaatverandering een schadelijk effect hebben op de menselijke gezondheid, flora en fauna, en de wereldwijde economie. Fossiele brandstoffen zijn dus geen duurzame oplossing voor de toekomst: klimaatverandering is nu al bezig en actie om erger te voorkomen is urgent nodig.

De combinatie van deze drie factoren is het energieprobleem waar de wereld tegenover staat.

Oplossingen voor het energieprobleem

Zoals bij elk probleem, kunnen wij op zoek gaan naar een oplossing. Ook voor het energieprobleem zijn er oplossingen te vinden, maar de meeste komen gepaard met flinke veranderingen in levensstijl en gemiddelde levensstandaard: twee zaken die mensen niet graag opgeven. Logischerwijs zijn er twee manieren waarop het energieprobleem opgelost kan worden:

(1) door drastisch de energiebehoefte te verlagen. Dit kan gedaan worden door processen efficiënter te laten werken (een technisch probleem) of door de individuele energieconsumptie te verlagen (een sociaal probleem). De optimalisatie van de energie-efficiëntie heeft altijd haar limieten: er zal altijd een klein verlies zijn van energie, zoals hitte in elektrische kabels of frictie in een mechanische machine. Tegelijkertijd zijn er veel zaken die efficiënter gemaakt kunnen worden, van betere isolatie in gebouwen tot transport en gebruik van materialen. Het verlagen van de energieconsumptie is zeker een mogelijke optie, of zelfs een nodige optie. Klimaatverandering zal ons leven drastisch veranderen of wij het willen of niet. Daardoor zijn wijzigingen in onze levenswijze onontkomelijk, zeker omdat een klein en rijk deel van de wereldbevolking de meeste energie verbruikt, terwijl het armste deel van de bevolking veel minder energie verbruikt: er zijn nog altijd veel mensen die geen toegang hebben tot elektriciteit. Wij kunnen niet verwachten dat de mensen zonder elektriciteit blijven zonder elektriciteit, omdat anderen graag zo veel gebruiken.

(2) door drastisch de duurzame energieproductie te verhogen. Als alle fossiele brandstoffen onmiddellijk niet meer gebruikt worden, dan scheelt dat onwijs veel emissies! Echter, dit is makkelijker gezegd dan gedaan. Politieke en economische aspecten komen hier om de hoek: de industrie van fossiele brandstoffen is groot en kan niet plotseling verdwijnen. Fossiele brandstoffen moeten worden vervangen door elektrische alternatieven. In sommige sectoren is deze verandering al merkbaar (denk aan elektrische auto's), maar deze elektrificatie van de industrie is slechts zo snel als de productie en opschaling van deze elektrische alternatieven. Er is dus tijd nodig voor deze elektrificatie, terwijl de tijd bijna op is om de schadelijke effecten van klimaatverandering te voorkomen.
Het is duidelijk dat het bovengenoemde leidt tot een maatschappelijk probleem van enorme omvang dat effect gaat hebben op al het leven op Aarde.

Wanneer wij gaan kijken naar manieren om meer duurzame energie te produceren, dan zijn de eerste opties de meest bekende hernieuwbare energiebronnen:

zonne- en windenergie. Het probleem dat deze bronnen hebben is dat zij niet constant energie kunnen produceren. Zonne- en windkracht wisselt door de dag heen, maar zij zijn ook afhankelijk van de seizoenen en locatie. Deze bronnen moeten dus gekoppeld worden aan een energieopslag, die de geproduceerde energie vasthoudt tot er behoefte is voor deze energie. Deze tijd- en locatieafhankelijkheden gelden niet voor fossiele brandstoffen: deze kunnen constant een basislast leveren en altijd voldoen in een energiebehoefte. Dat neemt niet weg dat het gebruik van fossiele brandstoffen een leefbare toekomst op het spel zet voor velen.

Wij kunnen nu twee manieren zien om het energieprobleem op te lossen: (1) ontwikkel betere energieopslag, bijvoorbeeld betere en krachtigere batterijen, of (2) vindt een alternatieve manier om de basislast te leveren. De beste oplossing die wij kennen: de nucleaire weg!

Ondanks dat batterijen beter en goedkoper worden, is de combinatie van zonne- en windenergie met energieopslag door middel van batterijen nog steeds veel duurder dan fossiele brandstoffen. Duurzame energiebronnen moeten niet alleen inlopen op fossiele brandstoffen, zij moeten deze inhalen en vervangen in de komende 30 jaar. Als dat lukt, dan is het zeker nog niet gezegd dat de combinatie van duurzame bronnen met energieopslag erin zal slagen om te voldoen in de volledige energiebehoefte. Aan de andere kant kan kernsplijting de basislast produceren, maar levert deze bron langlevend radioactief afval.

Fusie als een (back-up) oplossing

Er zijn nog steeds onzekerheden over wat de ideale energiemix zou zijn. De ideale mix zal gevonden worden door meerdere mogelijkheden te verkennen, ook voor de mix op de lange termijn. Hier kan kernfusie een rol gaan spelen als een potentiële energiebron. Kernfusie is een proces dat wij elke dag zien: het is het proces dat de Zon kracht geeft en al het leven op Aarde is er van afhankelijk. Het doel is om een kleine, beheersbare ster hier op Aarde te plaatsen, en wetenschappers

komen steeds dichterbij. Kernfusie kan echter niet de onmiddellijke energieproblemen oplossen, omdat het nog tijd vergt voordat fusie-energie geproduceerd kan worden op grote schaal. Zodra dit lukt, dan zou het de oplossing kunnen zijn van onze energieproblemen voor de komende eeuwen.

Als energie van kernfusie op Aarde bereikt kan worden, dan is het een energiebron die duurzaam en veilig is, en (bijna) geen emissies heeft. Het zou, net als fossiele brandstoffen of kernsplijting, een basislast kunnen leveren. Het zou een compacte energiebron zijn, waar onwijs veel brandstof voor beschikbaar is: genoeg om energie te leveren voor eeuwen, of zelfs millennia. Echter, fusie is zeker niet ideaal: het is een complex proces, en extreem lastig om energie uit te halen. Het is tot dusver nog niet gelukt om netto energieproductie te bereiken via kernfusie. Fusie is nog steeds een goede optie om verder te ontwikkelen om op terug te vallen als andere bronnen ontoereikend blijken. Wetenschappers over de hele wereld zijn hard aan het werk om de uitdagingen van fusie op te lossen, met de hoop om kernfusie te ontwikkelen als energiebron van de toekomst.

Om te concluderen, er is geen ideale oplossing voor het energieprobleem. De tijd is bijna op om onomkeerbare klimaatschade te voorkomen. In 2015 hebben 190 landen en de Europese Unie het Klimaatakkoord van Parijs ondertekend. Hiermee stemt de internationale gemeenschap in met het doel om de opwarming van de Aarde te beperken tot 2 graden Celsius. Om dit doel te bereiken moet de energiemix drastisch veranderen. Fusie kan niet onze energieproblemen oplossen binnen de komende 50 jaar. Maar als het lukt om fusie-energiebronnen te ontwikkelen, dan kan het de energieproblemen oplossen voor vele toekomstige generaties. Met dit doel in gedachten werken vele wetenschappers ijverig door om zo snel mogelijk een fusie-energiebron tot stand te brengen.

In de volgende hoofdstukken van deze module worden de basisprincipes van kernfusie uitgelegd. Wij staan stil bij kernfusie in de Zon, leren wat een plasma is en kijken naar de eerste stappen om een fusieapparaat te

ontwikkelen. Dit zal aantonen dat fusie bereiken niet moeilijk is, maar dat het zeer uitdagend is om er een bruikbare energiebron van te maken. Aan het eind van deze module begrijp jij de natuurkunde achter een kernfusieapparaat.

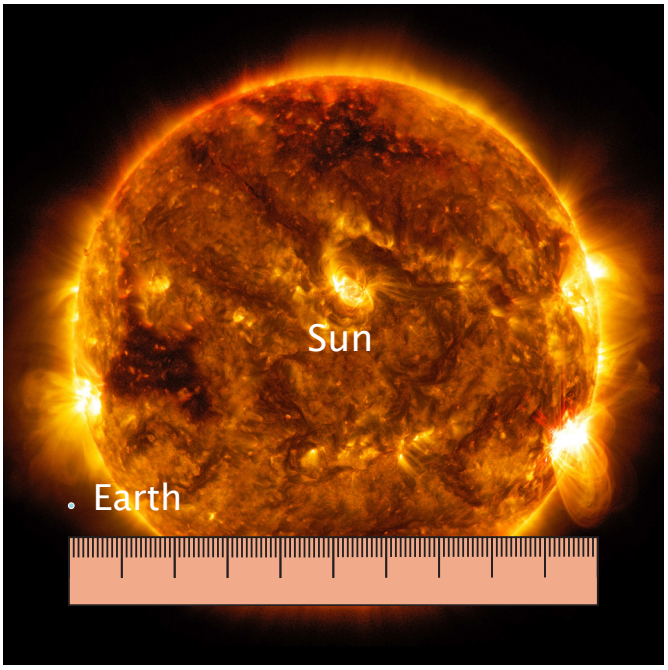
1.2 Fusie in de Zon

Nu het “waarom” uit de weg is, is het tijd om te kijken naar het “hoe”. Eerst gaan wij kijken naar de fusiereactor die al miljarden jaren non-stop werkt: de Zon.

De Zon

De Zon is een grote massa aan deeltjes die bij elkaar worden gehouden door zwaartekracht. Simpel gezegd: dankzij zwaartekracht wordt een object met massa aangetrokken door andere objecten met massa, en vice versa. De sterkte van deze aantrekking (hoe hard objecten aan elkaar “trekken”) is afhankelijk van de grootte van de massa’s. De Aarde is heel zwaar en trekt dus alles op Aarde richting zijn oppervlak. Dit voelen wij als de zwaartekracht die wij dagelijks ervaren: wij blijven op de Aarde staan en wij zien objecten omlaag vallen.

De Zon is nog heel veel zwaarder dan de Aarde: ongeveer 333.000 keer zo zwaar. Hierdoor is de zwaartekracht op het oppervlak van de Zon ook veel sterker dan de kracht hier op het Aardoppervlak. Er moet een uitwaartse kracht aanwezig zijn in de Zon, anders



Figuur 3. Vergeleken met de Zon is de Aarde onwijs klein. “Een bleke, blauwe stip”, zoals Carl Sagan het zegt. De radius van de Zon is honderd keer groter dan die van de Aarde, waardoor zijn volume één miljoen keer groter is. Aangepast van: NASA/Solar Dynamics Observatory.

zou de Zon instorten tot een punt. Deze uitwaartse kracht is het resultaat van fusiereacties in de Zonnekern.

De druk neemt steeds verder toe naarmate je je dieper in de Zon bevindt, net zoals op Aarde voelbaar is, bijvoorbeeld wanneer je diep onder water duikt. Dit komt doordat alle massa boven ons omlaag wordt gedrukt door de zwaartekracht. De hoge druk in de Zonnekern leidt tot een uitwaartse kracht, in de tegengestelde richting van de zwaartekracht dus. Deze twee krachten zijn in evenwicht, waardoor de Zon niet instort en niet uitzet.

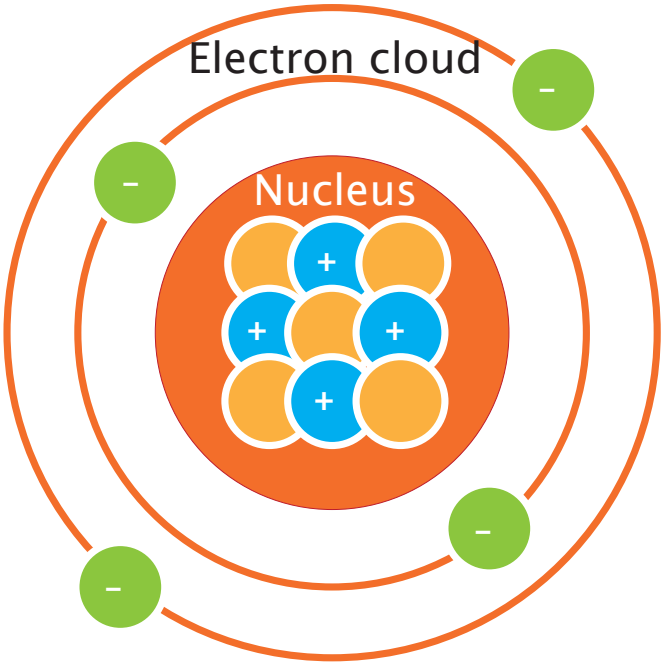
In de Zonnekern is de temperatuur extreem hoog. Deze temperatuur is hoger dan aan het oppervlak van de Zon, omdat het oppervlak hitte verliest door radiatie (deze radiatie zien en voelen wij op Aarde). Tegelijkertijd is de dichtheid van de Zon het hoogst in de Zonnekern, door de samendrukking door de zwaartekracht. De omstandigheden in de Zonnekern zijn dus extreem. Het blijkt dat in deze omstandigheden er een kans is dat twee losse deeltjes één deeltje worden: zij fuseren. Er komt zeer veel energie vrij bij het fuseren van twee deeltjes. Deze energie verzorgt de hoge uitwaartse druk die de zwaartekracht tegenwerkt.

In het atoom

Laten wij kijken wat deze “deeltjes” nu eigenlijk zijn en wat het betekent als deze “fuseren”.

Alle fysieke objecten zijn opgebouwd uit iets. Als wij oneindig zouden kunnen inzoomen op een object, dan zouden wij zien dat (bijna) al het materiaal bestaat uit complexe moleculaire structuren, welke weer zijn opgebouwd uit individuele moleculen, welke weer zijn opgebouwd uit atomen. Elk atoom heeft eenzelfde structuur: een kern en een “wolk” van elektronen die rond de kern bewegen. De kern bestaat uit twee soorten deeltjes: protonen en neutronen.

Het aantal protonen in de kern bepaalt welk type atoom (ook wel: welk element) het atoom is. Als de kern één proton heeft, dan noemen wij het waterstof. Heeft de kern twee protonen, dan noemen wij het helium. In

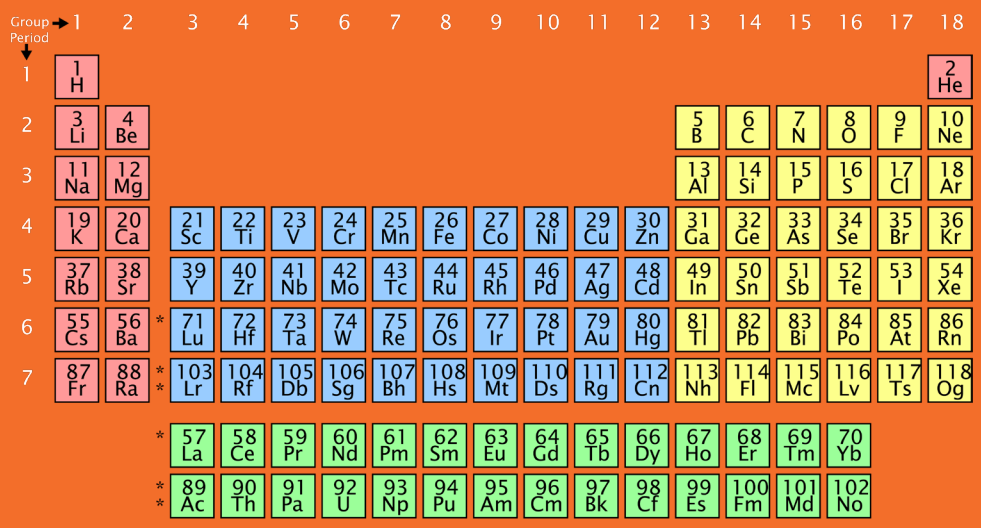


Figuur 4. Een schematische weergave van een atoom. In het midden ligt de kern, welke is opgebouwd uit (positief geladen) protonen en (neutrale) neutronen. Hieromheen beweegt een wolk van (negatief geladen) elektronen.

de loop der tijd zijn er veel verschillende elementen ontdekt en gecategoriseerd in het Periodiek System der Elementen, zie de Aside. Het aantal neutronen in de kern kan verschillen, wat leidt tot verschillende versies van hetzelfde element. Bijvoorbeeld, een kern gemaakt uit één proton en nul neutronen heet waterstof. Als de kern één proton en één neutron bevat heet het atoom deuterium, een isotoop van waterstof. Voor waterstof zijn er drie isotopen: “normaal” waterstof, deuterium en tritium (deze kern bevat één proton en twee neutronen).

Tot slot, wat is het verschil tussen een proton en een neutron? Een proton is een positief geladen deeltje, terwijl een neutron een neutraal deeltje is. Elektrische lading komt voor in twee varianten: positief en negatief. Positieve ladingen stoten andere positieve ladingen af en trekken negatieve ladingen aan. Negatieve ladingen stoten andere negatieve ladingen af en trekken positieve ladingen aan. Dit is hetzelfde proces dat haren rechtop doet staan wanneer iemand geladen wordt: de haren krijgen allemaal dezelfde lading en stoten elkaar af. Zij gaan dan zover mogelijk bij elkaar vandaan en gaan dus rechtop staan!

Betekent dit dat atomen geladen zijn? Ondanks dat de kern altijd positief geladen is (want de kern is gemaakt met alleen protonen en neutronen), is de kern



Figuur 5. Periodiek systeem der elementen. Bron: Wikimedia user Double Sharp (CC BY-SA 4.0)

Atomische notatie

Nu wij weten wat atomen en isotopen zijn, laten wij kijken naar de notatie die voor hen gebruikt wordt. Aangezien het aantal protonen van een atoom bepaalt welk type atoom –ookwel welk element– het is, is dit belangrijk om te noteren: het atoomnummer. Waterstof (H) heeft atoomnummer 1, koolstof (C) heeft atoomnummer 6. Alle waterstofatomen hebben atoomnummer 1, alle koolstofatomen hebben atoomnummer 6, onafhankelijk van welk isotoop het is. Het totale aantal protonen en neutronen bij elkaar opgeteld geeft het massagetal. Hiervoor wordt de eenheid atomische massaeenheid (amu, van het Engelse “atomic mass unit”) gebruikt, wat handig werkt doordat protonen en neutronen ongeveer evenveel massa hebben. De massa van een proton is ongeveer 1 amu (precies: 1.007276 amu) en van een neutron is ook ongeveer 1 amu (precies: 1.008665 amu). Elektronen zijn veel lichter. Vaak kan de massa van een elektron worden genegeerd. De massa van een “normaal” waterstof atoom is dus 1 amu (proton+elektron), van deuterium is 2 amu (proton+neutron+elektron), en van tritium is 3 amu (proton+neutron+neutron+elektron). Dit leidt tot de standaard notatie voor atomische isotopen, met een massagetal (bovenin genoteerd) en een atoomnummer (onderin genoteerd) naast een letter die aangeeft om welk element het gaat. Soms wordt het atoomnummer weggelaten, omdat dit dezelfde informatie geeft als de letter. In de rest van dit hoofdstuk gebruiken wij de notatie met beide getallen.

ASIDE

omgeven door elektronen. Elektronen zijn deeltjes met exact dezelfde lading als een proton, maar het is een negatieve lading. Atomen zijn –in principe– neutraal, waardoor er hetzelfde aantal positief als negatief geladen deeltjes aanwezig moet zijn in een atoom. Er zijn dus evenveel protonen als elektronen aanwezig in een atoom.

Er bestaan echter niet alleen maar neutrale atomen: een atoom kan één of meerdere elektronen verliezen en dus positief geladen worden. Wij noemen het dan een positief ion. Andersom kan een atoom ook één of meerdere elektronen krijgen, negatief geladen worden en een negatief ion heten. Het elektron dat een positief ion heeft verloren heet een vrij elektron. Er bestaan veel soorten ionen, zowel positieve als negatieve.

Kernreacties

Terug naar het proces van fusie. Wij weten nu wat kernen zijn, dus laten wij kijken wat er gebeurt als twee kernen fuseren.

In de Zon is de temperatuur hoog genoeg dat twee kernen kunnen botsen, ondanks dat de kernen elkaar afstoten (allebei zijn positief geladen!). Bij deze botsing fuseren de kernen tot nieuwe deeltjes (minstens twee in verband met behoud van impuls). Dit heet een kernfusiereactie of fusiereactie, in het kort. Fusiereacties in sterren leiden tot zwaardere elementen, die ook weer kunnen fuseren als de temperatuur hoog genoeg is hiervoor (deze temperatuur verschilt voor verschillende soorten fusiereacties). Zo maken sterren zwaardere elementen en wordt energie vrijgegeven.

De fusiereactie die het makkelijkste is om te veroorzaken (dit is overigens niet de reactie die het meeste voorkomt in de zon), is de reactie tussen deuterium en tritium, ook wel D–T fusie genoemd.

$$ {}^{2}_{1}H^{+} + {}^{3}_{1}H^{+} \rightarrow {}^{4}_{2}He^{2+} + n + 17.6\ \text{MeV} $$

In deze reactie fuseren deuterium en tritium (de twee

Klassikale opdracht 1.2
Het begrip energiedichtheid is belangrijk in natuurkunde. Het klinkt ingewikkeld, maar komt hier neer op "hoeveel energie kunnen wij halen uit een bepaald volume van een brandstof". Als wij één liter benzine verbranden en meten hoeveel energie er is vrijgegeven (in de vorm van hitte) en dat delen door het volume dat is verbrand, dan krijgen wij een getal voor de energiedichtheid van benzine. Dit kunnen wij doen voor allerlei brandstoffen.

a) Van de brandstoffen hieronder genoemd, welke denk jij dat die de hoogste energiedichtheid heeft? En welke de laagste? Rangschik de brandstoffen van hoogste naar laagste energiedichtheid.

b) Vergelijk jouw rangschikking met die van een andere leerling. Overleg waarom jullie denken dat deze volgorde correct is.

c) Zoek de energiedichtheid op van deze brandstoffen. Vergelijk jouw rangschikking met deze data. Zat jouw inschatting in de buurt?

Benzine – olie – kool – hout – waterstof (gas) – ethanol – deuterium – uranium

Zie ook opdrachten: A.4, A.5, A.6, A.7, A.8.

isotopen van waterstof!) tot een heliumkern, een los neutron en ontzettend veel energie: namelijk 17,6 MeV. Hier staat MeV voor mega-elektronvolt. De elektronvolt (eV) is een eenheid van energie, net zoals joule (J), die vaak wordt gebruikt bij nucleaire en atomaire processen.

Een elektronvolt is een klein getal: 1 eV = 1.602 x 10^{-19} J. De 17,6 MeV lijkt dus misschien niet zoveel (10^{-19} = 0,0000000000000000001, dus 17.6 MeV=2,82 $\times$ 10^{-12} J, of 0,00000000000282 J). Maar voor een atoomkern is dit enorm veel energie. Kernen zijn onwijs klein. Er zitten dus veel kernen in een klein beetje nucleaire "brandstof". De energie per eenheid volume, de energiedichtheid, is daardoor enorm hoog. Een liter deuterium-tritium "brandstof" bevat wel 10 miljoen keer meer energie dan een liter benzine.

Dat de energiedichtheid heel hoog is, geldt voor alle kernreacties, zowel voor splijtings- als fusiereacties. Dit maakt kernreacties zo aantrekkelijk als energiebron.

Helaas maakt dit kernreacties ook aantrekkelijk voor sinistere doeleinden, zoals gedemonstreerd bij het ontwikkelen van de atoombom tijdens de Tweede Wereldoorlog (splijtingsreacties) en bij de ontwikkeling van de waterstofbom in de jaren–1950 (een combinatie van splijting– en fusiereacties).

Terug op Aarde

Nu begrijpen wij waarom de Zon kan bestaan: zwaartekracht duwt de Zon naar binnen, en de energie die vrijkomt bij fusiereacties in de zonnekern zorgen voor een hoge druk die naar buiten duwt. De balans

ASIDE

Elektronvolt

De elektronvolt lijkt een rare eenheid voor energie, maar blijkt heel handig voor atomische processen. Doordat deze processen plaatsvinden op een minuscule schaal hebben wij te maken met kleine hoeveelheden energie. Een eenheid die staat voor een kleine hoeveelheid energie maakt het dus makkelijker om hiermee te werken (alles in joule opschrijven is veel gedoe). Bij het kiezen van een kleine eenheid is het het beste om te gaan voor een hoeveelheid die makkelijk en accuraat te meten is, terwijl het gelinkt is aan de processen waar de eenheid voor bedoelt is.
De energie van atomische deeltjes is hoofdzakelijk gelinkt aan hun snelheid. Dit maakt de energie die een deeltje krijgt wanneer wij deze versnellen een logische keuze. Geladen deeltjes zijn het makkelijkste te versnellen (door een potentiaalverschil) en elektronen spelen een rol in atomische processen. Daarom is 1 elektronvolt (eV) gedefinieerd als de energie die een elektron krijgt, wanneer deze wordt versneld over een potentiaalverschil van 1 volt (V). Een elektron met lading e, versnelt over 1 V, krijgt dus 1 eV aan energie.
Om dit in perspectief te plaatsen, als wij een AA batterij (1,5 V) gebruiken om een elektron te versnellen (in een vacuüm, vanuit rust). Dan heeft dit elektron hierna een energie van:
lading x voltageverschil = 1 e x 1,5 V = 1,5 eV.

tussen deze inwaartse en uitwaartse druk zorgt ervoor dat de Zon niet instort door zwaartekracht of uit elkaar vliegt door de energie van de fusiereacties.
Sinds de mensheid heeft ontdekt hoe sterren kunnen bestaan, is er geprobeerd om dat proces na te bootsen op Aarde, met als doel om energie te produceren. Het probleem is dat de Aarde te klein en licht is om fusie te bereiken zoals dat op de Zon gebeurd. Er moet dus een alternatief worden gezocht voor de inwaartse druk die de uitwaartse druk balanceert. Er zijn een aantal manieren gevonden om fusie te bereiken op Aarde. De meest gebruikte methode is om een plasma te creëren en sterke magneten te gebruiken om dit onder controle te houden. Verder in deze tekst kijken wij eerst naar de criteria om fusie te bereiken, voordat wij kijken naar de beste manier om deze criteria te behalen op Aarde.

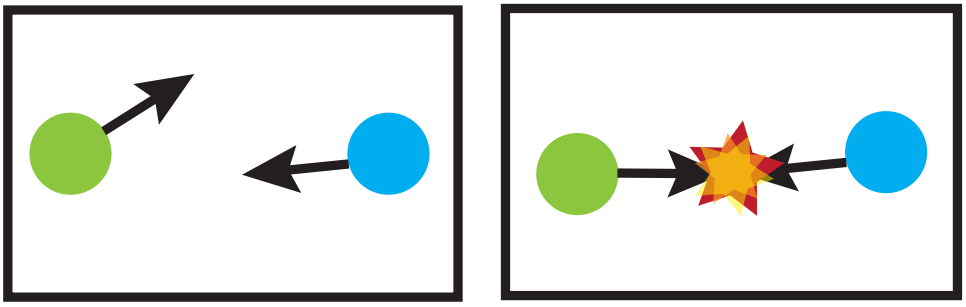
Criteria voor fusie

De enorme zwaartekracht van de Zon zorgt voor een enorm hoge druk in de Zonnekern zodat er fusie plaatsvindt. Deze druk is een combinatie van twee zaken: temperatuur en dichtheid. Beide zijn nodig om fusie te bereiken. Om dit beter te begrijpen, kijken wij naar een hypothetische situatie waarin twee positief geladen deeltjes in een doos zitten.

De twee deeltjes stoten elkaar af door hun lading. Deze afstotende kracht hangt af van de afstand tussen de deeltjes: de kracht is groot wanneer de deeltjes dicht bij elkaar zijn, maar verkleint als er meer afstand zit tussen de deeltjes. De deeltjes gaan natuurlijk zo ver mogelijk bij elkaar vandaan zitten, totdat zij gestopt worden door de wanden van de doos. Echter, als de deeltjes dicht genoeg bij elkaar in de buurt komen, is er een kans dat zij fuseren. Wij nemen hier aan dat deeltjes fuseren wanneer zij elkaar aanraken (in werkelijkheid is er een kans dat deeltjes dan fuseren!). Om fusie te bereiken moeten wij dus iets doen om de deeltjes bij elkaar te brengen: hun afstotende kracht moet worden overkomen. Dit is te doen door de deeltjes snel genoeg te laten rondvliegen.

Wij kunnen de deeltjes dus laten fuseren door hen een snelheid te geven die hoog genoeg is om de afstotende

kracht te laten overkomen. Anders gezegd: wij moeten de deeltjes een hoge kinetische energie geven. Als de deeltjes op de muren botsen, vliegen zij in willekeurige



Figuur 6. Twee positief geladen deeltjes vliegen op hoge snelheid rond in een doos. Als de snelheid hoog genoeg is, kunnen de deeltjes hun afstotende kracht overkomen, botsen en fuseren.

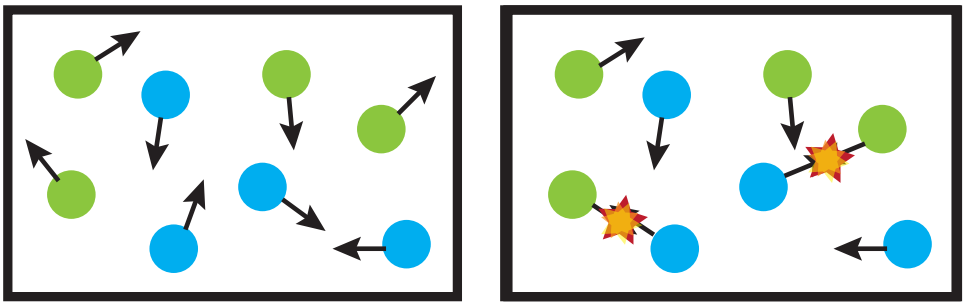
richting weer weg. Uiteindelijk zullen de deeltjes elkaar raken en fuseren zij. Het is belangrijk om de link tussen kinetische energie en temperatuur te begrijpen. Temperatuur is een maat voor de gemiddelde kinetische energie van een groep deeltjes. In het voorbeeld van de twee deeltjes: de deeltjes hebben een hoge snelheid, dus de gemiddelde snelheid van de groep deeltjes is hoog, dus de groep deeltjes heeft een hoge temperatuur. Wij kunnen de temperatuur van de deeltjes dus verhogen om hen een hoge snelheid te geven. Als de snelheid hoog genoeg is, kan er fusie plaatsvinden.
Echter, als er maar twee deeltjes in de doos zitten, is de kans klein dat zij elkaar toevallig raken en fuseren. Wij kunnen meer deeltjes in de doos stoppen, om zo de kans op fusie te vergroten. Deze deeltjes moeten dan wel allemaal een hoge snelheid hebben. Door het aantal deeltjes te verhogen (en de doos even groot te laten), neemt de dichtheid toe. Om fusie te bereiken is het dus het beste om een combinatie te gebruiken van een hoge dichtheid en hoge temperatuur. Dit is ook het geval in de Zon, waar de dichtheid en de temperatuur in de Zonnekern hoog zijn.

Tot nu hebben wij een belangrijk onderdeel genegeerd: voor fusie hebben we wel een doos nodig om de deeltjes in op te sluiten! Als de deeltjes niet lang genoeg worden opgesloten, zullen er geen botsingen voorkomen en gaat hitte verloren. Het is dus nodig om voor langere tijd een hoge dichtheid en temperatuur vast te houden. Deze tijd wordt standaard aangeven met de opsluitingstijd. De energie moet dus enige tijd worden opgesloten in de doos, de fusiereactor.

Een vergelijkbare opsluitingstijd zien wij bij het verwarmen van een kamer in huis. Als het buiten koud is en er staat een raam open, dan moeten wij veel meer verwarmen om de kamer op de gewenste temperatuur te houden. Wij willen het liefst de energie opgesloten houden in de kamer. Als de opsluitingstijd groot is, dan blijft de energie een lange tijd in de kamer, en hoeft er minder verwarmt te worden.

Fusie op Aarde

De Zon houdt deeltjes goed opgesloten. Op Aarde is de zwaartekracht niet sterk genoeg om dit te doen voor



Figuur 7. Een doos is gevuld met veel positief geladen deeltjes met allemaal een hoge snelheid. Als de snelheid hoog genoeg is zullen veel deeltjes de afstotende kracht overkomen en botsen, en dus fuseren. De kans op botsingen neemt toe naarmate er meer deeltjes in de doos zitten.

ons. Wij moeten dus een andere manier vinden om een hoge temperatuur, dichtheid en opsluitingstijd te bereiken.
Het liefst doen wij dit op een manier die zelf zo min mogelijk energie kost. Een bijkomend voordeel hiervoor is dat de fusiereacties zelf energie leveren, en dus bijdragen aan de hoge temperatuur om andere fusiereacties te starten. Dit is vergelijkbaar met een haardvuur, dat zichzelf brandend houdt als het eenmaal is aangestoken.

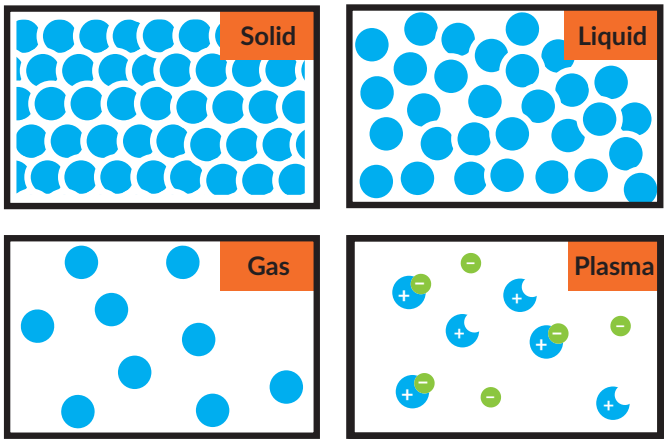
Wij zullen zien dat het een enorme technische uitdaging is om een manier te bereiken om netto energie te produceren met fusiereacties.

1.3 Plasma

De meest gebruikte manier om op Aarde fusie te bereiken is met behulp van een plasma. In deze paragraaf kijken wij naar wat een plasma is en hoe deze gebruikt worden om fusie te bereiken.

De brandstof verhitten

Zoals eerder genoemd, temperatuur is een maat voor energie: het is een maat voor de gemiddelde kinetische energie waarmee deeltjes bewegen. Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de willekeurige beweging. Dit geldt voor alle materie in alle fasen: vaste stoffen, vloeistoffen en gassen. Als een vaste stof –zoals een stuk metaal– wordt verhit, gaan de atomen trillen met steeds grotere oscillaties. Dit verandert



Figuur 8. Een schematische weergave van de drie fasen en een plasma. Alle deeltjes bewegen of trillen: de gemiddelde snelheid hangt af van de temperatuur. De gemiddelde snelheid neemt toe naarmate het materiaal wordt verhit. De beweging is zeer beperkt in een vaste stof. In een vloeistof is al iets meer bewegingsvrijheid voor de deeltjes en in een gas kunnen zij volledig vrij rond bewegen. Er ontstaat een plasma wanneer het gas verder wordt verhit en ioniseert. Het plasma bestaat uit geladen deeltjes.

de vorm van de vaste stof niet veel, het materiaal zal slechts wat uitzetten. Als het warm genoeg wordt, zal de macroscopische (= wat te observeren is met het oog) structuur van de vaste stof veranderen: het zal gaan smelten. De gevormde vloeistof zal ook verder veranderen wanneer de verhitting doorgaat: het zal verdampen en een gas vormen. Tijdens het verdampen worden de verbindingen tussen moleculen volledig verbroken en kunnen de moleculen vrij rond bewegen. Er is alleen interactie tussen deeltjes door botsingen.

De overgang tussen twee fasen heet een faseovergang. De temperatuur waarop dit voorkomt is afhankelijk van het materiaal: welke moleculen het zijn en welke bindingen ertussen bestaan. Sommige materialen smelten al op lage temperatuur (chocolade, kaarsvet) terwijl andere –zoals metalen– pas smelten op hoge temperatuur. Sommige materialen verdampen al op een lage temperatuur, waardoor zij in de natuur alleen voorkomen in de gas fase. Denk bijvoorbeeld aan moleculair zuurstof in de lucht die wij inademen, wat al begint te verdampen op het extreem lage kookpunt van –183 graden Celsius.

De dichtheid van een materiaal is ook afhankelijk van de fase: over het algemeen zetten materialen uit wanneer zij smelten of verdampen. De dichtheid daalt hierdoor, want het aantal deeltjes blijft gelijk tijdens het uitzetten. Onze fusiebrandstof is deuterium en tritium, de twee isotopen van waterstof. Op kamertemperatuur bevindt waterstof zich in de gasfase. Onze brandstof komt dus voor in lage dichtheid, zeker wanneer wij dit verder verhitten tot heel hoge temperatuur. Let op: in ons plasma zijn dit waterstofatomen, er komen geen moleculen voor met deuterium of tritium.

Ionisatie

Wat gebeurt er wanneer een gas verder wordt verhit? Kan een gas nog een faseovergang ondergaan wanneer de temperatuur toeneemt? Op een manier, ja: als gassen heet genoeg worden, vindt er een doorslag plaats in het gas. Deze doorslag lijkt op een faseovergang. Bij deze gasdoorslag worden de bindingen tussen de atoomkern en de elektronen afgebroken, in plaats van de bindingen tussen moleculen zoals bij smelten en verdampen. De gasdoorslag komt voor wanneer een gas zo sterk wordt verhit dat de energie van sommige gasdeeltjes boven een drempelwaarde komt, de ionisatie-energie. Het atoom wordt hier verbroken: het atoom verliest één of meer elektronen, en het atoom wordt een ion. Dit proces heet ionisatie. De meeste atomen hebben meerdere elektronen, en kunnen dus ook meer elektronen verliezen. Als alle elektronen worden weggehaald, dan is het atoom volledig geïoniseerd. Er

blijft een positieve atoomkern over en vrije elektronen in het gas. Een gas dat vrije ionen en elektronen bevat, wordt een plasma genoemd. Een plasma is dus een geïoniseerd gas, bestaande uit vrije ionen en vrije elektronen. Vaak worden niet alle gasdeeltjes geïoniseerd, en is het plasma een mix van geladen en neutrale deeltjes. Als wel alle deeltjes geïoniseerd worden, spreken wij van een volledig geïoniseerd plasma.

Figuur 9. Voorbeelden van plasma's. Van boven naar beneden, van links naar rechts, zien wij: aurora borealis (noorderlicht), een neonlicht, bliksem, een experimenteel plasma, de Zon, en een plasma in de MAST bolvormige tokamak. Bron: NASA, Pixabay/Pexels, Pixabay/FelixMittermeier, Plasmalab TU Eindhoven/ J.P.K.W. Frankemölle, NASA/ Solar Dynamics Observatory & CCFE.

Plasma's vinden

"Klinkt moeilijk, zo'n plasma maken," denk je misschien. Echter, plasma's zijn de meest voorkomende vorm van materie in het universum. De meeste objecten in het heelal zijn plasma's: sterren, nebula's en meer. Plasma's komen minder voor op Aarde, maar zijn nog steeds aanwezig. Bliksem is een plasma, het noorderlicht is een plasma in een hoge atmosfeerlaag, en –afhankelijk van de exacte definitie van een plasma– is vuur ook een plasma.

Naast het voorkomen in de natuur zijn plasma's alom aanwezig in industrie. Van desinfecterende

apparaten in ziekenhuizen, tot het fabricatieproces van computerchips, zonnepanelen en nog veel meer.
Er zijn meerdere manieren om een plasma te creëren. Het verhogen van de temperatuur is een methode, waardoor er naar plasma ook wel wordt verwezen als de “vierde fase”. Het is echter ook mogelijk om een plasma te creëren met hulp van ultraviolet licht of hoogspanning, methoden die niet werken voor andere faseovergangen!

Verschil tussen een gas en een plasma

Wat is nu het verschil tussen een gas en een plasma? Het grootste verschil is dus dat een plasma geladen atomen (ionen) of moleculen en vrije elektronen bevat. Er zijn dus vrij bewegende ladingen. Een gas bestaat alleen uit neutrale atomen of moleculen. Een plasma kan dus elektrische stroom geleiden, net als een metalen draad. Daarnaast is een plasma dus gevoelig voor elektrische en magnetische velden. Dit is belangrijk voor onze manier om fusie te bereiken. Wij kijken nu eerst naar wat elektrische en magnetische velden zijn, en hoe een plasma hierop reageert.

Elektrische en magnetische velden

Elektrische velden beschrijven hoe een geladen deeltje andere geladen deeltjes beïnvloed. Een geladen deeltje

Klassikale opdracht 1.3
Het verschil tussen een plasma en een gas zit er dus in of er geladen deeltjes aanwezig zijn of niet. Daarnaast gloeien de meeste plasma’s zichtbaar, terwijl gassen dat niet doen en vaak onzichtbaar zijn. Waarom gloeien plasma’s? Kies uit:

(A) Op hoge temperatuur begint alles te gloeien. Plasma’s gloeien dus doordat zij vaak een hoge temperatuur hebben.

(B) De geladen deeltjes kunnen vrij bewegen en botsen. Er is een kans dat een vrij elektron een positief ion tegenkomt, botst, samenvoegt, en een neutraal atoom vormt. Bij dit proces komt licht vrij, wat in het zichtbare spectrum kan vallen.

(C) Bij sommige kernreacties komt licht vrij. Als dit licht in het zichtbare spectrum valt, lijkt het plasma te gloeien.

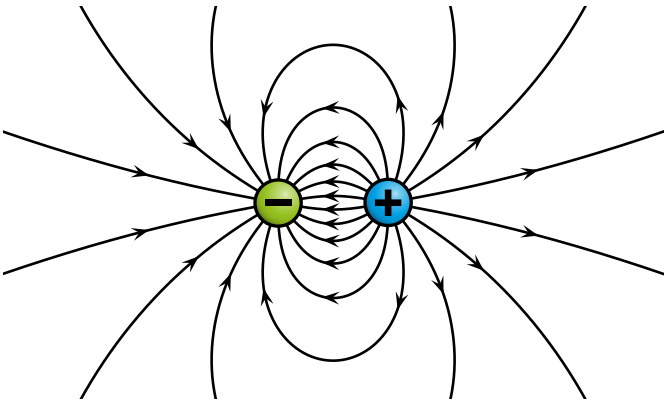
ASIDE

Bliksem

De geleidbaarheid van plasma's verklaart wat bliksem is. Bliksem is een enorme elektrische stroom tussen een geladen wolk en het Aardoppervlak. Door het grote verschil in lading tussen de wolk en Aardoppervlak ondergaat de lucht een gasdoorslag. De lucht vormt zo tijdelijk een plasma, dat veel lading geleidt. Zodra alle lading is getransporteerd van de wolk naar de Aarde (of andersom), stopt de geleiding en is de bliksem weg. Dit gebeurt allemaal zo snel dat wij het zien als een flits.

trekt namelijk andere geladen deeltjes aan, of stoot ze af, afhankelijk of zij dezelfde (++/−−) of tegengestelde (+−/−+) lading hebben.

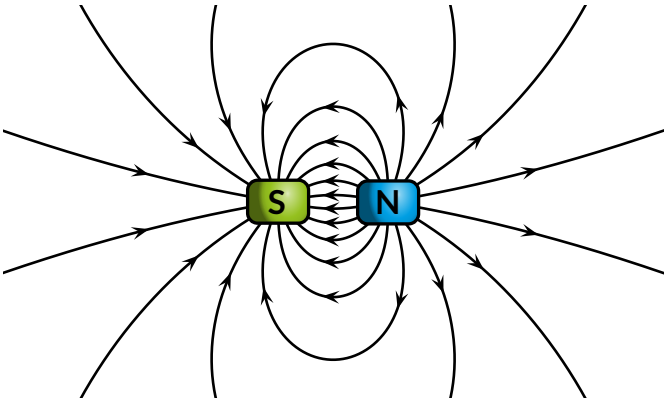
De sterkte van de interactie tussen geladen deeltjes hangt af van hun onderlinge afstand. Stel je voor dat een geladen deeltje vastgezet wordt, en hoe een ander deeltje –een "testdeeltje"– zou reageren op het vastgezette deeltje. Wordt het testdeeltje dichtbij geplaatst, dan zou deze sterk reageren op het vastgezette deeltje, door sterk aangetrokken of afgestoten te worden. Dit betekent dat het elektrisch veld van het vastgezette deeltje sterk is op deze plek van



Figuur 10. Een schematische weergave van een elektrisch veld tussen een positief en een negatief geladen deeltje. Een aantal elektrische veldlijnen zijn getekend. De lijnen hebben een richting, namelijk van positief naar negatief. Aangepast van: Wikimedia Commons/Geek3.

het testdeeltje. Zou het testdeeltje ver weg zijn, dan zou het maar zwak reageren op het vastgezette deeltje: het elektrisch veld van het vastgezette deeltje is zeer zwak op verre afstanden.

Wat als wij ons dit inbeelden voor heel veel testdeeltjes rondom een vastgezet deeltje? Op deze manier krijgen wij een idee voor de interactie tussen testdeeltjes en het vastgezette deeltje op heel veel plekken rondom het vastgezette deeltje: dit wordt het elektrisch veld genoemd. Wij kunnen lijnen tekenen vanaf het deeltje



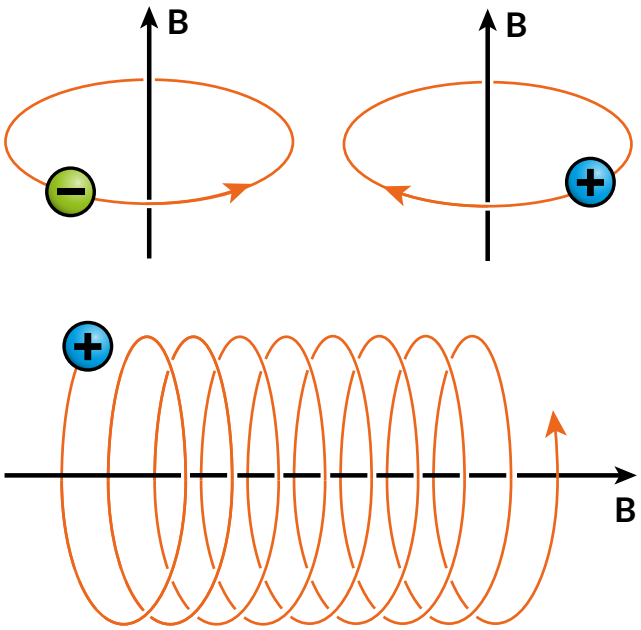
Figuur 11. Een schematische weergave van een magnetisch veld tussen twee “magnetische polen”. Een aantal magnetische veldlijnen zijn getekend. De lijnen hebben een richting, namelijk van “noord” (N) naar “zuid” (S). In werkelijkheid lopen de veldlijnen door de magnetische polen heen, en vormen zo gesloten kringen. Aangepast van: Wikimedia Commons/Geek3.

in alle richtingen, lijnen die elkaar nooit kruisen: elektrische veldlijnen. Op deze manier visualiseren wij het veld. Veldlijnen die dicht bij elkaar liggen geven een sterk elektrisch veld aan, en die verderaf liggen van elkaar geven een zwakker elektrisch veld aan. De richting van de elektrische veldlijnen is altijd van de positieve lading naar de negatieve lading.

Een magnetisch veld is gedefinieerd op een zelfde manier, maar dan gaat het om de interactie tussen twee “magnetische polen” (noord en zuid), in plaats van de interactie tussen positieve en negatieve ladingen. Twee gelijke polen (NN/ZZ) stoten elkaar af en twee tegengestelde polen (NZ/ZN) trekken elkaar aan. Een goede manier om een magnetisch veld te visualiseren, is door magnetische veldlijnen te tekenen. Deze lijnen kruisen elkaar niet en vormen altijd gesloten kringen. Als de kringen door een (magnetisch) materiaal gaan, dan wordt de plek waar de lijnen het materiaal verlaten de “noordpool” genoemd, en de plek waar de lijnen het materiaal binnengaan heet de “zuidpool”. Het deel van de veldlijn dat buiten het materiaal ligt, wijst van “noord” naar “zuid”. Een magnetisch veld kan ook in een vacuüm aanwezig zijn. Er zijn dan geen noord- of zuidpolen, maar wij kunnen nog steeds gesloten veldlijnen tekenen.

Geladen deeltjes in een magnetisch veld

Een geladen deeltje in een magnetisch veld gaat ronddraaien. Deze beweging, ook wel de gyratiebeweging genoemd, is zeer handig voor ons! Wij hebben een plasma nodig op extreem hoge temperatuur, zodat de deeltjes hard genoeg kunnen botsen, zodat zij kunnen fuseren. Dit leidt tot een groot probleem: er zijn geen materialen die deze extreme temperaturen kunnen



Figuur 12. De beweging van een (negatief of positief) geladen deeltje in een magnetisch veld. Als het deeltjes haaks beweegt op het magnetisch veld, zal het gaan ronddraaien rondom een magnetische veldlijn. Als het deeltje ook een snelheid heeft parallel aan het magnetisch veld, zal het deeltje een helische beweging volgen rondom een veldlijn. Deze circulaire/helische beweging rondom magnetische veldlijnen noemen wij de gyratiebeweging.

Klassikale opdracht 1.4

De richting van een magnetisch veld (ook wel, de richting van de magnetische veldlijnen) is afhankelijk van de richting waarin geladen deeltjes bewegen. Teken de richting van het magnetisch veld door een aantal magnetische veldlijnen te tekenen voor de volgende voorbeelden:

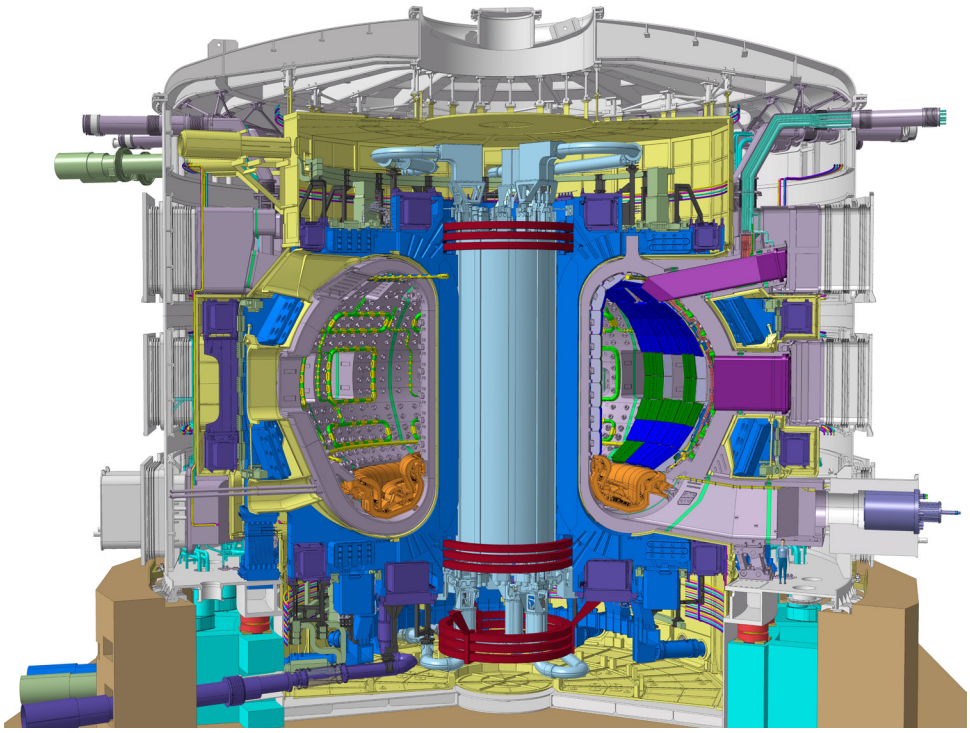
(a) Een elektrische stroom die door een rechte draad loopt.
(b) Een elektrische stroom die tegen de klok in loopt door een ronde draad.
(c) Een elektron dat met de klok mee ronddraait, en een proton dat tegen de klok in ronddraait. Vergelijk deze tekening met die van vraag (b): wat valt op?
(d) Wat kan jij nu zeggen over de richting van een magnetisch veld als gevolg van de richting van een bewegend geladen deeltje?

weerstaan. De materialen van onze fusiereactor zullen dus smelten, waardoor ook het hete plasma razendsnel afkoelt. Er vinden dan geen fusiereacties meer plaats, en de reactor moet gerepareerd worden. Gelukkig kunnen wij iets slims doen met magnetische velden: als wij een sterk magnetisch veld creëren in het plasma, gaat het plasma rond de magnetische veldlijnen draaien, en raakt het de reactor niet meer aan. Wij kunnen een plasma vasthouden met behulp van magnetische velden.

1.4

Een fusiereactor maken

Nu hebben wij de benodigde achtergrondkennis om te beginnen met het bouwen van een fusiereactor! Wij weten wat fusiereacties zijn en hoe de Zon deze tot stand brengt. Wij weten wat de criteria zijn voor fusiereacties: een combinatie van hoge dichtheid en hoge temperatuur, en hierin de energie lang genoeg vasthouden zodat er genoeg fusiereacties plaatsvinden om het plasma op temperatuur te houden. De Zon bereikt dit met zwaartekracht, maar op Aarde moeten wij een andere manier vinden.
De meest gebruikte methode hiervoor is om met magnetische velden het plasma vast te houden, en het plasma een extreem hoge temperatuur te geven. Deze methode heet magnetisch opgesloten fusie.
Nu wij begrijpen hoe magneten het plasma kunnen vasthouden, kijken wij verder wat dit betekent voor een magnetisch fusiereactor. Wij beginnen met het meest voorkomende type fusiereactor: de tokamak.



Figuur 13. Een schematische doorsnede van de ITER tokamak die wordt gebouwd in Zuid-Frankrijk. De kleuren geven aan: de magneten voor het toroïdale (donkerblauw) en het poloïdale (donkerpaars) magnetisch veld, en de centrale spoel (lichtblauw, midden). Bron: ITER Organization, https://www.iter.org.

De tokamak

De oorsprong van het woord “tokamak” komt uit het Russisch: tokamak is een Russisch acroniem dat staat voor “toroïdale kamer met magnetische spoelen” of “toroïdale kamer met axiaal magnetisch veld”. Dat is ook precies wat het is: een donut-vormige kamer omgeven door magnetische spoelen. In de donut bevindt zich een vacuüm, waarin fusiebrandstof (waterstofgas) wordt gespoten, wat vervolgens wordt verhit tot het een plasma vormt op extreem hoge temperatuur (vaak met radiogolven). Dit plasma wordt vastgehouden door de magneten die buiten de donut-vormige kamer liggen (soms ook deels in de kamer).

Geometrie van een tokamak

Voordat wij kijken naar de verschillende magneetsystemen van een standaard tokamak, kijken wij eerst naar de geometrie van een donut-vormig apparaat: een torus.

Een elegante manier om over een torus na te denken is in twee constanten en twee coördinaten: de hoofdradius R, de bijradius a, de poloïdale hoek θ (theta) en de toroïdale hoek ϕ (phi). Een voorbeeld van een torus is gegeven in figuur 14, waar deze variabelen ook staan aangegeven.

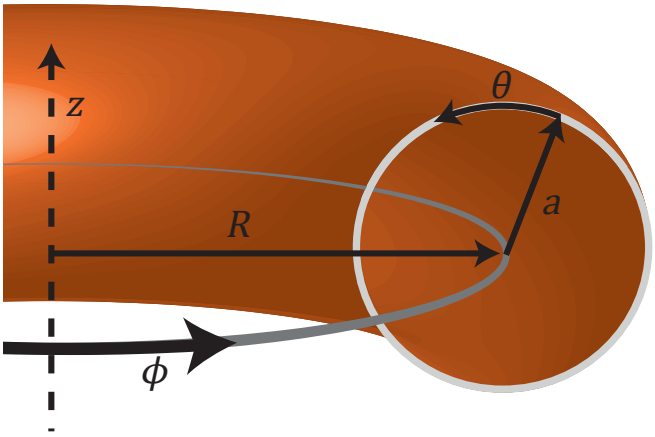
Klassikale opdracht 1.5

Verschillende tokamaks hebben verschillende aspectverhoudingen: de verhouding tussen de grote hoofdradius R en de kleine bijradius a. Hierdoor kan de vorm van tokamaks best verschillend. Laten wij verder kijken naar deze vormen.
(a) Schets een torus met een grote hoofdradius, maar een kleine bijradius. Hoe ziet dit er uit?
(b) Schets een torus met een kleine hoofdradius, maar een grote bijradius. Waarom is dit moeilijk om te tekenen?
(c) Wat gebeurt er als de hoofdradius wordt verkleint, maar de bijradius groot blijft? Welke vorm blijft er uiteindelijk over?
(d) Wat gebeurt er als de aspectverhouding veranderd?
(e) Wat is de laagst mogelijke aspectverhouding voor een torus?

Klassikale opdracht 1.6

Zoals wij hebben gezien, zijn er twee richtingen in een torus te onderscheiden: de toroïdale en poloïdale richting. Deze kunnen verwarrend zijn, dus laten wij er verder naar kijken.
(a) Maak een schets van de twee mogelijke doorsnedes van een torus.
(b) Welke doorsnede is de poloïdale doorsnede? Welke is de toroïdale doorsnede? Wat valt op aan deze doorsnedes?

De hoofd- en bijradius kunnen worden beschouwd als de radii van twee verschillende cirkels: een radius van het midden van het "gat" van de donut naar het midden van een kleinere cirkel van de donut (hoofdradius R), en de radius van de kleinere cirkel (bijradius a). In werkelijkheid is de kleinere cirkel van de donut vaak meer driehoekig gevormd, als een hoofdletter D. Dit verbetert de werking van de tokamak. Een voorbeeld van deze vorm is te zien in de magneet van figuur 15.
De twee torus-coördinaten zijn de poloïdale en toroïdale coördinaten, aangegeven als hoeken θ en ϕ.
De toroïdale richting is de "lange kant om de torus".
De poloïdale richting is de "korte kant om de torus".
De torus is symmetrisch, en het is dus nodig om te definiëren waar de toroïdale hoek nul is. Het buitenste punt van de torus (zo ver mogelijk van het midden) wordt vaak gebruikt als plek waar de poloïdale hoek nul is.



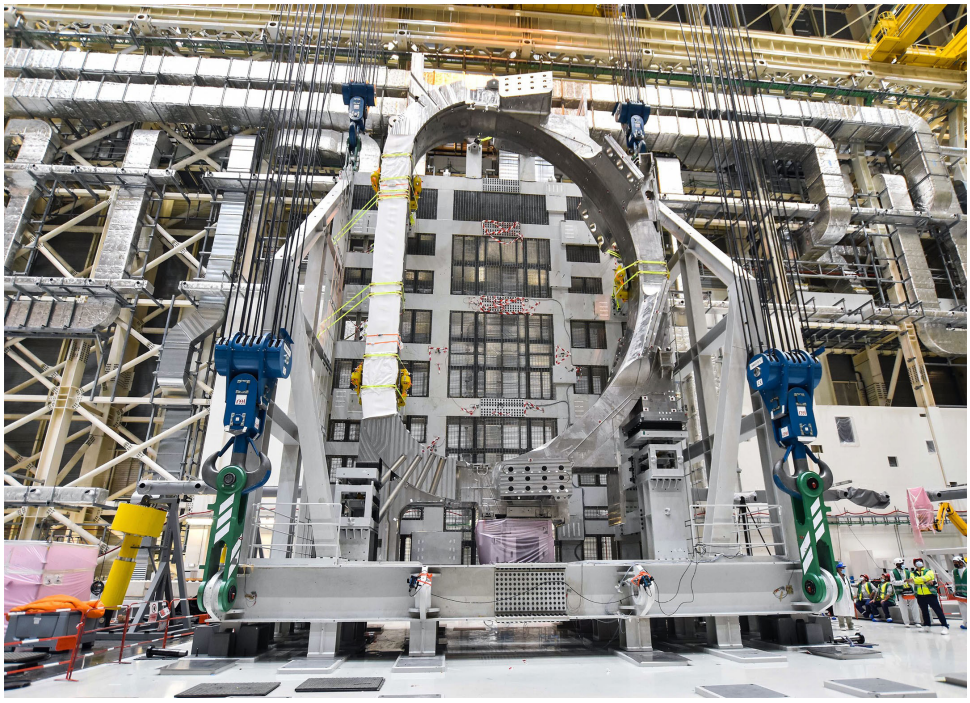
Figuur 14. Schematische weergave van de torus-geometrie. Weergegeven staan de hoofdradius R, de bijradius a, de toroïdale hoek θ en de poloïdale hoek ϕ. Credit: Jens Peter Frankemölle/TU Eindhoven.

Magnetische spoelen

Nu wij bekend zijn met de geometrie van een tokamak, gaan wij kijken naar de verschillende magneten die daarbij horen en hoe deze heten. Daarna wordt het duidelijk waarom wij al deze verschillende magneten nodig hebben om het plasma vast te houden in de donut-vormige reactor.

Als geladen deeltjes in een gesloten kring bewegen, dan spreken wij van een elektrische stroom, met de richting van de stroom gedefinieerd in de richting van de positief-geladen bewegende deeltjes. Voor een stroom die bestaat uit elektronen (of negatieve ionen) is de stroomrichting dus tegengesteld aan de richting die de elektronen op bewegen. Elektronen bewegen door metalen draden wanneer hier een potentiaalverschil (= voltage) over staat. Een geladen deeltje dat in een cirkel beweegt creëert een magnetisch veld loodrecht op die cirkel, zie figuur 12. Door dus een stroom door een cirkelvormige spoel te laten lopen, kunnen wij een magnetisch veld genereren. De positie van de spoel kunnen wij gebruiken om de richting van het veld te bepalen.

Kijk nog eens naar het overzicht van de ITER tokamak in figuur 13. De set magneten die waarschijnlijk als eerste opviel, zijn de magneten rondom de tokamak, met de magneten gevormd als een hoofdletter D in



Figuur 15. Dit is TF12, de eerste van de achttien D-vormige toroïdale-veld magneten van de ITER reactor. Geproduceerd in Japan, deze reus van 17 meter hoog en 9 meter breed stond rechtop in de ITER Assembly Hall op 9 juni 2021. Bron: ITER Organization, https://www.iter.org.

ASIDE

Spoelen

Elektromagnetische spoelen worden gebruikt om de benodigde magnetische velden te genereren. Zoals behandeld in het vorige hoofdstuk: een geladen deeltje dat beweegt in een gesloten cirkel creëert een magnetisch veld dat –in het midden van deze cirkel– haaks op de beweging staat (buiten de cirkel buigt het magnetisch veld om tot het in de andere richting staat). De richting van het magnetisch veld in de cirkel is afhankelijk van de lading van het deeltje (positief of negatief), zie figuur 12.
Elektronen kunnen makkelijk door een metaal of een metalen draad bewegen. Een draad die om een object wordt gewonden heet een spoel. Een spoel waar stroom doorheen loopt gedraagt zich als een magneet, en heet dan ook wel een elektromagnetische spoel of een solenoïde.

donkerblauw. Dit zijn de toroïdale-veld magneten. Daarnaast zijn er nog twee belangrijke groepen magneten. Ten eerste de stapel spoelen in het “gat van de donut”: de centrale spoel. Ten tweede, een aantal grote magneten die horizontaal boven en onder de machine liggen: de poloïdale-veld magneten. Deze drie groepen vormen samen het belangrijkste magneetsysteem van de tokamak. Vaak zijn er nog enkele kleinere magneten aanwezig, die de werking van de tokamak wat verbeteren, maar deze zijn minder belangrijk en worden hier niet verder behandeld. Onder de volgende kopjes kijken wij naar de toroïdale-veld magneten en centrale spoel in meer detail.

Toroïdale-veld magneten

De eerste stap om een werkende tokamak te maken, is om er voor te zorgen dat het plasma in de torusvorm blijft. Hiervoor moeten wij het plasma laten bewegen en een magnetisch veld genereren in de toroïdale richting. De geladen deeltjes in het plasma zullen dan de magnetische veldlijnen volgen in een helische baan. Het veld genereren wij door magnetische spoelen te plaatsen rondom het pad waarin wij willen dat het

plasma beweegt. Wij willen dat het plasma door de torus bewegen, en moeten dus magneten om de torus heen plaatsen: de toroïdale-veld magneten! Het magnetische veld vormt zich mooi in de torus wanneer er veel van deze magneten rondom de torus worden geplaatst. Het toroïdale veld is verreweg het sterkste magnetische veld in de tokamak.
Het plasma beweegt nu in de toroïdale richting. Klinkt goed, toch? Waarom hebben wij nu nog meer magneten nodig? Helaas is het plasma instabiel wanneer er alleen een toroïdaal veld aanwezig is. Wetenschappers hebben ontdekt dat dit probleem opgelost kan worden door ook een poloïdaal veld toe te voegen: het resultaat is een helisch magnetisch veld.

Centrale spoel en plasmastroom

De centrale spoel wordt (indirect) gebruikt om dit benodigde helische veld te creëren. De centrale spoel zijn doel is niet om direct een magnetisch veld te genereren, maar om magnetische inductie te gebruiken om een toroïdale stroom te laten lopen door het plasma (een plasma geleidt elektrische stroom!). Wij moeten nog eens kijken naar de theorie van magnetische veldlijnen om magnetische inductie te begrijpen. Zoals eerder besproken, een magnetisch veld kan worden gevisualiseerd door veldlijnen te tekenen die gesloten kringen vormen. De sterkte van een magnetisch veld, B, is afhankelijk van de dichtheid van magnetische veldlijnen. Liggen de veldlijnen dicht bij elkaar in de buurt, dan is het magnetisch veld daar sterk. Liggen de veldlijnen verder uit elkaar, dan is het magnetisch veld daar zwak.

Klassikale opdracht 1.7

Laten wij kijken naar de standaard tokamak, met zijn drie magnetische systemen.

(a) Welke magneten zijn zichtbaar in de poloïdale doorsnede? Hoe heten deze magneten, en is deze naam logisch?
(b) Verklaar de namen van de andere twee groepen magneten.

Nu moeten wij kijken naar magnetische flux. Dit is een grootheid die gelinkt is aan een oppervlakte. Het is gelijk aan de sterkte van het magnetisch veld (de dichtheid van magnetische veldlijnen) vermenigvuldigt met de oppervlakte waar deze veldlijnen doorheen lopen. Magnetische flux kan dus worden gezien als de hoeveelheid magnetisch veld dat een oppervlak "ervaart". De formule van magnetische flux is:

$$\Phi = B\,A\cos(\alpha)$$

met Φ (hoofdletter phi) de magnetische flux, B is de magnetische veldsterkte, A de oppervlakte en α de hoek tussen het oppervlak (specifiek: de normaalvector van het oppervlak) en het magnetisch veld. Φ heeft de eenheid "weber" (Wb) en B heeft de eenheid "tesla" (T).
Met een elektromagnetische spoel genereren wij een magnetisch veld. Met een constante stroomsterkte in de spoel, is ook het magnetisch veld constant. Voor een denkbeeldig oppervlak in de buurt van de spoel is de magnetische flux dus ook constant.
Aan de andere kant, als wij de stroomsterkte door de spoel langzaam verhogen, neemt de magnetische veldsterkte ook langzaam toe. Dit betekent meer magnetische veldlijnen rondom de spoel. De magnetische flux door een denkbeeldig oppervlak neemt dus ook toe.
Echter, de natuur houdt niet van veranderingen in magnetische flux! Bij elke verandering van magnetische flux wordt een zogenoemde elektromotorische kracht (EMK) geïnduceerd. Deze EMK probeert de verandering in magnetische flux tegen te gaan door een voltage te genereren rondom het oppervlak. Dit voltage leidt tot een elektrische stroom in het oppervlak, dat een tegengesteld magnetisch veld genereert.
Kijk bijvoorbeeld naar een spoel. Wanneer wij de stroomsterkte verhogen, neemt het magnetisch veld toe in sterkte, en de hoeveelheid magnetische flux neemt ook toe. Deze verandering in flux creëert een EMK die de verandering tegen probeert te gaan door een stroom op te zetten in de tegengestelde richting van de stroom in de spoel. Dit leidt tot een (zwakker) magnetisch veld dat het originele veld probeert tegen te gaan. Deze neiging om een verandering in flux tegen te gaan gebeurd in elk geleidend materiaal in de buurt van de spoel. Belangrijk:

de sterkte van de EMK is afhankelijk van hoe snel de magnetische flux verandert, maar niet van de sterkte van het magnetisch veld.
Twee spoelen bij elkaar in de buurt kunnen elkaar hierdoor beïnvloeden. Stel er loopt een veranderende stroom door de ene spoel, dan leidt dit tot een verandering in magnetische flux in allebei de spoelen! De tweede spoel "voelt" namelijk het magnetisch veld van de eerste spoel. Deze verandering in flux induceert dus een stroom in de tweede spoel. Dit proces heet (elektro)magnetische inductie. Dit maakt het mogelijk om stromen en magnetische velden te induceren in spoelen of objecten die elkaar niet aanraken!
De EMK kan worden verhoogd door het aantal windingen van de spoel te vergroten: elke winding voelt dezelfde verandering in magnetische flux en is met de andere windingen verbonden. De totale veranderende

ASIDE

Naamgeving magnetische veldsterkte

De sterkte van het magnetisch veld B is een belangrijk concept in de natuurkunde van elektriciteit en magnetisme. Het is ook een grootheid die verwarring kan geven, door de vele namen die het heeft: magnetische veldsterkte, magnetische veldlijndichtheid, magnetische fluxdichtheid, of magnetische inductie.
De verschillende namen komen door wat conventioneel is binnen een vakgebied. De ene auteur gebruikt een naam, de andere auteur een andere. Wanneer er meer wiskunde wordt gebruikt om magnetisme te beschrijven, worden veldlijnen niet meer gebruikt, maar gaat het over vectorvelden. Hier spreekt iedereen nog over dezelfde B, maar in gevorderde literatuur heet dit vaak magnetische inductie of magnetische flux dichtheid. In onze tekst spreken wij meer over veldlijnen, dus spreken wij over "magnetische veldsterkte" of "magnetische veldlijndichtheid". Dit voorkomt ook verwarring tussen de naam "magnetische inductie" en het proces magnetische inductie. Ook goed om te noemen: de eenheid van magnetische veldsterkte is de tesla, genoemd naar de uitvinder Nikola Tesla. Het bedrijf met dezelfde naam heeft zijn naam ook hiervandaan.

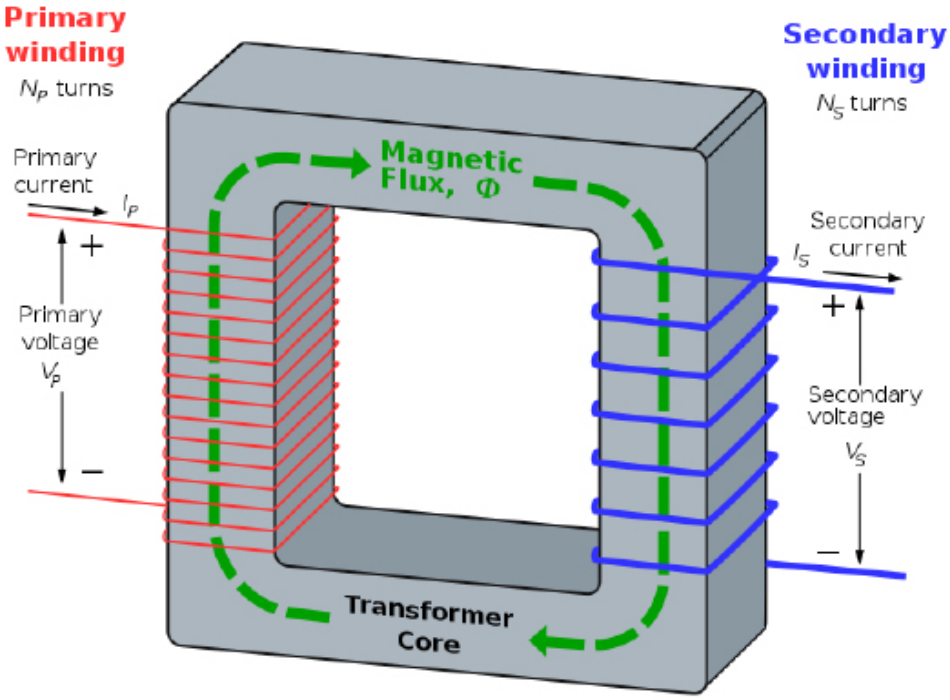
magnetische flux van de spoel telt dus op. De totale EMK is berekend door de verandering van magnetische flux te vermenigvuldigen met het aantal windingen in de spoel. Een voorbeeld waar dit nuttig is, is de transformator. Een transformator bestaat uit twee spoelen: een primaire en een secundaire spoel. Een wisselstroom (de flux verandert continue) in de primaire spoel induceert een wisselstroom in de secundaire spoel. In een ideale transformator gaat geen vermogen verloren tijdens de inductie, en is het vermogen dus gelijk in de primaire en secundaire spoel:

$$I_p V_p = I_s V_s,$$

waar I_p en I_s de stroomsterktes zijn door de primaire (p) en secundaire (s) spoel, en V_p en V_s de voltages zijn over de spoelen. De totale EMK die de secundaire spoel ervaart is afhankelijk van het aantal windingen in elke spoel, dit leidt tot:

$$V_p / V_s = N_p / N_s ,$$

waar N_p en N_s de aantallen windingen zijn in de primaire en de secundaire spoel. Hierdoor kan het aantal windingen worden gebruikt om een transformator te maken die voltages of stroomsterktes transformeert op elke manier die wij zouden willen.
Nu terug naar onze tokamak. De centrale spoel in de tokamak is eigenlijk een grote primaire spoel met vele windingen. Het plasma is geleidend, en dient als secundaire spoel met maar één winding. Dit maakt de tokamak tot een grote transformator! Door een wisselende stroom te gebruiken in de centrale spoel, wordt een stroom geïnduceerd in het midden van het plasma. Deze stroom loopt in de toroïdale richting, en creëert het poloïdale magnetische veld dat wij nodig hebben! Hierdoor hebben wij nu zowel een toroïdaal en een poloïdaal magnetisch veld, wat samen ons cruciale helische veld vormt voor stabiele opsluiting van het plasma!



Figuur 16. Een transformator met een ijzeren kern. Een wisselstroom loopt door de primaire spoel en induceert een veranderend magnetisch veld in de kern. De ijzeren kern begeleidt dit veld naar de tweede spoel, waar een veranderende magnetische flux een stroom induceert in de secundaire spoel. Er lopen veel veldlijnen door de kern, in plaats van door de lucht rondom de spoelen. In een tokamak lopen de primaire spoel (de centrale solenoïde) en de secundaire spoel (het plasma) door elkaar heen, als twee ketens van een ketting. Bron: Wikimedia Commons/ BillC

Poloïdale-veld magneten en extra magneten

De plasmastroom genereert dus het poloïdale magnetische veld dat wij nodig hebben. Je zou verwachten dat de poloïdale-veld magneten dit magnetische veld genereren, maar hun functie is hoofdzakelijk om de vorm en positie van het plasma te beheren. Het veld gecreëerd door de poloïdale-veld magneten is veel zwakker dan het toroïdale veld, en zwakker dan het poloïdale veld gegenereerd door de plasmastroom.
Naast de toroïdale-veld magneten, de centrale spoel en de poloïdale-veld magneten zijn er nog veel meer

Klassikale opdracht 1.8

Het gebruik van magnetische inductie in een tokamak zorgt voor een groot nadeel: het maakt de tokamak een apparaat dat in pulsen werkt, i.p.v. continue.

(a) Hoe leidt magnetische opsluiting tot een apparaat dat in pulsen werkt?
(b) Waarom is dit een probleem voor een fusie reactor?

Zie ook opdracht A.11.

magneten rondom een tokamak. Deze worden gebruikt voor controledoeleinden of regeltechniek. Wij gaan niet verder in op deze specifieke magneten.

Magnetische opsluiting

Nu begrijpen wij hoe een stabiel magnetisch systeem een plasma kan opsluiten: door toroïdale-veld magneten te gebruiken om een toroïdaal magnetisch veld te genereren, in combinatie met een plasmastroom die een poloïdaal veld genereert, wat samen leidt tot een helisch magnetisch veld.
Er blijft nog één onderdeel over om hier te bespreken: de drukbalans in de tokamak. In een tokamak is een uitwaartse en een inwaartse druk. Als deze gelijk zijn, blijft het plasma stabiel op zijn plek. Dit is hetzelfde als in een fietswiel: de lucht in de band moet hard genoeg naar buiten drukken op het rubber om de druk van de grond tegen te gaan. Is de luchtdruk te laag, dan "wint" de grond en is de band plat.
In een tokamak hebben wij een uitwaartse druk van het plasma. Het plasma zet dus uit, tenzij er een kracht is die terugduwt. Welke kracht is dit? Er is slechts één kandidaat: de Lorentz kracht! Het plasma draagt een stroom, die een kracht voelt door het magnetische veld. Dit komt doordat het magnetische veld niet puur in de toroïdale richting is. Het resultaat is een kracht die het plasma naar binnen duwt. Dit is de kracht die het plasma bij elkaar houdt, wat leidt tot magnetische opsluiting. Met magnetische opsluiting kunnen wij fusieapparaten maken, zoals tokamaks, om de omstandigheden te genereren waarbij fusiereacties kunnen plaatsvinden op Aarde.

Nu wij door de eerst module heen zijn, weten wij al veel van fusie: wij begrijpen het energieprobleem, weten over fusie in de Zon, weten wanneer fusie plaatsvindt, en weten hoe wij deze omstandigheden op Aarde kunnen nabootsen in het meest voorkomende fusieapparaat, de tokamak. Met de volgende modules kunnen wij meer kennis opdoen over kernfusie vanuit vier verschillende perspectieven.

1.5 Meer lezen

Om meer te leren over kernfusie, zijn er vier modules beschikbaar die elk op een ander aspect van fusie ingaan. Dit zijn de volgende:

Module 2: De Weg naar Fusie

In deze module wordt de geschiedenis en ontwikkeling van fusie uitgelegd aan de hand van verschillende reactorontwerpen en –pogingen. De belangrijkste stappen worden besproken over hoe de mensheid tot de huidige stand van fusie is gekomen, inclusief de actuele status van het onderzoek.

Module 3: Plasma Controle

In deze module wordt uitgelegd hoe een plasma wordt verhit, gemeten en gereguleerd. Er zijn verschillende manieren om een plasma te verhitten, en door de extreme temperatuur zijn er speciale meettechnieken nodig. Door verschillende metingen te doen van het plasma, is het mogelijk om de fusiereactor onder controle te houden.

Module 4: Fusie Materialen

In deze module worden de uitdagingen van fusie in het materiaalonderzoek uitgelegd. De wand van de fusiereactor moet bestaan uit bijzondere materialen die de extreme fusieomstandigheden kunnen weerstaan. Elk component van het fusieapparaat heeft zijn eigen doel en heeft eigen materiaalvereisten, van het stoppen van neutronen tot het sterk afgekoeld worden om een magneetveld te genereren.

Module 5: Toepassing

In deze module wordt fusie-energie bekeken vanuit de elektriciteitsmarkt en door het te vergelijken met andere energiebronnen. Naast de getallen speelt de energiepolitiek ook een belangrijke rol in de vraag of fusie het haalt als de volgende energiebron.

Online materiaal

Naast de verschillende lesmodules, is er veel informatie en educatiemateriaal beschikbaar online. In elke module worden interessante boeken, artikelen of links genoemd.

Een leuk voorbeeld is de "Operation Tokamak" app, die gratis te downloaden is in de iOS AppStore en de Android Play Store:

Operation Tokamak in the iOS AppStore

Operation Tokamak in the Android Play Store

https://apps.apple.com/us/ app/operation-tokamak/ id808190835

https://play.google.com/store/ apps/details?id=dk. markfilm. operationtokamak&hl=nl&gl=US

In deze app bedient de speler een tokamak door de stroomsterkte van de magneten en het verhittingssysteem te reguleren. Door de reactor op de juiste omstandigheden te houden, en instabiliteiten tegen te gaan wanneer deze verschijnen, kunnen de fusiereacties gaande worden gehouden en wordt zoveel mogelijk energie geproduceerd.

Colofon

Fusie Basis is de eerste van vijf modules over kernfusie. Zij leren over basisconcepten in de kernfusie op het middelbare schoolniveau. Alle modules kunnen gratis gebruikt worden en zijn te vinden op de FuseNet website, https://fusenet.eu.

Auteur
Sander Korteweg
Michael Goddijn

Vertaling
Michael Goddijn
Roger Jaspers

Redacteur
Sander Korteweg
Sjoukje Tijmensen-Hoekstra

Grafisch ontwerp
Jens Peter Frankemölle
David Becker

Cover foto
NASA/Solar Dynamics Observatory

Uitgever
FuseNet

Financiële ondersteuning
Dit project zou niet mogelijk zijn geweest zonder financiële ondersteuning van EUROfusion.

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.

FuseNet
The European Fusion Education Network

EUROfusion