Modul 1

Introduktion til fusion

Forfatter: Sander Korteweg

Modulets formål er at introducere fusion med fokus på hvorfor og hvordan. Hvorfor er fusion interessant – ikke bare for forskere men for alle? Hvordan virker fusion, både i princippet og som en metode til at producere energi?

Disse spørgsmål fører automatisk til et sidste spørgsmål: Hvad er udfordringen? Hvorfor er det så svært at producere energi fra fusion?

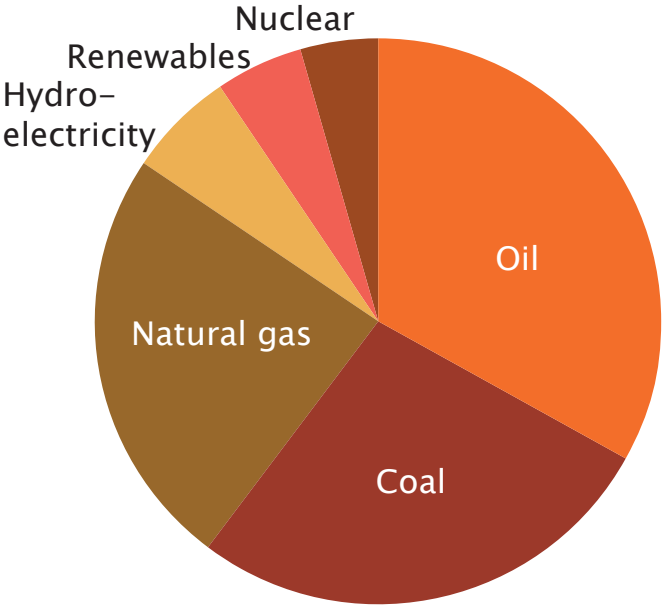
Efter dette modul vil du have kendskab til basal viden om fusion og vil være i stand til at sammenligne fusion, som en potentiel energikilde, med andre energikilder. Du vil være i stand til at diskutere potentialet i fusion samt forstå hvorfor vejen til fusionsenergi er så udfordrende.

Hvis du vil lære endnu mere om fusion efter dette modul, kan du arbejde med de andre moduler, som undersøger mere specifikke aspekter af fusion.

1.1 Energiens rolle i vores verden

Energimixet

Det første vigtige spørgsmål for fusion kan udtrykkes som: ”Hvorfor er fusion overhovedet interessant?” For at svare på dette spørgsmål skal vi først undersøge energi generelt, ikke kun fusion. Siden opfindelsen af dampmaskinen er konceptet med energi blevet mere og mere vigtigt. Energi bruges til at opvarme vores hjem om vinteren og køle vores hjem om sommeren. Energi giver mulighed for, at maskiner, biler og apparater udfører arbejde for os. Fra transport til at drive vores elektriske apparater; den moderne verden kan ikke fungere uden energi.



Figur 1. Et cirkeldiagram af verdens energimix i 2019 opdelt efter energikilde. Langt den største del kommer fra olie efterfulgt af kul og naturgas. Hydroelektricitet, vedvarende energi og atomkraft ses også i et mindre omfang. Kilde: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

Alt denne energi, som vi har brug for, skal produceres på en måde. Siden den industrielle revolution har menneskeheden opdaget og udviklet mange smarte måder at producere brugbar energi på: Såkaldte energikilder. Disse energikilder kan kategoriseres, hvilket fører til to hovedkategorier: **ikke-vedvarende energi** og **vedvarende energi**. Man kan yderligere

komplicere situationen ved at kategorisere efter **bæredygtig energi** og **ikke-bæredygtig energi**.

Termerne bæredygtig og vedvarende bruges ofte i flæng. Men vedvarende er ikke det samme som bæredygtig. Vedvarende betyder, at det bliver fornyet eller genopfyldt over tid, mens bæredygtig betyder, at det kan blive vedligeholdt over længere tid (uden skadelige konsekvenser for fremtiden).

At fælde træer og plante nye træer er vedvarende men ikke altid bæredygtigt: De nyligt plantede skud vil gro og blive nye træer, og efter nok tid vil de gamle træer blive erstattet af de nye, og processen kan begynde på ny. Men hvis træerne fældes hurtigere end nye skud plantes, er processen ikke bæredygtigt: Til sidst er der ikke flere træer. Til gengæld kan en proces være bæredygtig men ikke vedvarende fx kernefission (bemærk fission ikke er det samme som fusion). Fission er ikke vedvarende (uran-depoter bliver ikke naturligt genopfyldt), men der er nok uran til at vedligeholde en masse kraftværker for en anseelig mængde tid (dog ikke for evigt). Med ansvarlig håndtering af det radioaktive affald er fission uden skadelige konsekvenser for fremtiden. Derfor ses fission som en ikke-vedvarende energikilde, men den kan være bæredygtig.

Bemærkninger

Hvad med grøn eller ren energi?

Udtrykkene grøn energi eller ren energi er nemme at støde på i hver-dagen. Grøn og ren er mærkater, der beskriver energikildens mil-jømæssige indflydelse: De indikerer, at energikilden ikke udleder ska-delige (drivhus)gasser (mens der produceres energi). Det er diskuta-belt, hvad der egentlig definerer en ren energikilde, eftersom pro-duktionen og transporten af selve den rene energikilde stadig kan føre til udledning af drivhusgasser. Bæredygtig energi medfører nor-malt, at energiproduktionen kan opretholdes i længere tid ad gangen uden (velkendte) skadelige konsekvenser. Siden dette er mere veldefi-neret end grøn eller ren energi, vil fokusset her være på bæredygtig energi.

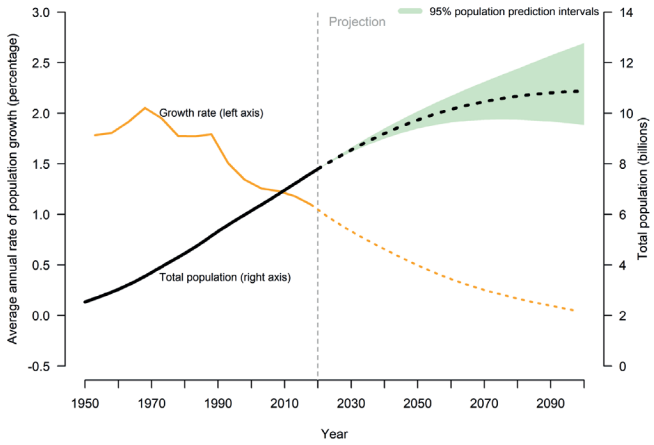
Opgave 1.1
(a) Estimer procentdelen af dit lands energiforbrug (energimix), der stammer fra bæredygtige kilder såsom sol, vind, hydro osv. Forklar tankegangen bag dit estimat. Antog du noget?
(b) Sammenlign dit estimat med en anden studerendes estimat. Er der en stor forskel? Sammenlign jeres tankegange bag estimaterne: Antog I noget forskelligt?
(c) Find jeres lands energifordeling online. Sammenlign jeres estimater med de egentlige tal. Var I tæt på?

Se også opgaverne: A.1, A.2, A.3.

Energiproblemet

Nu har du bedre forståelse for energimixet og den nødvendige mængde energi for at holde vores samfund kørende, men vi er ikke kommet nærmere på at forstå præcis, hvorfor fusion er vigtigt her. For at forstå det bliver vi nødt til at undersøge **energiproblemet**, hvilket kan kobles på følgende udviklinger.

Det globale befolkningstal er stigende. Det er steget fra 6 milliarder i 1999 til 7.8 milliarder i 2020 og forventes at gå mod 8.5 milliarder i 2030, 9.7 milliarder i 2050 og 10.9 milliarder i 2100, se også figur 2.



Figur 2. Vækstraten for det globale befolkningstal har været dalende siden 1970'erne. Dette ses via den orange graf. Derfor går det globale befolkningstal – den sorte graf – jævnt mod en konstant værdi på omkring 11 milliarder. Det grønne område repræsenterer usikkerheden i den anvendte model. Bemærk vækstraten går mod nul og ikke en negativ værdi. Kilde: United Nations, Department of Eco-nomic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

Det gennemsnitlige energiforbrug per person er stigende. Lande udvikler sig, hvilket fører til bedre levestandarder. Bedre levestandarder medfører typisk en forøgelse i energibehov fx på grund af udviklingen

af grundlæggende serviceydelser, infrastruktur eller forøget adgang/tilgængelighed af elektricitet og internettet. USA har erklæret, at ethvert menneske har ret til en levestandard, der er tilstrækkelig med hensyn til helbred og velvære. At sikre sig at alle får adgang til tilstrækkelige levestandarder har en højere prioritet end at reducere det gennemsnitlige energiforbrug per person, og det vil være uetisk at nægte mennesker disse bedre levestandarder.

Det meste energi kommer stadig fra kilder, der er skadelige for miljøet specielt mht. udledning af **drivhusgasser**. Fossile brændstoffer dominerer vores energiforsyning, og mens vedvarende og rene energikilder er i vækst, så er væksttempoet ikke højt nok til at erstatte vores afhængighed af fossile brændstoffer, før irreversibel **klimaforandring** forventes at finde sted. Klimaforandring vil have mange skadelige effekter på verdenen: Den stigende temperatur forventes at føre til mere ekstremt vejr (fx skovbrande og hedebølger), og klimaforandring forventes også at have en negativ effekt på menneskers helbred, økosystemet samt den globale økonomi. Så fossile brændstoffer er ikke en bæredygtig løsning til fremtiden: Klimaforandring finder allerede sted, og vi har brug for at handle nu.

Kombinationen af disse tre faktorer er energiproblemet, som verdenen nu står over for.

Løsninger til energiproblemet

Som med ethvert problem skal der gerne være et antal mulige løsninger. Mht. energiproblemet kan man overveje mange mulige løsninger, men mange af disse løsninger kommer med strenge ændringer til vores livsstil og gennemsnitlige levestandarder: To ting som de fleste mennesker ikke ønsker at give afkald på. Logisk set er der to primære løsninger på energiproblemet:

1) Ved drastisk at **sænke det gennemsnitlige energibehov**. Dette kan gøres enten ved at effektivisere processer (en teknologisk udfordring) eller ved drastisk at sænke det individuelle energibehov (et samfundsmæssigt problem). Optimering af

energieffektivitet har sine begrænsninger: Der vil altid være et energitab – fx varmetab i en ledning eller friktion i en maskine. På samme tid er der også mange ting, der kan forberedes, fra bedre isolering i bygninger til mere effektivt brug af varme, transport eller resurser. At sænke det gennemsnitlige energibehov er til gengæld en rentabel, hvis ikke nødvendig, mulighed. Klimaforandringer vil have en drastisk indflydelse på vores liv, uagtet om bryder os om det eller ej. Derfor er livsstilsforandringer uundgåelige, specielt når man overvejer, at på nuværende tidspunkt er det en lille, rig del af den globale befolkning, der forbruger størstedelen af den producerede energi, mens fattigere mennesker forbruger mindre – mange mennesker har stadig ikke engang adgang til elektricitet. Man kan ikke forvente, at dem uden elektricitet forbliver uden elektricitet, fordi andre forbruger så meget mere.

2) Ved drastisk at **forøge mængden af bæredygtigt produceret energi**. Hvis man stoppede med at anvende fossile brændstoffer med det samme, ville man sænke udledningen af drivhusgasser betydeligt! Men dette er nemmere sagt end gjort. Politiske og økonomiske aspekter skal tages i betragtning: Den fossile brændstofindustri er omfattende og kan ikke bare forsvinde fra den ene dag til den anden. Fossile brændstoffer skal erstattes af elektriske alternativer. Indenfor nogle områder kan man allerede observere hurtige forandringer (fx elektriske biler), men dette retningsskift mod elektriske alternativer er kun så hurtigt som produktionen og opskaleringen af disse alternativer. Vi har behov for tid til at overgå til elektriske alternativer, men samtidig løber vi tør for tid til at forhindre de skadelige effekter associeret med klimaforandring.

Tydeligvis fører det ovenstående til et enormt samfundsmæssigt problem, som vil påvirke alt levende på vores planet.

Når man kigger på metoder til at forøge mængden af bæredygtigt produceret energi, ender man unægteligt med at overveje de velkendte vedvarende energikilder: vind- og solenergi. Det eneste problem med disse er, at de ikke producerer energi uafbrudt, men vores samfund

kører uafbrudt. Derfor kræver disse energikilder tilstrækkelig energiopbevaring. Sol- og vindenergi varierer i løbet af en dag, men hovedproblemet ligger i deres sæsonbestemthed og deres afhængighed af deres placering. Om vinteren er dagene kortere, og der er mindre lys til rådighed sammenlignet med sommerdage, mens vinden er kraftigere om vinteren sammenlignet med sommeren. På samme tid, afhængigt af geografisk placering, vil nogle steder have kraftig vind året rundt, mens andre steder vil have svag vind – og nogle steder vil få mere sollys end andre (tænk fx på tætte skove, bredde stepper, tørre ørkner eller Arktis). Når sol og vind sammenlignes med fossile brændstoffer, er det især nemt at se, hvor brugbare fossile brændstoffer er, fordi de kan generere energi konstant; de kan sikre en konstant "**baseload**", uanset om sollyset eller vinden er kraftigere i en bestemt periode. Men fortsættes forbruget af fossile brændstoffer, koster det fremtiden for mange.

Derfor kan vi identificere to hovedløsninger til energiproblemet: **(1) Bedre energiopbevaringsmuligheder**. For eksempel bedre og kraftigere batterier. **(2) Alternativer, der kan sikre den konstante baseload**. Den mest kendte løsning: Kernekraft!

Selv om batterier bliver bedre og billigere, er kombinationerne af bæredygtig energi som sol eller vind og energiopbevaring via batterier desværre stadig meget dyrere end fossile brændstoffer. Bæredygtige energikilder skal ikke kun indhente fossile brændstoffer, de skal overtage og erstatte dem indenfor de næste 30 år. Og hvis de gør, er det ikke garanteret, at kombinationen af vedvarende energi og energiopbevaring vil sikre fremtidens globale energibehov. Samtidig er den konstante baseload fra fission heller ikke ideel, eftersom der produceres langvarigt radioaktivt affald.

Fusion som en løsning

Eftersom der stadig hersker usikkerhed om fremtidens ideelle energimix, så kan en undersøgelse af forskellige alternative energikilder muligvis pege os i den rigtige retning – ikke bare for den nære fremtid men også langsigtet. Her kan **fusion** få en central rolle som en

fremtidig energikilde. Fusion er en proces, vi kan observere hele tiden: det er den proces, der driver Solen, og alt liv på vores planet afhænger af den. Hensigten er at skabe en lille, kontrolleret stjerne her på Jorden, og forskere fra hele verdenen kommer tættere og tættere på. Fusion vil dog ikke afløse fossile brændstoffer i morgen – det vil tage tid. Nogle private virksomheder sigter efter at implementere fusionsenergi allerede i 2035, mens andre organisationer sigter efter 2050'erne. Hvis man vil erstatte verdens forbrug af fossile brændstoffer med sol- og vindenergi, så er tidshorisonten for dette sammenligneligt med implementeringen af fusionsenergi.

Hvis fusionsenergi kan genereres her på Jorden, vil det være en bæredygtig og ufarlig løsning – uden udledning af drivhusgasser under energiproduktionen. Fusion vil være i stand til generere en baseload, ligesom fossile kraftværker og fissionskraftværker gør i dag. Det vil være en kompakt energikilde med en overflod af tilgængeligt brændstof: Nok til at generere (bæredygtig!) energi til millioner, hvis ikke milliarder af år. Men fusion er ikke ligetil, og man har endnu ikke opnået at generere mere energi fra fusion end den energi, man brugte på at starte og vedligeholde fusionsprocessen i laboratoriet. Men sådan er det nu engang med nye teknologier: Det er svært, indtil man knækker koden – og så går det stærkt. Fusion er derfor et godt bud på en energikilde, der kan generere den baseload, som andre vedvarende kilder har svært ved. I samarbejde med fx vind- og solenergi kan fusion danne fundamentet for et bæredygtigt og klimavenligt energimix. Derfor mener mange, at fusion er relevant at arbejde med. Forskere og ingeniører overalt i verden arbejder hårdt på at løse udfordringerne for fusionsenergi og håber på at kunne åbne op for fusionsenergiens store potentiale som fremtidig energikilde. Fusionsenergi er et aktivt forskningsfelt med større og større indflydelse – både akademisk og i den private sektor.

Der er ikke kun én løsning på energiproblemet. Vi er ved at løbe tør for tid til at forhindre en irreversibel klimaforandring. Som blev demonstreret af Parisaftalen i 2015, da 190 lande inklusive EU skrev under, så er verden enig om, at udledningen af drivhusgasser

skal reduceres globalt for at sikre, at den globale middeltemperatur højest stiger med 2 grader. For at sikre dette skal verdens energimix ændres drastisk.

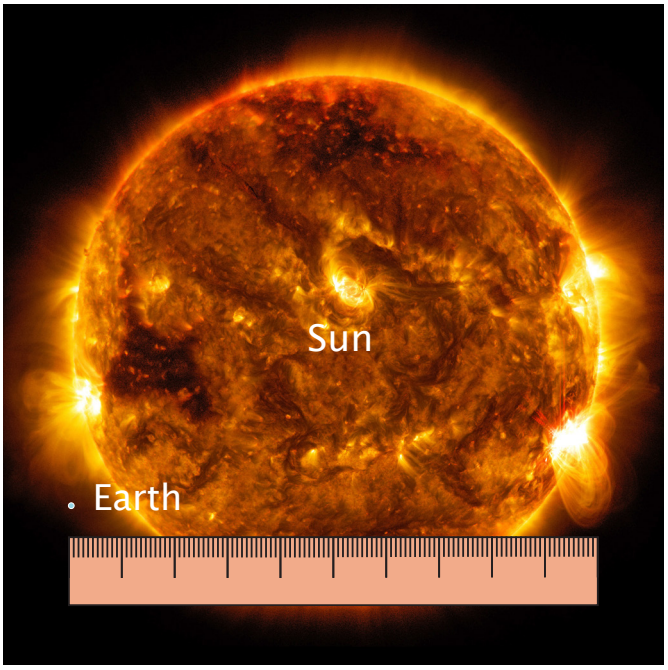
I de næste kapitler vil det basale ved fusion blive forklaret. Vi vil kigge på fusion inde i Solen, lære, hvad et plasma er, og forstå den fundamentelle fremgangsmåde til at bygge en fusionsmaskine. Det vil blive klart, at det ikke er så svært at opnå fusion, men at skabe brugbar energi fra fusion er en udfordring. Ved slutningen af dette modul vil du forstå hovedtrækkene i fysikken bag en fusionsmaskine.

1.2 Fusion i Solen

Nu vi har forstået ”hvorfor”, er det på tide, at vi forstår ”hvordan”. Lad os starte med at se på en fusionsreaktor, der har kørt uden afbrydelser, siden før menneskeheden lærte, hvad fusion var: Solen.

Solen

Solen er en kæmpe samling af partikler, der holdes sammen af **tyngdekraften**. Kort sagt fortæller tyngdekraften os, at ethvert legeme med masse er tiltrukket til ethvert andet legeme med masse. Størrelsen af denne tiltrækningskraft (hvor kraftigt objekterne tiltrækker hinanden) afhænger af, hvor stor massen er. Vores planet, Jorden, er meget tung og trækker alting mod dens centrum. Netop dette er den tyngdekraft, vi kan mærke, som holder vores fødder på jorden og gør, at legemer falder mod jorden. Solen er meget tungere: Omkring 333,000 gange Jordens masse! Derfor er Solens tyngdekraft meget stærkere end den tyngdekraft, vi kan mærke på Jorden. Der må dog være en udadgående kraft, ellers ville Solen kollapse ind mod den selv til



Figur 3. Sammenlignet med Solen er Jorden ufatteligt lille. ’A pale blue dot’ kaldte Carl Sagan den engang. Jordens radius er hundrede gange mindre end Solens, så dens volumen er en million gange mindre. Kilde: NASA/Solar Dynamics Observatory.

et punkt. Denne udadgående kraft er et resultat af fusionsprocesser i Solens kerne.

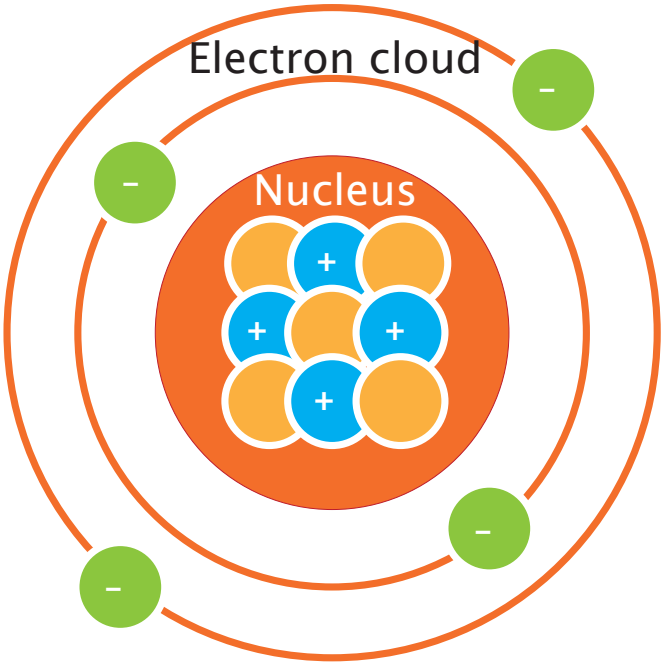
Ligesom **trykket** på Jorden bliver større, i takt med at vi bevæger os dybere ned mod planetens centrum, så bliver trykket inde i Solen også større og større, jo tættere vi kommer på dens centrum. Dette er det samme princip, der fører til et stort tryk, når man bevæger sig dybt ned i et hav: Alt massen ovenover presses nedad pga. tyngdekraften, og hvis der er meget masse over dig, så er trykket stort. Tyngdekraften trækker alt mod massemidtpunktet og prøver at sammentrykke al massen. Men jo mere man sammenpresser noget, jo mere modarbejdes sammenpresningen. Det store tryk i Solens kerne fører herved til en udadgående kraft, der balancerer den indadgående kraft fra tyngdekraften. Derfor kollapser solen ikke mod et punkt: Den er i **ligevægt**.

I Solens kerne er temperaturerne ekstremt høje. Eftersom Solen taber varme ved dens overflade (via stråling fx sollys), er temperaturen lavest ved overfladen og størst i kernen. Ligeledes pga. sammenpresningen via tyngdekraften er tætheden størst i kernen. Derfor er omstændighederne i Solens kerne ekstreme, og grundet disse ekstreme omstændigheder er der mulighed for, at separate partikler bliver til en: De kan fusionere. Når to partikler fusionerer, frigives en stor mængde energi, og denne energi fører til et større udadgående tryk, der modarbejder tyngdekraften, og forhindrer Solen i at kollapse.

Inde i atomet

Lad os nærmere undersøge, hvad disse 'partikler' præcis er, og hvad det betyder at 'fusionere'.

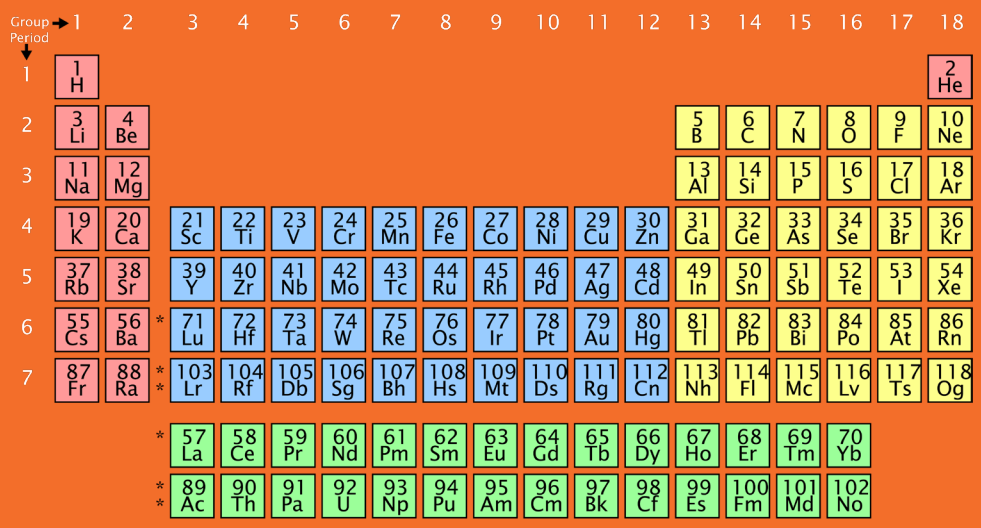
Alle fysiske legemer er bygget ud af noget. Hvis vi zoomede tilstrækkeligt ind på et legeme, vil vi kunne se, at (næsten) alle legemer består af komplekse molekylære strukturer, som alle består af individuelle molekyler, som alle består af atomer. Hver af disse atomer har en lignende struktur: En **kerne** og en 'sky' af **elektroner**, der bevæger sig rundt om denne kerne. Kernen består af to typer partikler: **protoner** og **neutroner**.



Figur 4. En simpel skematisk tegning af et atom. I atomets centrum befinder atomkernen sig, som består af (positivt ladede) protoner og (neutrale) neutroner. En sky af (negativt ladede) elektroner omringer atomkernen.

Antallet af protoner i kernen afgør, hvilket slags atom – eller grundstof – der er snakke om. Hvis kernen kun har en proton, kalder vi det **hydrogen**. Hvis kernen har to protoner, er det helium. Mange forskellige grundstoffer er blevet opdaget og kategoriseret, hvilket kan ses i det periodiske system, se bemærkningen. Antallet af neutroner inde i kernen kan variere, hvilket resulterer i forskellige versioner (isotoper) af et bestemt grundstof. Fx en kerne, der kun består af en proton uden neutroner, kaldes hydrogen, men hvis den har en proton og en neutron, kaldes den **deuterium**, altså en anden isotop af hydrogen. Med hensyn til hydrogen, findes der tre forskellige isotoper: "almindeligt" hydrogen, deuterium og **tritium** (som har en proton og to neutroner).

Hvad er så forskellen på en proton og en neutron? En proton er et positivt ladet partikel, mens en neutron er en neutral partikel. Elektriske ladninger findes i to typer: Positive og negative. Positive ladninger frastøder andre positive ladninger men tiltrækker negative ladninger, mens negative ladninger frastøder andre negative ladninger og tiltrækker positive ladninger. Dette er den samme proces, der får dine hår til at rejse sig, når du selv bliver elektrisk ladet: Hvis dit hår på hovedet bliver



Figur 5. Det periodiske system. Kilde: Wiki¬media user Double Sharp (CC BY-SA 4.0).

Atomkernenotation

Nu hvor vi ved, hvad atomer og isotoper er, så lad os tage et hurtigt kig på deres notation. Siden antallet af protoner i et atom bestemmer typen af atomet – dvs. hvilket grundstof – er dette antal centralt og kaldes atomnumret. Hydrogens (H) atomnummer er 1, kulstofs/carbons (C) er 6. Alle hydrogenatomer har atomnummeret 1, alle carbonatomer har atomnummeret 6 uafhængigt af isotopen.
Det samlede antal af protoner og neutroner udgør nukleontallet og indirekte også atommassen. Protoner og neutroner har nogenlunde samme masse – enheden for atommasse, amu (atomic mass unit), bruges normalt, som er ca. 1 for en proton (1.007276 amu) og ligeledes for en neutron (1.008665 amu). Elektroner er meget lettere, så disse kan ofte ses bort fra mht. den samlede masse. Så for almindeligt hydrogen er atommassen 1 (bare en proton og en elektron), for deuterium er atommassen 2 (proton + neutron + elektron) og for tritium er den 3 (proton + neutron + neutron + elektron).

Dette fører til en almen notation for atomare isotoper med nukleontallet (i toppen) og atomnumret (i bunden) vist ved siden af bogstavet (på den venstre side), der svarer til det grundstof, der er snakke om. Siden bogstavet indeholder den samme information som atomnumret, kan man også vælge ikke at skrive atomnumret. Notationen med et bogstav sammen med både atomnumret og nukleontallet vil blive anvendt i disse kapitler.

Bemærkninger

elektrisk ladet (for eksempel fordi du rører ved noget, der er elektrisk ladet), så vil dine hår frastøde hinanden. Dette betyder, at dine hår vil bevæge sig så langt som muligt væk fra hinanden, hvilket resulterer i, at nogle af hårene rejser sig op i luften!

Betyder det, at atomer er elektrisk ladede? Mens kernen altid er positivt ladet (siden den kun består af protoner og neutroner), så er den omringet af elektroner, der flyver omkring den. Elektroner er negativt ladede partikler med præcis den samme ladning som protoner – bare negativ. Atomer er altid neutrale udadtil, så der må nødvendigvis være det samme antal af negativt og positivt ladede partikler i et vilkårligt atom. Derfor er der altid et lige antal protoner og elektroner i ethvert atom (og ergo i ethvert grundstof).

Det betyder ikke, at kun partikler med det samme antal protoner og elektroner eksisterer: Hvis et atom mister en (eller flere) elektron(er) og bliver positivt ladet, bliver atomet til en **positiv ion**, og hvis atomet får en (eller flere) yderligere elektron(er), så bliver det en **negativ ion**. En elektron, der ikke længere er bundet til et atom, kaldes for en fri elektron. Der eksisterer mange forskellige ioner, både positivt og negativt ladede ioner.

Kernereaktioner

Lad os overveje fusionsprocessen igen, nu hvor vi ved, hvad kerner er. Lad os se, hvad der sker, når to kerner fusionerer.

I solen er temperaturen høj nok til, at to kerner kan kollidere, selv om de frastøder hinanden grundet deres positive ladninger, og blive til en ny, større kerne. Dette kaldes en **kernefusionsreaktion** – eller bare en fusionsreaktion. Fusionsreaktioner i stjerner kan føre til dannelsen af tungere grundstoffer, som selv kan fusionere, hvis temperaturen er høj nok. På denne måde dannes tungere grundstoffer, og energi frigives i stjernerne via de relevante reaktionsskemaer.

Lad os undersøge den mest interessante fusionsreaktion, hvilket er den reaktion, som er den nemmeste at forårsage: Deuterium–tritium–fusionsreaktionen, eller

Opgave 1.2
Konceptet med energitæthed (energy density) er centralt i fysikken, og selvom det måske lyder besværligt, er det bare et mål for energi pr. volumen. Hvis man fx forbrænder 1 liter benzin og måler, hvor meget energi der frigives (i form af varme), og derefter dividerer denne energi med volumenet af benzin, der blev afbrændt (1 liter), får man en værdi for energitætheden. Man kan estimere energitætheden for alle slags brændstoffer.

(a) Ud af de brændstoffer, der kan ses nedenfor, hvilken, ville du tro, har den højeste energitæthed? Hvilken har den laveste energitæthed? Sorter dem fra højest til lavest.
(b) Sammenlign din sortering med mindst en anden studerendes. Diskuter, hvorfor I har placeret brændstofferne, som I har.
(c) Find energitæthederne online. Sammenlign jeres sortering med de egentlige tal. Var I tæt på?

Benzin – olie – kul – træ – hydrogen (gas) – ætanol (alkohol) – deuterium – uran

Se også opgaverne: **A.4, A.5, A.6, A.7, A.8**.

bare **D-T fusion**.

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

I denne reaktion fusionerer to isotoper af hydrogen, deuterium (en proton, en neutron) og tritium (en proton, to neutroner), og danner en heliumkerne, en fri neutron og en enorm mængde energi: 17.6 MeV. Her står MeV for mega-**elektronvolt**. Elektronvolt (eV) er en energienhed, ligesom **joule** (J), der ofte bruges til at beskrive atomare og kernebaserede processer.

En elektronvolt er meget lille: 1 eV = 1.602×10^{-19} J, så 17.6 MeV fremstår måske ikke som meget (10^{-19} = 0.0000000000000000001 så 17.6 MeV=2.82×10^{-12} J eller 0.00000000000282 J), men for to kerner er dette en enorm mængde energi. Siden atomkerner er meget små, og siden der er utroligt mange kerner selv i små

mængder "brændstof", så er **energitætheden** (energi pr. volumen) enormt høj. Hvis vi brænder en liter benzin og sammenligner det med at fusionere en liter deuterium-tritium-brændstof, så vil fusionsreaktionen producere meget mere energi: omkring 10 millioner gange mere!

Dette gælder for alle kernereaktioner, både fission og fusion, og gør kernereaktioner så ekstremt brugbare til at skabe energi, men det gør desværre også disse reaktioner egnede til mere dystre formål, som blev demonstreret via udviklingen af atombomben (fissionsbaseret) under 2. Verdenskrig og udviklingen af hydrogen-bomben - H-bomben - (en kombination

Elektronvolt

Elektronvolt lyder måske som en mærkelig enhed, men den er meget brugbar for atomare processer. Siden disse processer finder sted på en meget smal skala, arbejder man her med meget små mængder af energi. Derfor er en meget mindre energienhed end joule (J) særdeles nemmere at anvende. Når man vælger en mindre enhed, er det bedst at vælge en, som nemt og nøjagtigt kan måles, og som også er relateret til de processer, man ønsker at finde en enhed til.

Siden energien af atomare partikler primært afhænger af deres bevægelse, så er energien, som en partikel får, når vi accelererer den, et oplagt valg. Ladede partikler er de nemmeste at accelerere (ved at anvende en spændingsforskel), og elektroner er ekstremt vigtige for atomare processer. Så 1 elektronvolt (eV) er defineret som energien, en elektron får, når den accelereres over en spændingsforskel på 1 volt (V) (elektronen starter ud i hvile i vakuum). Så en elektron med ladningen -e, der accelereres over en spænding på 1 V, resulterer i 1 eV.

For at sætte det i perspektiv kan vi anvende et AA-batteri (hvis spænding er ca. 1.5 V) til at accelerere en elektron (fra hvile i vakuum), hvor vi så ville få en elektron med en energi givet ved: |Ladning| × spænding = 1 e × 1.5 V = 1.5 eV.

af fission og fusion) i 1950'erne. Heldigvis er disse våben komplicerede at fremstille. I dag besidder otte forskellige lande officielt atomvåben: Kina, Frankrig, Rusland, Storbritannien, USA, Indien, Nordkorea og Pakistan.

Tilbage til Jorden

Nu kan vi forstå, hvorfor Solen kan eksistere: Tyngdekraften trækker indad, og energien, der frigives i fusionsreaktioner i Solens kerne, opvarmer kernen og får den til at udvide sig, hvilket fører til et udadgående tryk. Denne balance imellem de udadgående og indadgående tryk sikrer, at Solen ikke kollapser pga. tyngdekraften eller eksploderer pga. energien frigivet i fusionsreaktionerne.

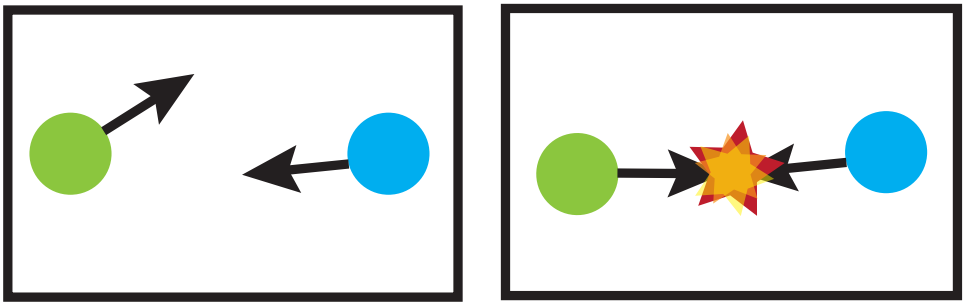
Siden menneskeheden fandt ud af, hvordan stjerner fungerede, har vi prøvet at genskabe denne proces på Jorden for at generere energi. Men problemet er, at selv Jorden er alt for lille til, at fusion kan virke på samme måde på Jorden som i Solen. Vi er nødt til at finde alternativer til Solens ekstremt stærke tyngdekraft. Heldigvis har vi opfundet adskillige metoder til at forårsage fusion på Jorden. Den mest almindelige metode er at skabe et såkaldt "**plasma**" og anvende meget stærke magneter til at kontrollere det. For at klargøre hvilken metode der er den bedste til at skabe fusion på Jorden, skal vi først forstå de nødvendige omstændigheder for at fusion kan finde sted.

Kriterier for fusion

Det enorme tryk grundet tyngdekraften i Solen baner vej for, at fusionsreaktioner kan finde sted. Dette tryk kan forstås via to størrelser: Temperatur og tæthed. Begge er vigtige for fusionsreaktioner. For at uddybe dette kan vi undersøge et hypotetisk scenarie med to positivt ladede partikler fanget i en kasse.

De to partikler frastøder hinanden grundet deres ladning. Denne frastødning afhænger af afstanden mellem partiklerne: Hvis de er tæt på hinanden, er frastødningen stærk, men hvis afstanden mellem dem bliver større, så bliver frastødningen hurtigt meget svag. Partiklerne vil naturligvis søge så langt væk fra

hinanden som muligt, men siden de er fanget i en kasse, vil de blive stoppet ved modstående sider af kassen. Hvis partiklerne kommer tæt nok på hinanden, vil de



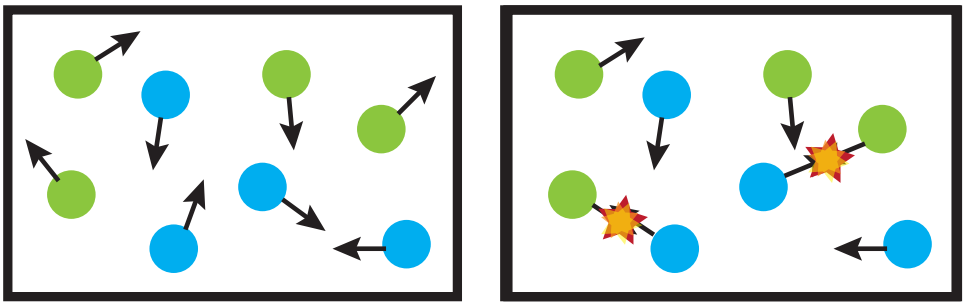
Figur 6. To positivt ladede partikler med høj hastighed inde i en boks. Når hastigheden er høj nok, kan partiklerne overvinde frastødningen og kollidere, sådan at de kommer i kontakt med hinanden.

være i stand til at fusionere. Lad os antage, at når de to partikler rører hinanden, vil de automatisk fusionere til en ny, større partikel. For at få dette til at ske er vi nødt til at få partiklerne tæt på hinanden – vi bliver nødt til at overkomme deres frastødning. Siden frastødningen bliver stærkere, jo tættere partiklerne kommer på hinanden, er dette ikke en nem opgave. Men det kan gøres ved at lade partiklerne flyve så hurtigt rundt, at de kan kollidere og fusionere til trods for frastødningen.

Lad os vende tilbage til de to partikler fanget i kassen. Vi giver begge partikler en høj **hastighed** og lader dem flyve rundt i den ellers tomme kasse: Vi giver partiklerne **kinetisk energi**. Partiklerne vil blive reflekteret af væggene og vil tilfældigt flyve rundt i kassen. Hvis partiklerne kommer tæt på hinanden, vil frastødningen skubbe partiklerne væk fra hinanden. Men når partiklernes hastighed bliver høj nok, er frastødningen ikke længere stærk nok til at skubbe partiklerne væk fra hinanden, og de kan kollidere. Partiklerne vil røre hinanden og fusionere. I dette scenarie kan man betragte kollisionen som at skyldes et kort øjebliks stort tryk: Partiklerne bevæger sig meget hurtigt, og når de kolliderer, vil den ene partikel presse hårdt mod den anden partikel i det øjeblik, partiklerne rører.
Her er sammenhængen mellem kinetisk energi og temperatur vigtig. Temperatur er et mål for den **gennemsnitlige, tilfældige bevægelse eller vibration af en samling af partikler**. Så i vores hypotetiske scenarie med de to partikler, har vi givet partiklerne høj fart, og derfor er den gennemsnitlige fart høj; ergo er temperaturen af samlingen af partikler (dvs. de to partikler) høj.

Så ved at opvarme vores partikler, kan vi øge deres gennemsnitlige fart, og hvis deres fart er høj nok, vil der være en betydelig sandsynlighed for, at partiklerne kan fusionere.

Men hvis der kun er to meget små partikler inde i en kasse, er sandsynligheden for at de tilfældigvis kolliderer og fusionerer meget lav. Så vi er nødt til at øge sandsynligheden for, at partiklerne vil fusionere. Vi kan fx øge antallet af partikler inde i kassen. Så længe alle partiklerne har høj nok fart til, at der er en betydelig sandsynlighed for, at de fusionerer, så



Figur 7. En boks fyldt med mange positivt ladede partikler, der hver har en høj hastighed. Når hastigheden er høj nok, kan partikler overvinde frastødningen og kollidere. Hvis der er flere partikler, så stiger sandsynligheden for kollisioner.

vil en forøgelse af antallet af partikler i kassen føre til en større sandsynlighed for, at fusion finder sted. Ved at øge antallet af partikler i kassen (og sørge for kassen ikke ændrer sig) øger vi densiteten (tætheden) af partikler. **For at opnå fusion er det derfor bedst at anvende en kombination af høj densitet og høj temperatur**. Dette ses fx i Solen, hvor densiteten er høj i kernen, og temperaturen i kernen heller ikke ligefrem er kold. Derfor er det denne kombination af både høj densitet og høje temperaturer, der fører til de ekstreme omstændigheder, der er nødvendige for fusionsreaktioner i Solen.

Vi har dog set bort fra en vigtig faktor her: Vi skal faktisk bruge en kasse for at få dette til at virke! Hvis partiklerne ikke er fanget i kassen – dvs. indesluttet – vil kollisionerne ikke finde sted. Her det fordelagtigt at introducere **indeslutningstiden**. Jo længere tid man kan opretholde høj densitet og temperatur, jo mere fusionsenergi får man. Men en samling af partikler vil ikke automatisk opretholde sin egen høje temperatur: Den vil hurtigt køle ned, medmindre vi kan isolere den godt. Så vi er nødt til at 'indeslutte' energien i vores

kasse, vores fusionsreaktor. Ellers vil varmen hurtigt forlade reaktoren. Dette er sammenligneligt med, hvordan man indeslutter varmen i et lokale: Hvis et vindue er åbent, mens vi prøver at opvarme lokalet, og hvis det er meget koldt udenfor, er vi nødt til at varme meget mere for få den ønskede temperatur i lokalet, og meget energi går til spilde. Vi er nødt til at indeslutte energien i lokalet og sørge for, at temperaturen er høj nok til, at fusionsreaktioner kan finde sted. Hvis indeslutningstiden er stor, betyder det, at energien bliver inde i vores kasse i længere tid, og derfor er sandsynligheden for fusionsreaktioner også større.

Fusion på Jorden

Partiklerne i Solens kerne er indesluttet rigtig godt, men Jordens tyngdekraft kan ikke udfylde denne rolle, og vi er nødt til at indeslutte energien på en anden måde for at få så mange fusionsreaktioner som muligt, imens vi minimerer mængden af energi brugt på at opretholde fusionsprocessen. Heldigvis frigives en masse energi i hver af disse fusionsreaktioner. Denne energi frigives ikke i form af lys: Den frigives som kinetisk energi i partiklerne, der opstår i fusionsreaktionen. Dette betyder, at produktet af disse fusionsreaktioner er hurtige partikler, der kan hjælpe med at øge den samlede temperatur og holde reaktionen kørende.

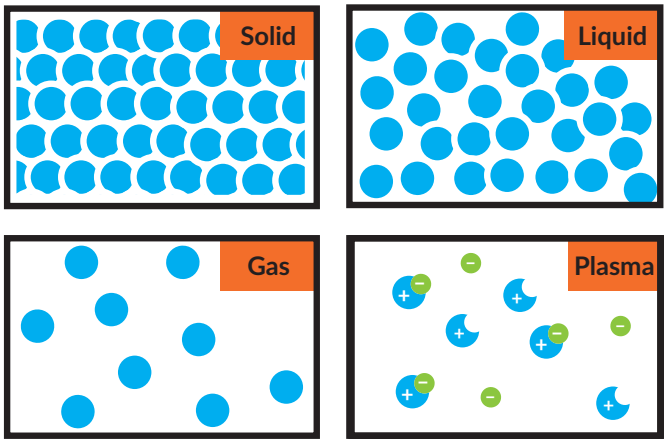
Siden vi ikke kan anvende Jordens tyngdekraft til at skabe densiteter og temperaturer så store som i Solen, er vi nødt til at finde andre metoder til at forårsage så ekstreme omstændigheder, og vi er nødt til at indeslutte alt energien på en måde. Vi er tvunget til at skabe en kombination af både høj densitet og høj temperatur og indeslutte alt energien for at sikre, at sandsynligheden for at to partikler fusionerer bliver stor nok i vores fusionsmaskine på Jorden.

1.3 Plasma

Som nævnt tidligere er den mest almindelige metode til at skabe fusion på Jorden baseret på plasma. I dette afsnit vil det blive diskuteret, hvad et plasma er, og hvordan plasma bruges til fusion.

Opvarmning af brændstoffet

Som forklaret tidligere er **temperatur et mål for energi** – mere præcist for den gennemsnitlige fart, hvormed partiklerne bevæger sig eller vibrerer. Jo højere temperatur jo hurtigere bevægelse eller vibration. Dette gælder for alt stof uagtet tilstandsform (fast stof, væske og gas). Hvis et fast stof, såsom et stykke metal, opvarmes, begynder atomerne at vibrere med større oscillationer. For et fast stof ændrer dette ikke formen af legemet særlig meget: Metalstykket udvider sig en smule men forbliver nærmest det samme. Hvis det bliver



Figur 8. En skematisk tegning af de tre tilstandsformer og af et plasma. Alle partikler bevæger sig eller vibrerer: Den gennemsnitlige fart afhænger af stoffets temperatur, og denne fart øges, når stoffet opvarmes. I et fast stof er partiklernes bevægelse meget begrænset. I en væske kan partiklerne bevæge sig mere frit, og i en gas kan partiklerne bevæge sig (næsten) fuldstændig frit rundt. Når en gas opvarmes til høje nok temperaturer, begynder gassen at bryde sammen, og et plasma dannes, som består af separate, ladede partikler.

varmt nok, begynder metalstykkets makroskopiske (= observerbart med øjet) struktur at bryde sammen. Partiklerne vil bevæge sig hurtigere rundt, og det faste stof vil miste sin struktur: Det vil smelte. Når det bliver endnu varmere, kan den makroskopiske struktur (nu en væske) bryde endnu mere sammen: Den bliver til en gas. Under denne faseovergang fra væske til gas bryder bindingerne mellem atomerne fuldstændig sammen, og partikler begynder at flyve frit rundt. Den eneste vekselvirkning mellem gaspartiklerne er kollisioner.

Denne proces med at gå fra fast stof til væske til gas (eller den omvendte vej) kaldes et **faseskift**. Temperaturen, hvorved et faseskift finder sted, afhænger af typen af atomer og bindingerne mellem dem. Nogle materialer vil begynde at smelte ved lave temperaturer (chokolade, stearinlys) mens andre, såsom metaller, kun smelter ved høje temperaturer. Nogle stoffer fordamper ved så lave temperaturer, at de kun findes som gas i naturen: fx ilten i den luft, vi ånder, der begynder at fordampe ved den ekstremt lave temperatur –183 °C.

Husk på, at vores fusionsbrændstof er deuterium og tritium, som er to forskellige isotoper af hydrogen. Ved stuetemperatur er hydrogen allerede en gas. Densiteten af et materiale afhænger af dets tilstandsform: Hvis man smelter et materiale, vil der generelt være mere plads mellem partiklerne – volumenet vil øges, og antallet af partikler vil forblive det samme, hvilket fører til en lavere densitet. Hvis vores brændstof derfor er en gas, har vi generelt lavere densitet. **For at opnå kriterierne for fusion opvarmer man derfor gassen til meget høje temperaturer**.

Ionisering

Så vores brændstof er en gas, og vi er nødt til at opvarme denne gas til ekstreme temperaturer. Men hvad sker der, hvis vi bliver ved med at opvarme gassen? Kan en gas også 'fordampe' ligesom en væske? På en måde, ja: Hvis gassen bliver varm nok, sker der et slags **sammenbrud (breakdown)**. Dette sammenbrud minder om fordampning og smeltning, hvor bindingerne mellem atomerne og molekylerne bryder sammen, men her er det bindingerne inde i et atom, der bryder sammen: Bindingerne mellem kernen og elektronerne.

Dette sammenbrud opstår, når en gas opvarmes nok til, at energien af et atom når en bestemt grænse – den såkaldte **ioniseringsenergi**. Atomet begynder at falde fra hinanden, dvs. en eller flere elektroner forlader atomet. Atomet bliver altså til en ion. Denne proces kaldes **ionisering**. Siden de fleste atomer har adskillige elektroner, kan de fleste atomer miste flere end bare én elektron. Hvis alle elektronerne mistes, er ionen fuldstændig ioniseret, hvilket resulterer i en fri, positiv

kerne uden elektroner. Når en gas begynder at bryde sammen og blive til ioner og elektroner, taler vi om et plasma. **Derfor er et plasma en ioniseret gas bestående af frie positive ioner og frie negative elektroner**. Normalt er alle atomer ikke ioniseret i et plasma – men hvis de er det, taler vi om et fuldt ioniseret plasma. Det er måske ikke overraskende, at Solen ikke er en kugle af gas: Solen er en stor kugle af plasma!

Figur 9. Eksempler på plasmaer. Ovenfra og ned og fra venstre til højre ser vi: Aurora Borealis (nordlys), et neonlys, lyn, et forsøg med plasmaudladning, Solen og en udladning inde i den sfæriske tokamak MAST. Kilde: NASA, Pixabay/Pexels, Pixa¬bay/FelixMittermeier, Plas-malab TU Eindhoven/J.P.K.W. Frankemölle, NASA/Solar Dy¬namics Observatory & CCFE.

Hvor findes plasmaer?

"Det lyder besværligt at skabe et plasma" tænker du måske. Men plasmaer er den mest almindelige tilstandsform i universet. Størstedelen af synligt stof i rummet er plasmaer: Stjerner, stjernetåger m.m. På Jorden er plasmaer mindre hyppige, men de kan stadig observeres mange steder. Lyn er et plasma, nordlys er forårsaget af plasma i atmosfæren, og afhængigt af ens præcise definition af et plasma kan (varme) flammer også betragtes som plasmaer. Grundet den store mængde af plasmaer i naturen, kaldes plasma til tider for den fjerde tilstandsform.

Ud over deres tilstedeværelse i naturen findes plasmaer også ofte i industrien. Fx desinficeringsredskaber på

hospitaler, fremstilling af nye computerchips, solpaneler eller den næste smartphone – processer afhængige af plasmaer findes overalt. Mange forskellige måder at danne plasmaer på eksisterer fx vha. elektromagnetiske bølger (præcis ligesom bølgerne genereret i en mikrobølgeovn!).

Forskelle mellem gas og plasma

Hvad er egentlig forskellen på gas og plasma udover det fine navn? Den primære forskel stammer fra det faktum, at plasma består af ioner og elektroner, dvs. ladede partikler, mens en almindelig gas kun består af neutrale atomer. Så **i et plasma findes der ladninger, der frit kan bevæge sig**. Dette betyder, at **et plasma kan lede elektrisk strøm** præcis ligesom en ledning. Udover plasmaets elektriske ledningsevne er en anden vigtig egenskab, at **plasmaer reagerer (ofte kraftigt) på elektriske og magnetiske felter.**

Elektriske og magnetiske felter

Elektriske felter beskriver, hvordan et elektrisk ladet objekt påvirker andre elektrisk ladede objekter i nærheden. En ladet partikel tiltrækker eller frastøder andre ladede partikler afhængigt af, om de har den samme (++/ −−) eller modsatte (+−/−+) type ladning. Styrken af vekselvirkningen afhænger af afstanden mellem de ladede partikler. Hvis en ladet partikel

Opgave 1.3

Forskellen mellem et plasma og en gas er, at størstedelen af partiklerne i et plasma er elektrisk ladede, mens gaspartiklerne er neutrale. Dog lyser de fleste plasmaer, mens gasser ofte er farveløse og bestemt ikke lyser. Så hvorfor lyser plasma?

[Multiple choice]

(A) Ved høje nok temperaturer vil alting begynde at udsende lys, så et plasma lyser naturligt pga. høje temperaturer.

(B) De ladede partikler i plasmaet kan kollidere og 'rekombinere'. Antag fx, at 'rekombination' sker for en fri elektron og en hydrogen-ion. I denne proces vil de to partikler kombinere og blive til en neutral partikel (hydrogen), og stråling vil blive udsendt. Hvis strålingen ligger i det synlige spektrum, vil plasmaet lyse.

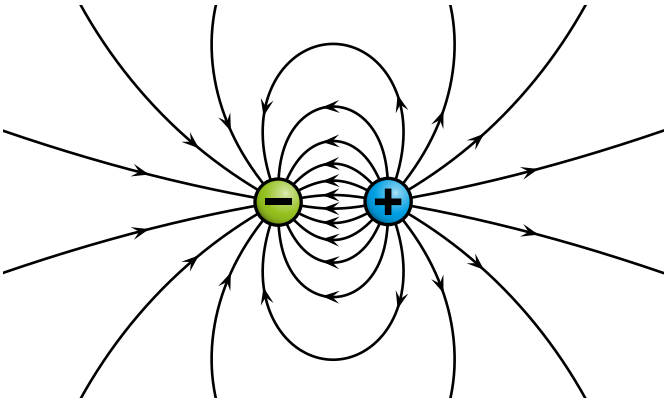
(C) I nogle kernereaktioner (fx fusion) udsendes stråling. Hvis strålingen ligger i det synlige spektrum, vil plasmaet lyse.

Bemærkninger

Lyn

Vha. ledeevnen af plasma kan man forklare lyn: Lyn er kort sagt en strøm (med enormt stor strømstyrke) mellem en elektrisk ladet sky og Jordens overflade. Pga. ladningsforskellen mellem skyen og Jordens overflade begynder gassen omkring skyen at bryde sammen, og et plasma dannes, der kan føre strømmen. Når den negative ladning er overført fra skyen til Jordens overflade, stopper strømmen, og lynet forsvinder. Alt dette sker næsten øjeblikkeligt – og vi kalder resultatet for et lyn.

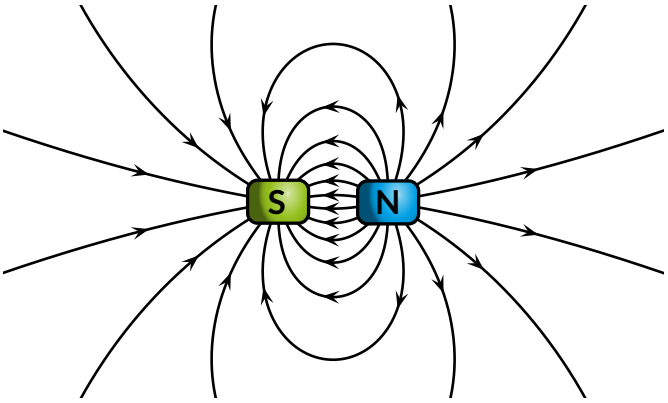
fastgøres til et punkt i rummet, så kan vi forestille os, at hvis hypotetisk partikel – **en testpartikel** – placeres tæt på den fastgjorte partikel, så er vekselvirkningen mellem de to partikler kraftig (enten tiltrækkes eller frastødes testpartiklen af den fastgjorte partikel). Dette ville betyde, at den fastgjorte partikels elektriske felt er kraftigt ved testpartiklens placering. Hvis vi placerer testpartiklen langt væk fra den fastgjorte partikel, ville der stadig være en vekselvirkning, men denne ville være meget svagere: Den fastgjorte partikels elektriske felt er svagt langt væk fra partiklen.



Figur 10. En skematisk tegning af det elektriske felt mellem en positivt og en negativt ladet partikel. En del elektriske feltlinjer kan ses. Læg mærke til, at feltlinjerne har en retning, som altid går fra positiv til negativ. Kilde: Wikimedia Commons/Geek3.

Ved at forestille os testpartikler overalt omkring den fastgjorte partikel kan vi kortlægge styrken af vekselvirkningen for alle placeringer i rummet: Vi kalder dette for det elektriske felt. Vi kan tegne linjer, der går fra den fastgjorte partikel ud i rummet i alle retninger og aldrig krydser hinanden: **Elektriske feltlinjer**. Sådan kan

vi visualisere det elektriske felt. Hvis feltlinjerne ligger tæt på hinanden, så er det elektriske felt kraftigt, og hvis de ligger langt fra hinanden, så er feltet svagt. **Retningen af elektriske feltlinjer** er altid fra positive til negative ladninger. Et **magnetisk felt** er defineret på en lignende måde, men i stedet for at være en vekselvirkning mellem



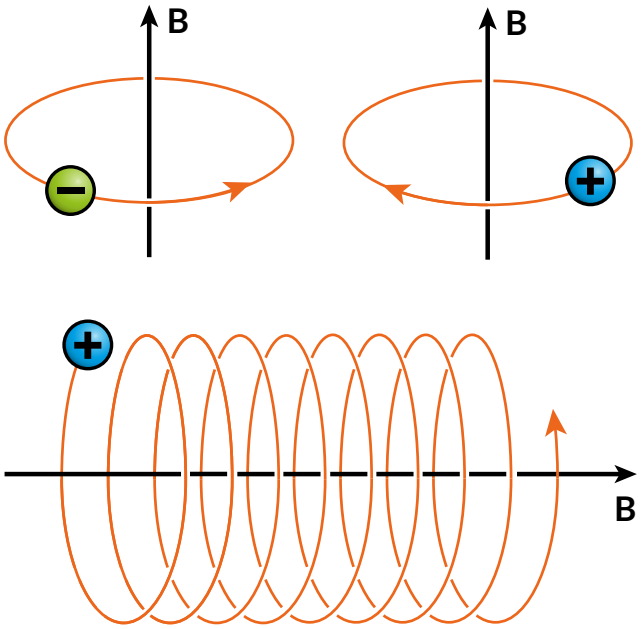
Figur 11. En skematisk tegning af det magnetiske felt mellem to 'magnetiske poler'. En del magnetiske feltlinjer kan ses. Læg mærke til, at feltlinjerne har en retning, som går fra 'nord' til 'syd'. I virkeligheden går de magnetiske feltlinjer igennem de 'magnetiske poler' og danner lukkede 'loops'. Kilde: Wikimedia Com¬mons/Geek3.

positive og negative ladninger, kan et magnetfelt visualiseres som værende en vekselvirkning mellem to 'magnetiske poler': Nord og syd. To ens poler frastøder hinanden, og to modsatte poler tiltrækker. En mere realistisk tilgang til at visualisere et magnetfelt er at tegne feltlinjer, nu **magnetiske feltlinjer**, som altid danner lukkede 'loops'. Hvis loopene går igennem et (magnetisk) materiale, så betegnes stedet, hvor feltlinjerne forlader materialet, som 'nordpolen' og stedet, hvor feltlinjerne går ind i materialet, som 'sydpolen'. Når feltlinjerne er udenfor det magnetiske materiale, så går feltlinjerne fra 'nord til syd'. Siden magnetiske feltlinjer også kan eksistere i et vakuum, er det muligt for en magnetisk feltlinje ikke at gå igennem et magnetisk materiale. I så fald har det magnetiske felt ingen nord- eller sydpol, men det magnetiske felt eksisterer stadig.

Ladede partikler i et magnetfelt

Når en ladet partikel bevæger sig ind i et magnetfelt, vil den ladede partikel begynde at **rotere** rundt om de magnetiske feltlinjer. Denne bevægelse, den såkaldte **gyrobevægelse**, skyldes magnetfeltet og er meget brugbar! Hvis partikler skal kollidere hårdt nok til at fusionere, har vi brug for ekstremt høje temperaturer. Så vi er nødt til at danne et plasma og varme det op til

ekstreme temperaturer. Problemet er så, at ved disse ekstreme temperaturer er der intet materiale, der kan indeslutte plasmaet: Beholderen ville begynde at smelte, og det varme plasma i beholderen ville køle ned ved kontakt med beholderen. Det er her, at brugbarheden af magnetfelter kommer i spil. Hvis vi kan kontrollere plasmaet med magneter, kan vi holde det væk fra beholderens vægge og fastholde det, så det ikke smelter vores fusionsmaskine (og vores fusionsmaskine ikke nedkøler plasmaet)! **Vi kan indeslutte et plasma vha. magnetfelter.**



Figur 12. Bevægelserne af positivt og negativt ladede partikler i et magnetfelt. Når en ladet partikel bevæger sig vinkelret på magnetfeltet, vil partiklen begynde at bevæge sig i cirkler rundt om den magnetiske feltlinje. Hvis partiklen også har en hastighed i magnetfeltets retning, vil partiklen følge en spiralformet bevægelsesbane rundt om den magnetiske feltlinje. Denne cirkulære/spiralformede bevægelse rundt om den magnetiske feltlinje kaldes gyrobevægelse.

Opgave 1.4
Retningen af magnetfeltet (dvs. retningen af de magnetiske feltlinjer) afhænger af bevægelsesretningen af ladningen, der forårsager magnetfeltet. Tegn magnetfeltets retning ved at tegne de magnetiske feltlinjer i de følgende scenarier:

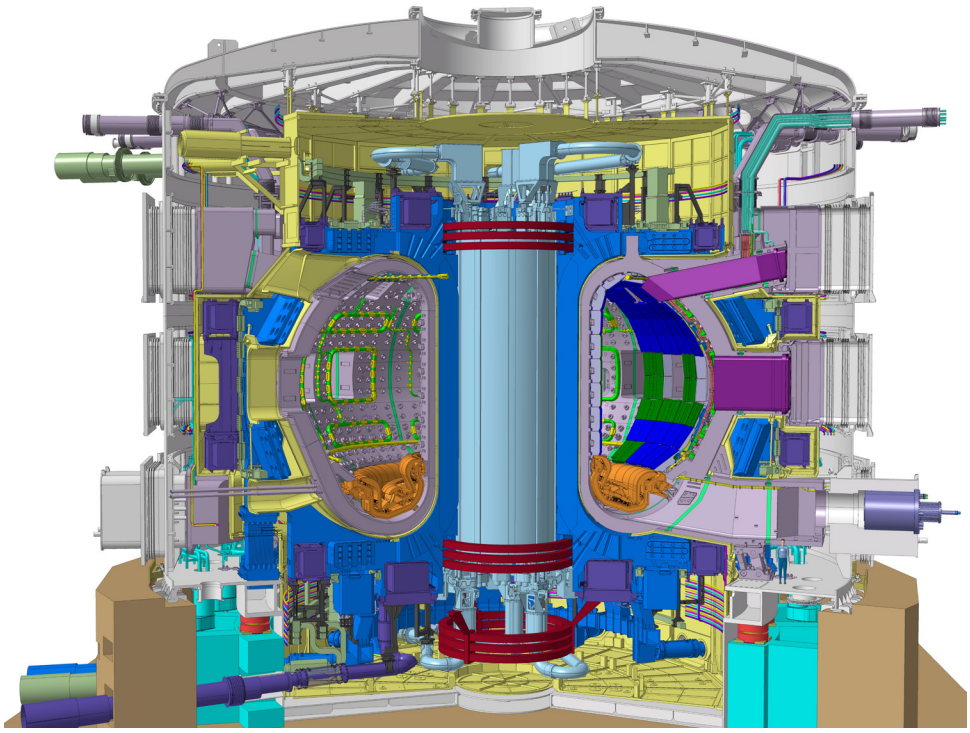
(a) En lige ledning, hvorigennem en strøm løber.
(b) En cirkelformet ledning, hvorigennem en strøm løber i retningen mod uret.
(c) En elektron, der bevæger sig med uret i en cirkel, og en proton, der bevæger sig mod uret i en cirkel. Sammenlign dette med retningen af magnetfeltet i spørgsmål (b): Hvad lægger du mærke til?
(d) Hvad kan du generelt sige om retningen af magnetfeltet sammenlignet med bevægelsesretningen?

Se også opgaverne: A.9, A.10.

1.4 Fusionsmaskinen

Nu besidder vi den basale viden nødvendig for at bygge en fusionsmaskine! Vi kender til fusionsreaktorer, og hvordan fusion opstår i Solen. Vi har undersøgt kriterierne for at forårsage fusionsreaktioner: Vi er nødt til at opretholde en kombination af tæthed og temperatur, som er stor nok, og vi er nødt til at indeslutte partiklerne, sådan at fusionsreaktionerne finder sted. Disse omstændigheder dannes naturligt i Solen pga. tyngdekraften, men på Jorden har vi brug for en anden metode.

Den mest almindelige tilgang til dette er ved at anvende magnetfelter til at indeslutte plasmaet og danne et stort tryk ved at opvarme plasmaet til høje temperaturer i lang nok tid til, at fusionsreaktioner kan finde sted. Især inde for EU fokuserer de fleste fusionsprojekter, der prøver at producere fusionsenergi, på opvarmningen og den magnetiske indeslutning af plasmaet. Denne tilgang til fusion kaldes på engelsk **magnetic confinement fusion (MCF)** eller på dansk **fusion ved magnetisk indeslutning**.



Figur 13. Skematisk tegning af tokamakken ITER, som på nuværende tidspunkt er ved at blive bygget i Sydfrankrig. På figuren ses de toroidale feltspoler (mørkeblå), de poloidale feltspoler (mørkelilla) og den centrale solenoide (lyseblå, i midten). Kilde: ITER Organization, https://www.iter.org.

Nu vi er indforstået med, at magneter kan bruges til at indeslutte et plasma, så kan vi undersøge mere præcist, hvad dette betyder for en magnetisk fusionsmaskine. Lad os starte med den mest almindelige type af fusionsmaskine: **Tokamakken**.

Tokamakken

Ordet 'tokamak' stammer fra russisk: Tokamak er en russisk forkortelse for enten "toroidalt kammer med magnetiske spoler" eller "toroidalt kammer med aksialt magnetfelt". Og det er præcis, hvad en tokamak er: Et torusformet kammer (en torus minder om en donut) omgivet af magnetiske spoler, der indeslutter et plasma. Inde i kammeret er der vakuum, hvor fusionsbrændstof (hydrogengas) kan tilføres, hvilket omdannes til et plasma og opvarmes (normalt anvendes mikro- eller radiobølger). Dette plasma indesluttes så vha. magneterne, som er placeret uden for toruskammeret (magneterne kan være delvist inde i kammeret afhængigt af tokamakken).

Tokamakkens geometri

Før vi undersøger de forskellige magnetsystemer i en almindelig tokamak, så lad os først analysere geometrien af det donut-lignende kammer. Formen af kammeret kaldes for en **torus**.

Opgave 1.5

Forskellige tokamakker har forskellige **størrelsesforhold** (aspect ratios). Størrelsesforholdet er forholdet mellem storeradius R og lilleradius a (dvs. R/a). Derfor kan tokamakkernes geometri variere en del fra hinanden. Lad os tage et nærmere kig på de forskellige former.

(a) Tegn en torus med en stor storeradius og med en lille lilleradius. Hvordan ser denne ud?
(b) Tegn en torus med en lille storeradius og en stor lilleradius. Hvorfor kan denne være sværere at tegne?
(c) Hvad ville der ske, hvis du bliver ved med at sænke storeradius, mens lilleradius forbliver den samme? Hvilken form ender du med?
Vend nu tilbage til størrelsesforholdene fra spørgsmål (a) og (b).
(d) Hvad ville der ske, hvis størrelsesforholdene ændrede sig?
(e) Hvad er den mindst mulige værdi af en torus' størrelsesforhold?

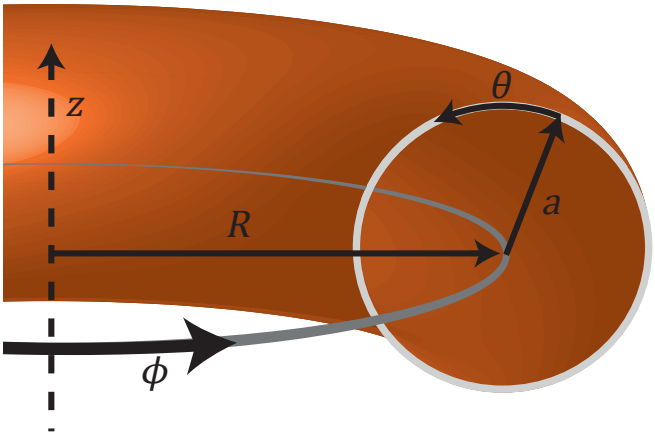
Opgave 1.6
Som vi har lært, er der to vigtige retninger i en torus: Den **toroidale** retning og den **poloidale** retning. Disse kan være en anelse forvirrende, så lad os kigge nærmere på dem.

(a) Lav en tegning af de to mulige tværsnit i en torus.
(b) Hvilket tværsnit er det poloidale tværsnit? Hvilket et er det toroidale tværsnit? Hvad lægger du mærke til omkring den toroidale/poloidale retning og de respektive tværsnit?

En elegant måde at forestille sig en torus på er via to konstanter og to variable koordinater: **Storeradius R, lilleradius a**, den **poloidale vinkel θ (theta)** og den **toroidale vinkel φ (phi)**. Et eksempel på en torus kan ses på figur 14, som også viser alle disse variable.

Store og lilleradius kan forstås som radierne af de to forskellige cirkler, som kan observeres i en torus: Radien fra 'donut-hullets centrum' til den mindre cirkels centrum i donutten kaldes storeradius R. Radiussen af kammeret, den mindre cirkel i donutten, kaldes lilleradius a. I virkeligheden er den mindre 'cirkel' i donutten ofte mere trekantsformet eller D-formet i moderne tokamakker. Dette hjælper med at forbedre tokamakkens ydeevne. Et eksempel af en spole med denne form ses i figur 15.

De andre to koordinater er de poloidale og toroidale koordinater eller poloidale og toroidale vinkler, θ og ϕ. Den toroidale retning er 'den lange vej rundt om torussen', mens den poloidale retning er 'den korte vej rundt om torussen'. Siden torussen er symmetrisk, er



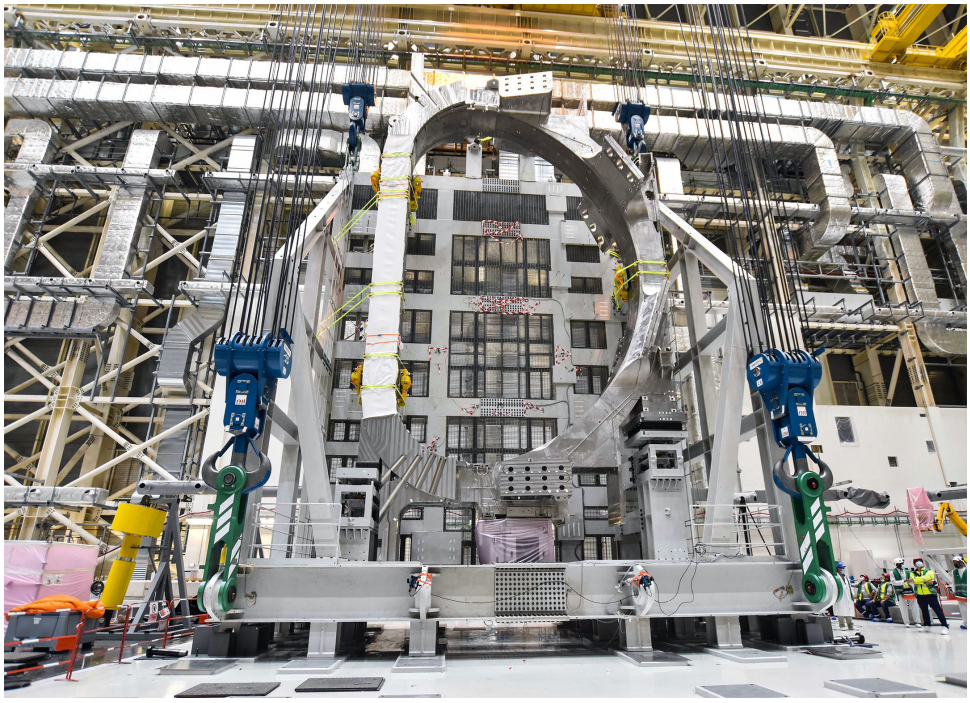
Figur 14. Skematisk tegning af en torus' geometri. Torussens storeradius (R) og lilleradius (a) kan ses. De toroidale (ϕ) og poloidale (θ) retninger kan også ses. Kilde: Jens Peter Frankemölle/TU Eindhoven.

det nødvendigt at definere, hvor den toroidale vinkel er lig nul. Mht. den poloidale vinkel betragtes det yderste punkt af torussen normalt som der, hvor den poloidale vinkel er nul.

Magnetiske spoler

Nu hvor vi har fået indsigt i tokamakkens geometri, kan vi tage et kig på de forskellige magneter i en almindelig tokamak, og hvad de kaldes. Vi vil derefter se på, hvorfor vi behøver alle disse forskellige magneter til at indeslutte plasmaet i det torusformede kammer.

Når en elektrisk ladet partikel bevæger sig rundt i en cirkel, dannes et magnetfelt i den vinkelrette retning. Når ladede partikler bevæger sig i sådan en cirkel, dannes en strøm, som har samme retning som bevægelsesretningen af de positivt ladede partikler. Hvis strømmen består af elektroner (eller andre negative partikler), så er strømmens retning modsat bevægelsesretningen af elektronerne. Ved at påføre en spændingsforskel kan elektroner bevæge sig igennem en metalledning. Så ved at føre strøm gennem metalspoler og ved at placere disse spoler korrekt kan et magnetisk felt dannes i den retning, vi ønsker.
På figur 13 kan en skematisk tegning af ITER-tokamakken ses. Det første sæt af magneter, du nok lagde mærke til, er dem, der er viklet rundt om vakuumkammeret og formet en smule som et stort D.



Figur 15. Her ses TF12, den første af de atten enorme, D-formerede toroidale feltspoler, der omslutter vakuumkammeret i ITER. TF12, som er 17 m høj og 9 m bred, er produceret i Japan. Billedet er taget i ITER Assembly Hall den 9. juni 2021. Kilde: ITER Organization, https://www.iter.org.

Solenoider

For at danne det nødvendige magnetfelt anvendes elektromagnetiske spoler. Husk – som diskuteret i slutningen af sidste kapitel – at hvis vi får en ladet partikel til at bevæge sig i en cirkel, så er retningen af magnetfeltet inde i cirklen vinkelret på partiklens bevægelse (uden for cirklen peger feltet i den modsatte retning), og retningen af magnetfeltet afhænger af, hvorvidt partiklen i bevægelse er positivt eller negativt ladet.

Siden elektroner frit kan bevæge sig igennem et stykke metal, så kan metalledninger føre strøm. Når sådan en ledning vikles rundt om fx en cylinder, kalder man det en spole. Spolen opfører sig som en (elektro)magnet, når den fører strøm, og vi kalder den en solenoide.

Disse kaldes de **toroidale feltspoler**. Derudover er der to yderligere spolesystemer, der er værd at nævne. For det første er der de stablede spoler i torussens centrum, som tilsammen kaldes den **centrale solenoide**. Derudover er der nogle store magneter ved toppen og bunden af maskinen: De **poloidale feltspoler**. Disse tre grupper af magneter udgør det primære magnetsystem i en tokamak. Der er typisk yderligere magneter til at forberede tokamakkens ydeevne, men disse er mindre og knap så vigtige og vil ikke blive diskuteret her. I det næste afsnit undersøger vi de toroidale feltspoler og den centrale solenoide mere grundigt.

De toroidale feltspoler

Det første trin mod en stabil tokamak er indeslutningen af plasmaet i en torusform. For at opnå dette er man først nødt til at begrænse plasmaet, sådan at plasmaet kun kan bevæge sig i en cirkel rundt i den toroidale retning. Siden vi nu ved, hvordan man kan danne et magnetfelt i en bestemt retning, og at en ladet partikel følger de magnetiske feltlinjer (i en spiralformet bevægelsesbane), ved vi, hvordan man kan få ladede partikler til at bevæge sig i en cirkel rundt i den toroidale retning. Vi skal først placere spoler rundt om den bane, hvori vi ønsker, at partiklerne bevæger sig.

Dvs. siden vi ønsker, at partiklerne skal bevæge sig rundt i den toroidale retning, skal vi vikle spoler den korte vej rundt om torussen: De toroidale feltspoler! Når vi placerer en masse af disse D-formede spoler rundt om toruskammeret, vil magnetfeltet danne cirkler i den toroidale retning inde i kammeret. Dette toroidale magnetfelt er langt det kraftigste magnetfelt i tokamakken.

Så nu bevæger plasmaet sig rundt i den toroidale retning. Det lyder vel fint? Så hvorfor har vi overhovedet brug for andre spoler end de toroidale spoler? Hvis vi kun har et magnetfelt i den toroidale retning, så bliver plasmaet desværre ustabilt hurtigt. Det blev opdaget, at hvis man tilføjede et poloidalt magnetfelt til det toroidale magnetfelt, kunne dette problem løses. Resultatet er et spiralformet magnetfelt.

Den centrale solenoide og plasmastrømmen

For at danne dette nødvendige spiralformerede magnetfelt bruges den centrale solenoide (indirekte). Den centrale solenoide er en smule anderledes, i at dens formål ikke er at danne et magnetfelt inde i den selv: Den bruger **magnetisk induktion** til at danne en (toroidal) strøm i plasmaet. For at forstå magnetisk induktion er vi nødt til at vende tilbage til magnetiske feltlinjer. Som diskuteret i det forrige kapitel kan vi visualisere et magnetfelt ved at tegne magnetiske feltlinjer, der danner lukkede 'loops'. **Styrken af magnetfeltet, B**, er direkte forbundet til **tætheden af magnetiske feltlinjer**. Hvis feltlinjerne ligger tæt på hinanden, så er magnetfeltet kraftigt i det område. Hvis feltlinjerne ligger langt fra hinanden, så er magnetfeltet svagt i det område.

Opgave 1.7
Lad os betragte en almindelig tokamak og fokusere på de tre primære magnetsystemer.

(a) Hvilke magneter er tydelige i det poloidale tværsnit? Hvad kaldes disse magneter, og giver dette mening?
(b) Prøv at forklare navnene på de to andre grupper af magneter.

Nu bliver konceptet med **magnetisk flux** vigtigt. Magnetisk flux er en størrelse, der er defineret for et bestemt område. Det er lig styrken af magnetfeltet (dvs. tætheden af de magnetiske feltlinjer) ganget på det (vinkelrette) areal, hvorigennem disse feltlinjer går. Derfor kan magnetisk flux ses som et mål for den magnetiske energi, der 'flyder' langs feltlinjerne igennem et bestemt område. Det matematiske udtryk for magnetisk flux afhænger af styrken af magnetfeltet samt arealet og kan skrives som:

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

Hvor Φ (stort phi) er den magnetiske flux, B er styrken af magnetfeltet, A er arealet af den valgte overflade, og α er vinklen mellem overfladens normalvektor og retningen af den magnetiske feltlinje.
Hvis vi har en spole, kan vi danne et magnetfelt ved at føre en strøm igennem den. Hvis denne strøm igennem spolen er konstant, vil de magnetiske feltlinjer forblive ved samme placering og beholde den samme tæthed: Magnetfeltet er konstant. Dette medfører, at for et givent område nær spolen så er den magnetiske flux også konstant.

Når vi derimod langsomt øger strømstyrken igennem spolen, så vil magnetfeltet langsomt ændre sig, i takt med at strømstyrken ændrer sig: Større strømstyrke fører til et kraftigere magnetfelt og derfor til en større tæthed af feltlinjer. Antallet af feltlinjer igennem en given overflade nær spolen stiger nu, hvilket medfører, at den magnetiske flux stiger.

Men naturen bryder sig ikke om ændringer i den magnetiske flux! Når der er en ændring i den magnetiske flux, så bliver en såkaldt **'elektromotorisk kraft'** eller **EMF** automatisk **induceret**. Denne EMF prøver at modarbejde ændringen i den magnetiske flux ved at danne en spænding, der fører til en strøm, som danner et modsatrettet magnetfelt.
Lad os fx betragte en spole. Når vi øger strømstyrken i spolen, øges magnetfeltet, og derfor stiger den magnetiske flux gennem spolen. Denne ændring af den magnetiske flux forårsager så en EMF, der prøver at modarbejde ændringen i magnetisk flux ved at danne

en strøm i den modsatte retning, hvilket forårsager et magnetfelt, som modarbejder det oprindelige, stigende magnetfelt. Denne modstand mod en ændring i den magnetiske flux findes i alle elektrisk ledende materialer nær spolen. Det er vigtigt at forstå her, at styrken af EMF'en afhænger af hastigheden af ændringen i den magnetiske flux og ikke af styrken af selve magnetfeltet.

Så hvis man har to spoler tæt på hinanden, og der køres en varierende strøm igennem en af spolerne, så ændrer den magnetiske flux sig i begge spoler! Dette skyldes, at den ene spoles magnetfelt mærkes af den anden spole. Derfor ændrer den anden spoles magnetiske flux sig, og der induceres en strøm i spolen. Denne proces kaldes **(elektro)magnetisk induktion** og gør det muligt at inducere strøm og danne magnetfelter i spoler, der ikke er fysisk forbundne!
Ved at øge antallet af vindinger i en spole kan EMF'en

Bemærkninger

Magnetfelter

Styrken af magnetfeltet B er et vigtigt koncept i fysikken bag elektricitet og magnetisme. Det er også en størrelse, der kan være meget forvirrende, siden det har mange navne: Den magnetiske feltstyrke, den magnetiske feltlinjetæthed, den magnetiske fluxtæthed eller den magnetiske induktion. Hvilket navn, man skal bruge, er et spørgsmål om konvention: Nogle foretrækker det ene navn, andre et andet. I en mere stringent, matematisk tilgang til magnetisme er feltlinjer ikke brugt og erstattes af matematiske vektorfelter. Derfor tilpasses definitionerne af de elektromagnetiske felter, og selvom vi snakker om den samme størrelse B, så kaldes denne oftere for den magnetiske fluxtæthed eller bare 'B'. Eftersom vi baserer vores forklaring af B på feltlinjer, holder vi os her til at kalde B for 'styrken af magnetfeltet' eller 'den magnetiske feltlinjetæthed' – især for at undgå at B altid skal associeres med konceptet med induktion. Det er også værd at nævne, at enheden for den magnetiske feltstyrke B er tesla (T) opkaldet efter opfinderen Nikola Tesla. Firmaet af samme navn er også opkaldet efter ham.

blive forstærket: Hver vinding mærker ændringen i den magnetiske flux, og alle vindingerne er forbundet, så den samlede ændring i magnetisk flux for spolen er summen for alle vindinger. Den samlede EMF fås ved at gange ændringen i magnetisk flux med spolens samlede antal af vindinger. For at udnytte dette princip er transformere blevet opfundet.

En transformer består af to ikke-forbundne spoler, en primær og en sekundær spole, hvorigennem der løber varierende strøm, hvilket fører til uafbrudte ændringer i den magnetiske flux i begge spoler. I en ideel transformer mister man ingen energi ved denne induktionsproces, og derfor er energien i den primære og sekundære spole ens:

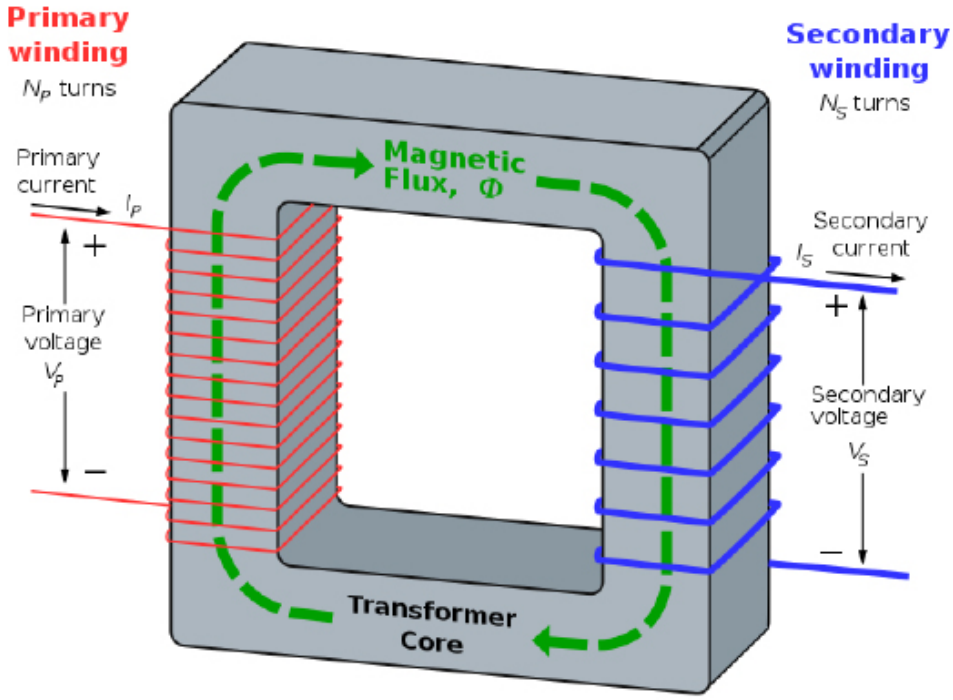
$$I_p V_p = I_s V_s,$$

Hvor Ip og Is er strømstyrkerne igennem henholdsvis den primære (p) og sekundære (s) spole. Vp og Vs er spændingerne over den primære og sekundære spole. Siden den samlede EMF i en spole afhænger af antallet af vindinger, får man:

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

Hvor Np er antallet af vindinger for den primære spole, og Ns er antallet af vindinger for den sekundære spole. Derfor kan man omdanne en strømstyrke og spænding i en spole til en anden strømstyrke og spænding i den anden spole ved at variere antallet af vindinger.

Lad os vende tilbage til tokamakken. Den centrale solenoide i tokamakken er en stor primær spole med mange vindinger. Siden plasmaet kan føre strøm, kan plasmaet betragtes som en spole med en enkelt vinding, og derfor er vores tokamak en stor transformer med en primær spole med mange vindinger og en sekundær spole (plasmaet) med kun en enkelt vinding. Ved at ændre strømstyrken i den centrale solenoide dannes et varierende magnetfelt, som inducerer en strøm i plasmaet. Plasmastrømmen genererer så det poloidale magnetfelt, vi har brug for! Derfor er der nu både et toroidalt og et poloidalt magnetfelt i tokamakken, hvilket tilsammen danner det nødvendige spiralformede



Figur 16. En transformer med en jernkerne. Vekselstrøm i den primære spole inducerer et varierende magnetfelt i jernkernen. Jernkernen 'guider' dette magnetfelt hen til den sekundære spole, hvor ændringen i den magnetisk flux i spolen inducerer en strøm i spolen. I en tokamak er der ingen jernkerne, og i stedet er den primære spole inde i den sekundære spole (plasmaet). Kilde: Wikimedia Commons/BillC.

magnetfelt for et stabilt tokamakplasma.

De poloidale feltspoler

Plasmastrømmen danner det poloidale magnetfelt, vi har brug for. Man forventer måske, at de poloidale feltspoler genererer et poloidalt magnetfelt, men deres primære formål er faktisk at hjælpe med at kontrollere formen og positionen af plasmaet. Magnetfeltet dannet af de poloidale feltspoler er meget svagere end det toroidale magnetfelt eller det poloidale magnetfelt genereret af plasmastrømmen.

Opgave 1.8

Brugen af induktion til at generere en plasmastrøm, som danner det poloidale magnetfelt, har en betydelig ulempe: Det medfører, at tokamakken er en 'pulseret maskine', dvs. køres i pulser.

(a) Hvordan fører magnetisk induktion til, at tokamakken skal køres/opereres i pulser?
(b) Hvorfor er dette et problem for en fusionsreaktor?

Se også opgave: A.11.

Udover de toroidale feltspoler, den centrale solenoide og de poloidale feltspoler er der mange flere spoler i en almindelig tokamak, som anvendes til mere avanceret plasmakontrol. Men disse øvrige spoler er knap så relevante for den basale forståelse af fusion og vil derfor ikke blive diskuteret i modulerne.

Magnetisk indeslutning

Nu ved vi endelig, hvordan vi kan konstruere et stabilt magnetsystem, som indeslutter plasmaet: Ved at anvende toroidale feltspoler til at danne et toroidalt magnetfelt sammen med en plasmastrøm, som danner et poloidalt magnetfelt (og er genereret af den centrale solenoide), opstår der alt i alt et spiralformet magnetfelt.

Der er kun et sidste emne at diskutere: Trykbalancen inde i tokamakken. I en tokamak er der et udadgående tryk og et indadgående tryk. Hvis disse er lig hinanden, er plasmaet stabilt. Det samme gælder fx et cykeldæk: Luft i dækket skal trykke hårdt nok udad mod gummidækket til at modbalancere trykket fra jorden. Hvis lufttrykket i dækket er for lavt, 'vinder' jorden, og dækket betragtes som fladt.

I en tokamak stammer det udadgående tryk fra selve plasmaet, dvs. plasmaet vil udvide sig, medmindre der er et tryk, der presser imod. Så hvad er kraften, der presser plasmaet tilbage? Der er kun en kandidat: Lorentzkraften! Plasmaet fører en strøm, og den strøm mærker en kraft pga. magnetfeltet. Dette resulterer i en kraft på plasmaet, som er indadgående. Det er denne kraft, der holder plasmaet sammen, og hjælper med den magnetiske indeslutning af plasmaet.

Nu har du arbejdet dig igennem det første modul, og du ved allerede en masse om fusion: Du kender til energiproblemet, du kender til fusion i Solen, du ved, hvordan fusion finder sted, og hvordan vi kan opfylde fusionskriterierne her på Jorden i den mest almindelige fusionsmaskine: Tokamakken. I de næste moduler kan du lære mere detaljeret om fusion fra fire forskellige perspektiver – fx mht. plasmakontrol eller historien bag fusionsenergi.

1.5 Yderligere læsning

For at lære mere om fusion er der fire tilgængelige moduler, som undersøger fusion fra forskellige perspektiver. De følgende moduler er tilgængelige.

Modul 2: Vejen til fusion

I dette modul diskuteres historien bag fusion og udviklingen heraf ved at fremhæve forskellige reaktordesigns og forsøg. Alle de vigtige trin, der har fået os til der, hvor vi er i dag indenfor fusion, forklares og diskuteres.

Modul 3: Plasmakontrol

I dette modul forklares det, hvordan et fusionsplasma opvarmes, kontrolleres og måles på. Der er adskillige metoder til at opvarme et plasma, og grundet de ekstreme temperaturer er specielle målemetoder en nødvendighed. Baseret på forskellige målinger af plasmaet er det muligt at holde fusionsreaktoren under kontrol.

Modul 4: Fusionsmaterialer

I dette modul undersøger vi de materialebaserede udfordringer bag fusion. Fusionsreaktorens vægge er nødt til at være bygget ud af meget specielle materialer, der kan modstå de barske omstændigheder i reaktoren. Hver komponent i fusionsmaskinen har et formål og har forskellige krav til materialerne: Fra at stoppe neutroner til at kunne nedkøles for at producere kraftige magnetfelter.

Modul 5: Implementering

I dette modul sættes fusionsenergi i perspektiv ved at kigge på elmarkedet og ved at sammenligne fusion med andre energikilder.

Ud over fysikken spiller energipolitik også en rolle, når det kommer til, hvorvidt fusion vil blive anvendt som en energikilde.

Onlineresurser

Udover de førnævnte moduler er der en stor mængde information og lærerigt stof om fusion, der kan findes online. I hvert modul kan interessante bøger, artikler eller links findes.

Fusionsenergi til Alle (dansk) – https://www.fusionsenergi.dk
Her findes viden om fusion på dansk. Information om SRP- og SOP-forsøg på DTU, en årlig lærercamp, sommercamp for gymnasieelever og meget mere kan findes her.

Et sjovt og gratis eksempel på interaktivt stof om fusion er appen 'Operation Tokamak', som kan downloades gratis på iOS Appstore og 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

I denne app kan du styre en tokamak ved at kontrollere styrken på magneterne og varmesystemet. Ved at holde reaktoren under de rette omstændigheder og modarbejde instabiliteter, når de opstår, kan du opretholde fusionsreaktion og prøve at forårsage så meget fusion som muligt.

Kolofon

’Introduktion til fusion’ er det første af fem moduler om fusion. Formålet er at forklare basale koncepter indenfor fusion på gymnasieniveau. Alle modulerne kan findes gratis på hjemmesiden FuseNet, https://fusenet.eu.

Forfatter
Sander Korteweg

Redaktører
Sander Korteweg
Sjoukje Tijmensen-Hoekstra

Grafisk design
Jens Peter Frankemölle
David Becker

Oversættelse fra engelsk til dansk
Mads Mentz-Jørgensen via ’Fusionsenergi til Alle’-projektet

Forsidebilledet
NASA/Solar Dynamics Observatory

Forlag
FuseNet

Finansiel støtte
Dette projekt ville ikke have været muligt uden den finansielle støtte fra EUROfusion.

Oversættelsen fra engelsk til dansk ville ikke have været mulig uden den finansielle støtte fra Novo Nordisk Fonden til projektet Fusionsenergi til Alle.
https://www.fusionsenergi.dk.

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.