

Modul 2

Vejen til fusion

Forfatter: Arno Claassen

Videnskab og forskning handler som helhed ikke kun om at opdage og kortlægge fysiske processer. Forskning finder sjældent sted med opmærksomheden rettet udelukkende mod videnskab: Forskning er forbundet til samfundet igennem interessenter og finansiering. Derfor kan ikke-videnskabelige faktorer såsom politik have stor indflydelse på forskning. Dette modul vil dykke ned i historien bag fusionsenergi, og hvorfor nogle mener, at "fusion altid er tyve år væk".

Efter dette modul vil du være i stand til at forstå fusionsforskning i en bredere kontekst og beskrive de primære typer af fusionsreaktorer og deres forskelle. Du vil også kunne diskutere den indflydelse, som politik kan have på forskning, samt fordelene og ulemperne ved internationalt samarbejde.

Hvis du vil lære mere om udfordringerne og løsningerne på vejen til fusion, så kan du med fordel kigge på de andre moduler i denne serie om fusion.

Opdagelsen af fusion

Hvordan lyser Solen?

Folk tror måske, at videnskab starter med en formel, og at ud fra denne kan forskere lave forudsigelser og eksperimenter for at se, om deres beregninger er korrekte. Det er jo den metode, vi har lært i skolen, så det må vel være rigtigt? Ikke helt. Videnskab begynder oftest med problemer og observationer. For fusionsforskning handler disse problemer og observationer om noget, vi kan se hver dag: **Solen**.

Indtil begyndelsen af det 20. århundrede havde videnskabsfolk svært ved at forklare, hvorfor Solen og andre stjerner er i stand til at lyse så kraftigt i så lang tid. Der var mange modeller, der kunne forklare, hvorfor Solen genererer lys lige nu, men Solen har jo eksisteret i milliarder (10⁹) af år. Dengang var det et stort mysterie, hvorfor Solen ikke var brændt op endnu. Hvis energien kom fra kemiske reaktioner, ville alt brændstoffet være brændt op på nuværende tidspunkt. Hvis Solen bliver mindre, og energien skulle stamme fra denne proces, så ville Solen ikke være lige så stor, som den er nu. Så hvor kommer energien fra?

Eddington til undsætning

For omkring et hundrede år siden, i 1920, blev det opdaget, at massen af fire hydrogenatomer er større end massen af en heliumkerne. Denne observation, sammen med formlen

$$E = m c^2$$

fra Einsteins artikel fra 1905, gav anledning til at tænke, at Solens energi stammer fra "omdannelsen" af fire protoner til en heliumkerne. Den "tabte" masse ville så blive frigivet som energi. Derfor foreslog Arthur Eddington i 1920, at fire individuelle protoner

(hydrogenkerner) kan kombinere og blive til en heliumkerne via en række fusionsreaktioner. Denne kæde af fusionsreaktioner kaldes for **proton-proton-kæden (P-P-kæden)**. I løbet af reaktionerne i P-P-kæden frigives en stor mængde energi, hvilket medfører, at kun en lille brøkdel af Solens hydrogen skal fusionere, for at Solen kan producere den mængde energi, som den gør. Så hvis Solen bruger fusionsreaktioner såsom P-P-kæden til at generere lys, så kan Solen lyse milliarder af år endnu.

P-P-kæden blev dog ikke accepteret som fysisk model med det samme, fordi den krævede, at stjernernes temperaturer skulle være to til tre gange større, end de blev observeret til at være. Otte år senere introducerede George Gamov et matematisk grundlag for konceptet **kvantemekanisk tunnelering**. Kvantemekanisk tunnelering tillader, at nogle partikler kommer tættere på hinanden, end deres energier tillader. Dette gør, at fusion kan finde sted ved lavere temperaturer, end man førhen troede. Robert Atkinson og Fritz Houtermans



Figur 2.1. Arthur Eddington. Kilde: Library of Congress, Prints & Photographs Division, LC-B2-6358-11.

Opgave 2.1

- (a) Solen har en masse på omkring 1.989×10^{30} kg. En proton har massen 1.007 amu. Antag, at Solen udelukkende består af protoner. Hvor mange protoner er der i Solen? Husk, at 1 amu er lig 1.661×10^{-27} kg.
- (b) P-P-kæden frigiver energien 26.73 MeV pr. heliumkerne produceret. Hvor meget energi frigives, hvis alle protonerne fra (a) i Solen fusionerer og bliver til heliumkerner? Husk, at 1 MeV er lig 1.602×10^{-13} J.
- (c) Hvor lang tid kan Solen skinne, hvis den udsender stråling med den konstante effekt 3.828×10^{26} W?
- (d) Astrofysikere forventer, at Solen kun vil være i stand til at fusionere 10% af sine protoner, før den vil gå til den næste fase i sin livscyklus. Hvorfor tror du, at Solen ikke vil være stand til at fusionere alle protonerne?
- (e) Hvor lang tid tror du, at Solen faktisk kan skinne? Diskuter med personen ved siden af dig.

opdaterede i 1929 Eddingtons beregninger, så der blev taget højde for kvantemekanisk tunnelering. De nye resultater passede langt bedre med de observerede kernetemperaturer i stjerner, hvilket betød, at P-P-kæden forklarer Solens energi temmelig godt. Derfor konkluderede man, at Solen får sin energi fra en række fusionsreaktioner.

Nye muligheder med fusion

Nu hvor stjernes energiproduktion kunne forklares med fusion, begyndte man at overveje, hvorvidt fusion er muligt på Jorden. Derfor udførte man eksperimenter for at undersøge netop dette. I begyndelsen af 1930'erne brugte videnskabsfolk (især Mark Oliphant, Paul Harteck og Ernest Rutherford) partikelacceleratorer til at skyde superhurtige deuterium-ioner mod stationære deuteriumatomer. Nogle af ionerne fusionerede med atomer, og den første menneskeskabte fusionsenergi var blevet dannet. Det første kunstigt producerede tritium blev også dannet i processen!

Succesen fik videnskabsfolk til at spekulere: "Kan vi, realistisk set, bruge denne metode til at producere energi?" De udførte adskillige eksperimenter, og ud fra resultaterne heraf blev sandsynlighederne for forskellige fusionsreaktioner beregnet. Som forventet ud fra teoretiske betragtninger så er disse sandsynligheder ekstremt lave. Det blev klart, at man ikke effektivt kan generere energi ved at skyde ioner mod atomer. Ionerne er mere tilbøjelige til at blive kastet tilbage ("reflekteret") af de stationære atomer og blive **spredt** i alle retninger. Denne proces kaldes for **spredning**.

Når ionerne spredes, overfører de noget af deres energi til de atomer, som spreder dem. Dette medfører, at atomerne vibrerer mere, hvilket øger temperaturen af materialet, som atomerne befinder sig i. Ionerne får derimod sænket deres fart betydeligt grundet spredningen, hvilket medfører, at ionerne ikke kan fusionere med atomerne bagefter. Siden **spredning** er betydeligt mere sandsynligt end fusion, vil det altid koste mere energi at accelerere ionerne, end den energi som herefter frigives i de få fusionsreaktioner, som dannes.

Hvis man vil lave et fusionskraftværk, er man nødt til at sørge for, at partiklerne forbliver tæt på hinanden i lang nok tid med høj nok temperatur til at fusionere. Man skal altså imitere omstændighederne i Solen – eller omstændigheder, der er lige så ekstreme. Med andre ord: Høj densitet og høje temperaturer er nødvendige. Og god indeslutningstid også!

De første maskiner

En langsom begyndelse

Omkring 2. Verdenskrig begyndte folk at opfinde de første designs til fusionsreaktorer. Men regeringen og investorer havde næppe kendskab til fusionsenergi og så ikke meget potentiale i fusion. En uventet omvæltning fandt dog sted ved begyndelsen af 1950'erne, da en mand ved navn Ronald Richter påstod at have genereret fusionsenergi. Richters historie spredte sig hurtigt globalt.

Mediedækningen af historien havde to umiddelbare følgevirkninger. At investere i fusion blev interessant for politikere, da de ikke ønskede at sakke bagud teknologisk, hvis fusion viste sig at være en brugbar energikilde. Den anden konsekvens var, at videnskabsfolk overalt i verden blev introduceret for fusionsforskning. Dengang var fusion et forskningsfelt i Storbritannien, USA og Sovjetunionen primært.

I Storbritannien forskede man i fusion med de såkaldte "pinch devices". Pinch på engelsk forstås her som "at knibe sammen". På dansk kan vi kalde pinch devices for **pinch-maskiner**. USA arbejdede sammen med Storbritannien på nogle af disse projekter, men hovedbidraget fra forskerne i USA var stellarator-designet, som diskuteres senere. Sovjetunionens bidrag var tokamak-designet, som blev introduceret i det første modul, og som også diskuteres senere.

Pinch

De første forsøg på at lave realistiske fusionsreaktorer var pinch-maskinerne. Inde i disse presses plasma sammen vha. et magnetfelt. Denne sammenpresning kan komme til udtryk ved, at plasmaet fremstår, som om det knibes sammen og dermed ikke udvider sig. Heraf "pinch", som refererer til sammenpresningen af

plasmaet. Dette er muligt pga. Lorentzkraften. Denne kraft gør fx, at når man fører strøm i samme retning igennem to parallelle ledninger, vil ledningerne tiltrække hinanden. Vi undersøger her to forskellige pinch-maskiner: Z-pinch og θ -pinch.

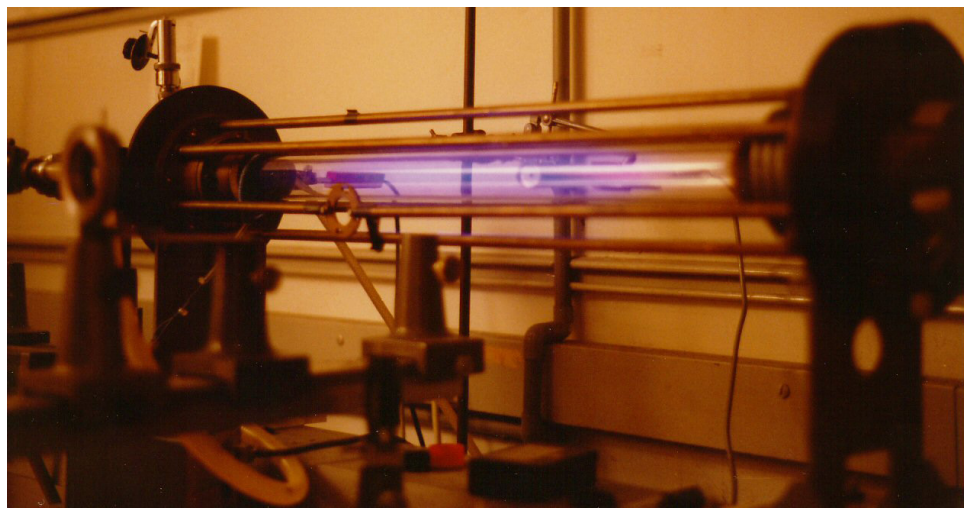
Z-pinch

Begge disse maskiner anvender plasma i en cylinderform. Forskellen mellem maskinerne er retningen af strømmen og magnetfeltet. Magnetfeltet i Z-pinch kommer fra en strøm i plasmaet. Denne strøm løber parallelt med cylinderens akse. Denne retning betegnes som Z-retningen i cylindriske koordinater. Magnetfeltet fra denne strøm snor sig rundt om plasmacylinderens overflade, ligesom hvis plasmaet bestod af en masse almindelige strømførende ledninger. Magnetfeltet og strømmen sammenpresser plasmaet, så plasmaet ikke udvider sig. Dette kan forstås som, at alle "ledningerne" tiltrækker hinanden grundet Lorentzkraften, da strømmen i ledningerne løber i samme retning. Sammenpresningen fører til en forøgelse af plasmataetheden, så fusion kan finde sted.

θ -pinch

θ -pinch (θ er det græske bogstav 'theta') er en anelse mere kompliceret. I θ -pinch er retningen af strømmen og magnetfeltet byttet om: Strømmen løber parallelt med plasmacylinderens overflade. Hvis du kigger langs cylinderens akse, vil strømmen løbe rundt i cirkler.

Figur 2.2. En Z-pinch med et lysende hydrogenplasma. Metalstængerne ved siden af glasset lukker det elektriske kredsløb. Strøm løber igennem plasmaet i en retning og løber så igennem metalstængerne i den anden retning. Kilde: Sandpiper, English Wikipedia.



Opgave 2.2

- (a) Hvilken kraft presser plasmaet sammen i pinch-maskiner?
- (b) For Z-pinch antag, at plasmastrømmen peger ind i papiret. Tegn så retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen. Tegn nu retningen af Lorentzkraften. Hvad er effekten af Lorentzkraften?
- (c) For θ -pinch skal man bruge et eksternt magnetfelt. Tegn en cirkel og en strøm, der løber mod urets retning. Hvilken retning skal det eksterne magnetfelt have, sådan at Lorentzkraften peger indad? Hvilken retning har magnetfeltet fra den cirkulære plasmastrøm? Hvad siger det om styrken af det eksterne magnetfelt?

Denne retning – altså retningen langs cirklerne – betegnes som θ -retningen. Magnetfeltet peger så langs cylinderens akse (Z-retningen). Sammenpresningen af plasmaet er her sværere at forklare end for Z-pinch, så vi går ikke mere i dybden med det nu. Plasmaet i θ -pinch er dog mere stabilt end plasmaet i Z-pinch. Dette betyder, at instabiliteter, som kan skade maskinen, er mindre sandsynlige i θ -pinch end i Z-pinch.

I 1939 lavede en fysikstuderende fra Storbritannien det første detaljerede design til en Z-pinch-maskine, men han blev opfordret til at fokusere på noget andet til sit afslutningsprojekt. Det var ikke før 1948, at den første prototype af en Z-pinch-maskine blev lavet. Prototypen var bygget vha. gammelt radarudstyr fra 2. Verdenskrig pga. mangel på investorer. Situationen ændrede sig, da Richters historie gik verden rundt. Regeringer blev pludselig villige til at investere i fusionsforskning, og indenfor kort tid var forskellige projekter med pinch-maskiner påbegyndt i Storbritannien, USA og Sovjetunionen.

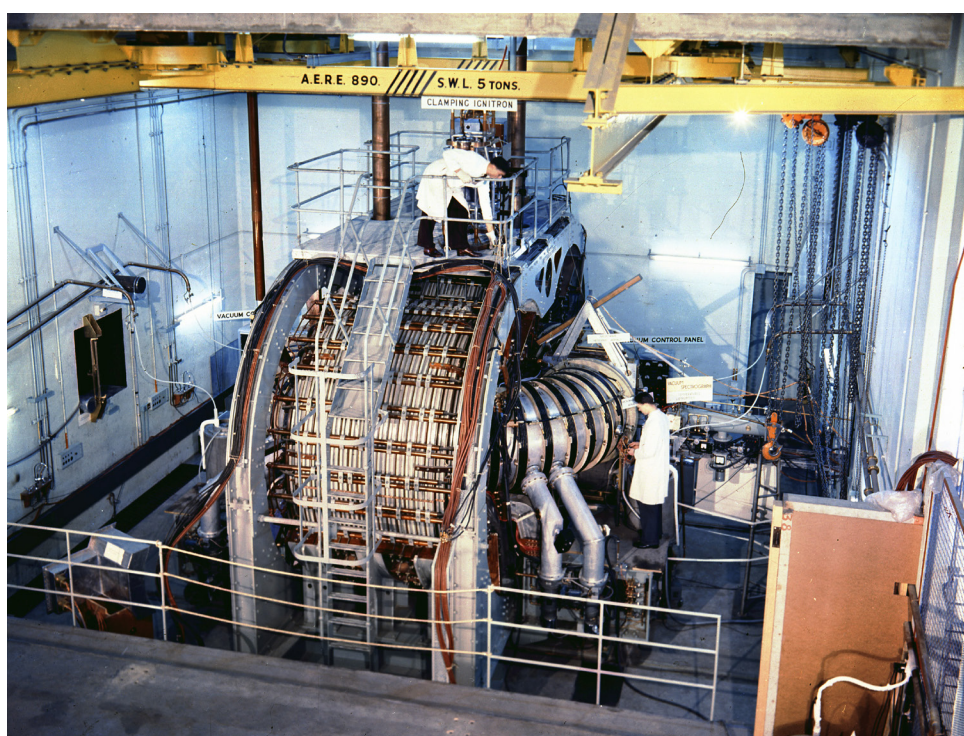
Fra kold krig til samarbejde

Under Den kolde krig blev fusionsforskning holdt hemmeligt. Det blev opdaget, at teknologi fra pinch-maskiner kunne bruges til bomber, og i Storbritannien opstod der en spionageskandale – så regeringer gjorde fusionsforskning endnu mere fortroligt. Al forskning blev flyttet fra universiteterne ud til hemmelige lokationer, og information blev sjældent delt mellem

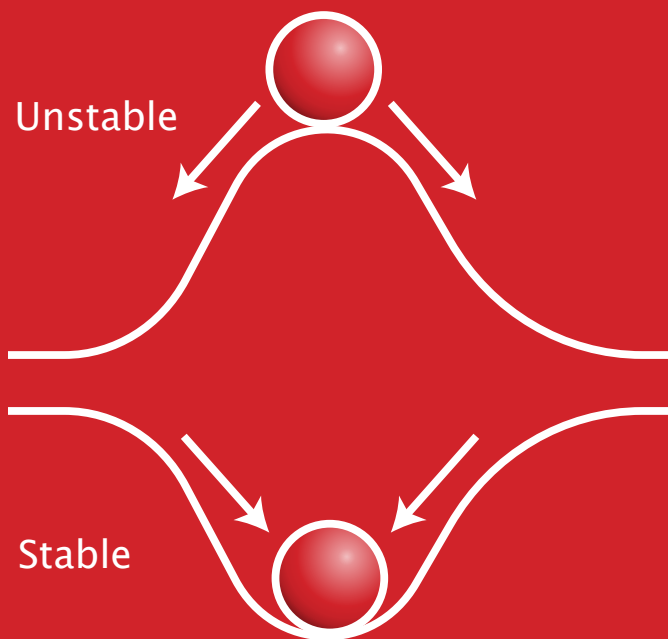
lande. Fordi Vesten var allierede under Den kolde krig, arbejdede Storbritannien og USA sammen på nogle projekter og delte til tider information med hinanden.

I 1956 holdt en forsker fra Sovjetunionen et foredrag i Storbritannien om fusionsforskning i Sovjetunionen og de problemer, som forskerne der havde stødt på indtil videre. Efter foredraget blev det tydeligt, at Storbritannien, USA og Sovjetunionen alle forskede i fusion, og at de alle havde mødt de samme udfordringer. En idé opstod: "Hvad hvis fusionsforskning blev mere tilgængeligt for alle?" Det var sandsynligt, at alle ville finde på deres egne løsninger på et tidspunkt, så de kunne lige så godt arbejde sammen, så denne proces ville tage kortere tid.

Kort tid efter begynde Sovjetunionen at udgive forskningsresultater vedr. plasmafysik. USA og Storbritannien fulgte trop senere ved at udgive deres forskningsresultater lige før den 2. 'Atoms for Peace'-konference i 1958. Samme år opnåede man at danne de første højt-tryk-høj-temperatur fusionsreaktioner i en θ -pinch-maskine kaldet **Scylla**. Det var et gennembrud indenfor fusionsforskning, selvom beregninger viste, at maskindesignet ikke kunne bruges som et effektivt kraftværk. Den største "klassiske" pinch-maskine,



Figur 2.3. To forskere justerer ZETA, den største "klassiske" pinch-maskine. Kilde: UKAEA..



Figur 2.4. Illustration af et stabilt og et ustabil system. I begge tilfælde – så længe ingen skubber til dem – vil boldene ligge stille for evigt. Hvis man forsigtigt skubber til den øverste bold på toppen af bakken, vil den begynde at rulle nedad, uanset hvor svagt skubbet er. Den nederste bold ligger i en "dal", så hvis denne får et lille skub, ruller den bare tilbage til bunden af dalen. Derfor betegner man den øverste bold som ustabil og den nederste bold som stabil.

I virkeligheden oplever systemer små skub hele tiden. En brise eller små vibrationer i jorden kan være et alvorligt problem for den øverste bold, men den nederste bold vil være upåvirket af disse. I fusionsplasmaer er der mange fænomener, der kan få "bolden til at rulle nedad", og hvis disse ikke undgås eller kontrolleres, er plasmaet meget svært at arbejde med.

Instabiliteter

På vejen til fusion har man mødt mange forhindringer, hvilket har fået sortseere til at påstå, at "fusion er, og vil altid være, tyve år fra at blive en realitet". Udfordringerne har en del gange være forårsaget af opdagelsen af et nyt problem, som skyldes en instabilitet. En instabilitet er en perturbation (en "forstyrrelse"), der kun skal bruge et lille skub for at vokse sig større. Ligesom en bold, der ruller nedad en bakke, så vil en instabilitet blive ved med at vokse.

Betragt et lige plasma – fx en cylinderform ligesom i pinch-maskiner, hvorigennem der løber en strøm. Dette plasma er ustabil. Hvis strømmens retning ikke er helt lige men bukket bare en smule, så vil strømmen begynde at bukke sig mere og mere. Plasmaet vil gøre det samme, indtil det bliver stoppet af væggen, hvilket skader maskinen. Forskere prøver at undgå eller kontrollere instabiliteter for netop at undgå, at plasmaet bliver forstyrret, hvilket bl.a. kan medføre skade på reaktoren.

kaldet **ZETA**, blev bygget samme år. Mens ZETA kunne producere adskillige fusionsreaktioner, skabte den aldrig mere fusionsenergi, end energien det kostede at holde maskinen kørende. Under ZETA's 12 år lange levetid gav eksperimenterne udført vha. maskinen dog indsigt i ny, vigtig viden indenfor fusionsforskning – fx nye metoder til at måle plasmatemperaturen. Ved slutningen af 1960'erne var reaktordesigns baseret på pinch stort set ikke længere aktuelle, da mere lovende designs havde set dagens lys.

Stellaratorer

Da Ronald Richter påstod at have opnået fusion, hørte videnskabsfolk om det overalt i verden. En af dem var den amerikanske videnskabsmand Lyman Spitzer, som modtog et telefonopkald fra sin far om Richters såkaldte bedrift, lige før han tog på skiferie. Spitzer konkluderede hurtigt, at Richters påstand var falsk, da Richters maskine aldrig kunne have opvarmet plasmaet til fusionsrelevante temperaturer. Mens Spitzer sad i skilifterne, begyndte han at tænke på, hvordan en fusionsreaktor faktisk kunne fungere. Han kom frem til konceptet bag **stellaratoren**, som han skrev en artikel om, der blev udgivet i 1958.

Stellaratoren er relativt ligetil. Den ligner en tokamak i design (tokamakken blev gennemgået i det første modul). Stellaratoren bruger magnetfelter til at indeslutte et plasma. Magnetfeltet er dannet vha. spoler, som er viklet rundt om det torusformede vakuumkammer, hvori plasmaet befinder sig. Magnetfeltet peger primært i den toroidale retning.

Partikeldrift

I det første modul blev det nævnt, at et torusformet plasma er ustabil, hvis man kun anvender et toroidalt magnetfelt til at indeslutte det. Dette skyldes, at plasmaet har en tendens til også at bevæge sig vertikalt, når det bevæger sig rundt i torussen, i stedet for kun at følge feltlinjerne. Når en partikel bevæger sig på tværs af feltlinjerne, kaldes det for (partikel)**drift**. Partikler begynder at drive af forskellige årsager. Lad os fx tage udgangspunkt i de toroidale feltspoler

i en tokamak. Her vil spolerne tæt på torushullet (**indersiden**) være tættere på hinanden, end de vil være på den anden side af torussen (**ydersiden**). Når spolerne er tæt på hinanden, er magnetfeltet kraftigere. Derfor er magnetfeltet kraftigere på den inderste side end på den yderste side, hvilket medfører, at partiklerne begynder at bevæge sig vertikalt i tokamakken – altså mod de nedre og de øvre dele af tokamakken vægge! Denne slags drift kaldes **gradientdrift** og gennemgås mere detaljeret i en ekstraopgave.

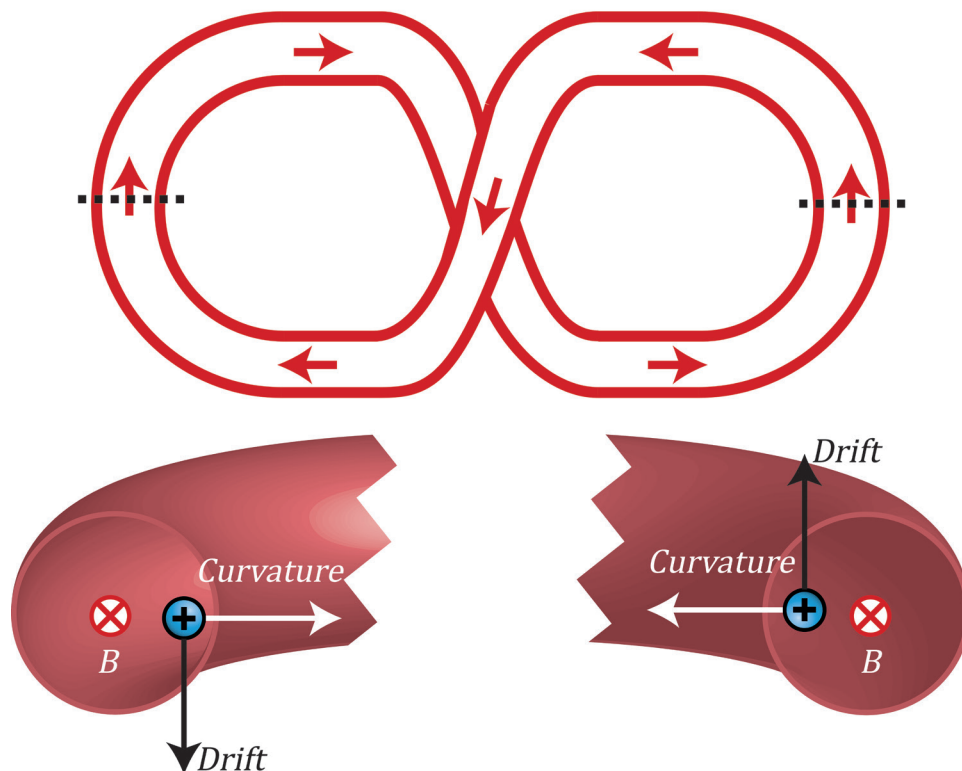
Drift er ikke kun et problem, fordi det fører plasmaet tættere på eller i direkte kontakt med væggene – drift kan også adskille ladninger. Ioner og elektroner driver i forskellige retninger, dvs. alle positive ladninger bevæger sig i en retning, mens alle negative ladninger bevæger sig i den anden retning. Denne ladningsadskillelse gør plasmaet ekstremt ustabil og forårsager endnu mere uønsket drift.

Håndtering af drift

Det er ikke muligt at stoppe partiklerne i at drive ved decideret at fjerne driften. Forskerne kom derfor på en anden løsning: Lad driften modvirke sig selv. Tanken var fx at lade partiklerne drive i en bestemt retning i kort tid og derefter få partiklerne til at drive i den modsatte retning. Man kan forestille sig en partikel, der først driver opad, så nedad, så opad osv., sådan, at partiklen i gennemsnit ligger stille.

Betragt et torusformet plasma. En god måde, hvorpå man kan opnå en samlet drift, som modvirker sig selv, er vha. et spiralformet magnetfelt. Her danner de magnetiske feltlinjer spiraler rundt i torussen. Dette magnetfelt gør, at partiklerne i gennemsnit ikke driver ud mod væggene. I en tokamak bliver magnetfeltet dannet af de toroidale feltspoler, hvis feltlinjer danner vandrette ringe rundt i torussen. Plasmastrømmen generer så et poloidalt magnetfelt. Det samlede magnetfelt er spiralformet. I stellaratorer er spolerne og vakuumkammeret, som plasmaet befinder sig i, bygget sådan, at et spiralformet magnetfelt dannes uden behov for en plasmastrøm.

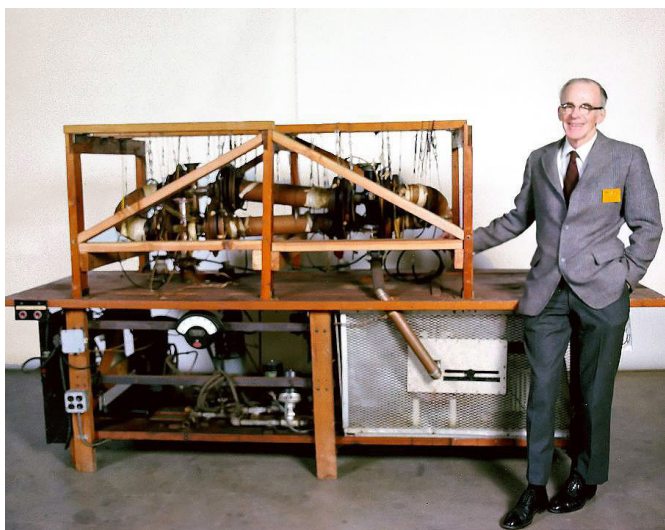
Figur 2.5. Et ion der bevæger sig langs magnetfeltet i en 8-talsformet stellarator. De røde pile viser magnetfeltets retning og hermed også bevægelsesretningen af ionen. Ionen bevæger sig med uret i den venstre del af stellaratoren og mod uret i den højre del. Et poloidalt tværsnit er tegnet nedenunder (bemærk de stiplede linjer på den øverste tegning). I disse tværsnit ses retningen af: Drift (sort), krumning (hvid) og magnetfelt (rød). Fordi krumningen skifter retning fra den venstre del til den højre del, vil driften også skifte retning. Når ionen har bevæget sig en hel tur rundt i 8-tallet, vil den derfor samlet set hverken have drevet op eller ned.



Betragt et plasma, der har form som et 8-tal, se figur 2.5. For en bestemt type drift afhænger retningen af driften af plasmaets krumning (teknisk set af magnetfeltets krumning). Da krumningen, som en partikel oplever, skifter retning, når partiklen krydser centrum af 8-tallet, så vil partiklen drive i modsatte retninger på hver side af 8-tallet. Fx en ion, der bevæger sig med uret i den venstre halvdel af 8-tallet, derefter krydser centrum, og så bevæger sig mod uret i den højre halvdel af 8-tallet. Krumningen skifter retning i løbet af denne bevægelse, og derfor gør driften også! Hvis partiklerne bevæger sig hurtigt nok rundt i 8-tallet, vil de ikke kunne nå at drive meget i en retning, før de begynder at drive i den modsatte retning, og resultatet er altså ingen samlet drift. I tokamakker og stellaratorer er der heller ingen samlet drift grundet det spiralformede magnetfelt, men mekanismen er ikke helt den samme.

De første stellaratorer

Den første stellarator, Model A, var en lille maskine, der kunne være på et bord. Maskinen skulle vise, hvorvidt stellarator-konceptet duede. I 1953 var Model

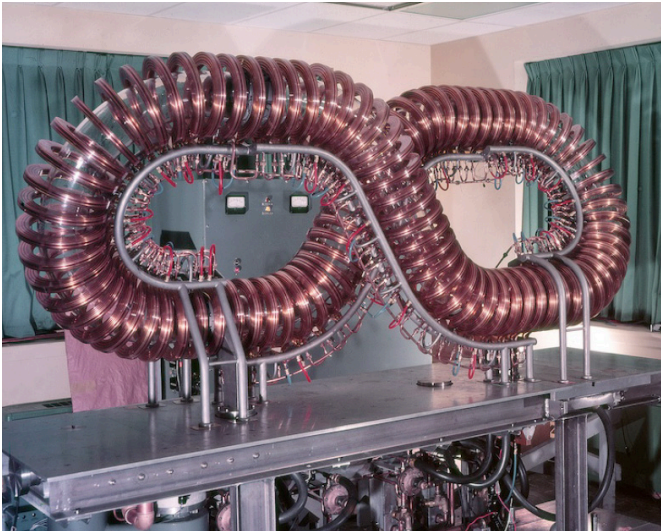


Figur 2.6. Lyman Spitzer ved siden af stellaratoren Model A. Kilde: PPPL.

A færdig, og den så lovende ud. Det næste skridt var at lave en større version: Model B. Der var dog nogle problemer. Fordi spolerne fører strøm og befinder sig i et magnetfelt, virker Lorentzkraften på spolerne. Derfor skal spolerne nøje fastgøres, så de ikke flytter sig. Til trods for dette var indeslutningen god i nogle maskiner. Efter yderligere forbedringer til designet dukkede et andet problem frem. Plasmaet kølede hurtigere ned end forventet, fordi plasmaet indeholdt en masse urenheder. Urenheder er partikler i plasmaet, som ikke er en del af selve "brændstoffet", men som i stedet stammer fra fx væggene. Disse urenheder udsendte stråling, som dræned plasmaet for energi og hurtigt kølede det ned. For at modvirke dette forbedrede man vakuumkammeret for at fjerne urenheder fra plasmaet.

Forskellige udgaver af Model B blev konstrueret for at se, hvad der virkede, og hvilke problemer der var. Desværre havde alle udgaverne et problem: **'pump out'**. Driften var meget værre (hurtigere), end selv de mest pessimistiske teoretiske modeller havde forventet. Efter Model B designede man Model C. Model C havde et 'racetrack-layout' (dvs. ovalformet), flere opvarmingskilder og en **divertor**. En divertor er en slags udstødning for fusionsreaktorer og uddybes mere i modul 4.

Stellaratorernes ydeevne var dog stadig dårligere end de teoretiske forventninger. Mere grundforskning indenfor plasmafysik var en nødvendighed for at forstå, hvorfor plasmaet ikke bare pænt ville blive i maskinen. I løbet af mange eksperimenter og nogle få år blev fysikere



Figur 2.7. Stellaratoren Model B-2 med sin karakteristiske form som et 8-tal. Kilde: PPPL.

klogere på plasmaer, og indeslutningen blev forbedret, så det passede med de teoretiske modeller. I 1969 opnåede Model C sin rekord: En elektrontemperatur på 4.6 millioner grader celsius!

Indeslutning – ingen nem løsning

Selvom 4.6 millioner grader var en høj plasmatemperatur dengang, så er det langt fra de ca. 150 millioner grader, som var (og er) påkrævet i mange fusionsreaktorer. Spitzer troede, at stellaratorer kunne klare det bedre end andre designs. Han troede, at stellaratorer ikke ville blive påvirket synderligt af ekstra varmetab forårsaget af den såkaldte **Bohm-diffusion**. Men i løbet af nogle eksperimenter og forskning i 1960'erne blev det tydeligt, at Bohm-diffusion var en fundamental egenskab af plasmaer. Bohm-diffusion medfører, at indeslutningen af plasmaet kun kan forbedres lineært med magnetfeltstyrken (B) frem for kvadratisk (B^2) som forventet via "klassisk" teori. Med klassisk teori troede man, at en fordobling af magnetfeltstyrken fører til indeslutning, som er fire gange bedre.

Men nu viste det sig, at hvis man fordoblede magnetfeltstyrken, er indeslutningen kun dobbelt så god. At opnå den ønskede indeslutning blev pludselig meget sværere – nogle troede faktisk, at fusion ikke var muligt. Magnetfeltet skulle være kraftigere, end det, man troede, var teknologisk muligt. Denne opdagelse sendte en bølge af pessimisme igennem fusionsforskerne. Men et design fulgte ikke denne tendens: **Tokamakken**.

Tokamak

Historien starter i 1950 på den russiske ø Sakhalin nær Japan med en sergent i Den Røde Hær, der kedede sig. Han besluttede at skrive et brev til Sovjetunionens kommunistiske partis centralkomité. Brevet foreslog at antænde fusionsbrændstof, så det blev et plasma, med en atombombe og derefter at indeslutte det varme plasma. Målet var altså en jævn energiproduktion. Brevet blev sendt til Andrei Sakharov, der synes sergentens idé var interessant men samtidig – ikke overraskende – langt fra et perfekt design. Sammen med Igor Tamm begyndte Sakharov at undersøge, hvordan man kunne bygge en fusionsreaktor. Deres første idé var at indeslutte plasmaet inde i en torusformet spole. Som nævnt tidligere virkede dette ikke, da plasmaet vil drive ud mod væggene.

For at løse dette problem foreslog Sakharov at danne et poloidalt magnetfelt vha. en strøm inde i plasmaet. Dette kunne gøres ved at placere en ledning inde i plasmaet og føre en strøm igennem ledningen. Det er dog generelt en dårlig idé at placere en ledning inde i plasma, som er varmere end Solens kerne. Man brugte dog denne metode til de første eksperimenter som en slags 'proof of concept'. En anden idé kom nu på banen: Lad strømmen inde i plasmaet opstå ved at få elektronerne i plasmaet til at bevæge sig – altså en plasmastrøm, hvor plasmaet selv er lederen. Der er mange metoder, hvorpå man kan danne en plasmastrøm. Den simpleste og mest anvendte metode,



Figur 2.8. Igor Tamm til venstre og Andrei Sakharov til højre – hjernerne bag tokamak-designet. Kilde: Nobel foundation (venstre) & RIA Novosti archive, image #25981 / Vladimir Fedorenko / CC-BY-SA 3.0 (højre)

magnetisk induktion, blev diskuteret i modul 1: I tokamakens centrum er der en spole, og ved at ændre strømstyrken i spolen dannes en plasmastrøm. Fordi man ikke uafbrudt kan blive ved med at øge strømstyrken i spolen, så skal tokamakken opereres i pulser. Dette er en vigtig forskel sammenlignet med stellaratorer, som i princippet kan køre uafbrudt. Under eksperimenterne med tokamak-designet opdagede forskerne i Sovjetunionen selv pinch-konceptet og begyndte at eksperimentere med deres egne pinch-maskiner. Disse eksperimenter med pinch-maskiner afledte resurser fra tokamak-projektet, og derfor tog det længere tid at bygge en rigtig tokamak.

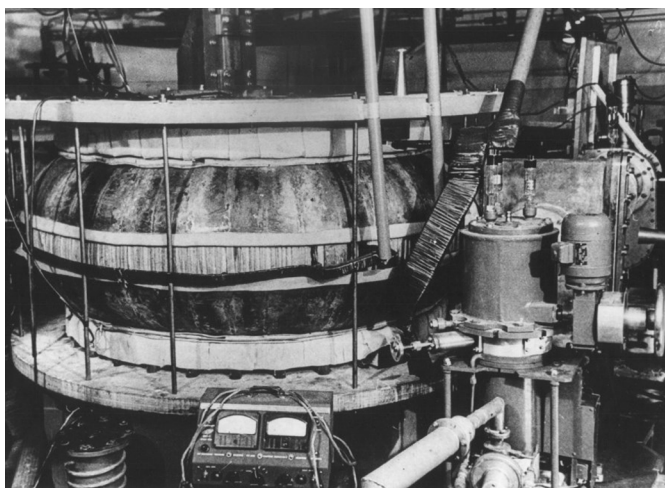
Opgave 2.3

- (a) Tegn retningen af magnetfeltet fra de toroidale feltspoler i et poloidalt tværsnit. Tegn også retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen i samme tegning.
- (b) Gør nu det samme for et toroidalt tværsnit.

De første tokamakker

Den første tokamak, **T-1**, blev bygget i 1958. Her stødte de sovjetiske forskere dog også på problemer med urenheder, som nedkølede plasmaet, så de forbedrede hurtigt designet med tokamakken **T-2**, som havde et bedre vakuumkammer. Forskerne blev dog ikke klar til at vise deres arbejde med tokamakken ved 'Atoms for Peace'-konferencen i 1958. Under konferencen blev forskerne fra Sovjetunionen introduceret til Spitzers stellarator-design. De sovjetiske forskere var så imponerede, at de ville bygge deres egne stellaratorer.

De fleste foreslog faktisk til Natan Yavlinsky, designeren af T-1, at den nye tokamak **T-3** skulle designes på ny, så den lignede en stellarator. Til trods for opfordringerne fortsatte Yavlinsky med tokamak-designet. Plasmastrømmen i tokamakken bidrager til at opvarme plasmaet, og gode opvarmningssystemer til stellaratorer



Figur 2.9. T-1, den første tokamak. Store- og lilleradius var henholdsvis 0.67 m og 0.17 m. Dens magneter kunne danne et magnetfelt på 1.5 T, og plasmastrømmen havde strømstyrken 100 kA. Kilde: Nomen nescio/ITER Organization.

var ikke tilgængelige endnu. At fortsætte med tokamak-designet viste sig at være en vigtig beslutning, da forskningsfeltet snart ville blive ramt af en bølge af pessimisme.

En skeptisk modtagelse

I løbet af et internationalt møde om fusion i Storbritanniens nye forskningscenter i Culham i 1965 blev det tydeligt, at de mest kendte designs havde **problemer med at indeslutte plasmaet**. Bohm-diffusion var et **fundamentalt problem**, som både stellaratorer og pinch-maskiner ikke kunne løse. Mindre kendte designs lod heller ikke til at klare det bedre. Men så præsenterede Sovjetunionen resultaterne fra en toroidal pinch-maskine, som lignede en tokamak. Denne maskine nåede temperaturer 10 gange højere, end Bohm-diffusion ville have tilladt.

De andre forskere var skeptiske overfor disse resultater. Især de britiske forskere mente, at de sovjetiske forskere måtte have lavet en fejl, fordi den toroidale pinch-maskine lignede ZETA – den britiske pinch-maskine. Briterne troede, at de sovjetiske forskere havde lavet den samme fejl som dem, dengang de troede, at ZETA havde produceret mere energi fra fusion, end det de brugte på at holde maskinen kørende. De sovjetiske forskere var uenige. De argumenterede for, at de havde undgået de samme fejl, som briterne havde lavet, og de mente, at metoderne til at måle temperatur var temmelig ens. Debatten blev intens, og spændingen mellem Øst og Vest hjalp ikke.

Til sidst brød Spitzer – som styrede mødet – ind i debatten. Han afviste den sovjetiske påstand om temperaturen grundet den store usikkerhed på temperaturmålingerne. Selv de sovjetiske forskere blev nødt til at indrømme, at deres metode til at måle temperatur ikke var præcis nok til at sige med sikkerhed, at deres målte plasmatemperatur var over grænsen sat af Bohm-diffusion.

Standhaftigt

Nogle få år senere i 1968 udgav Sovjetunionen resultaterne fra deres reaktor T-3. Temperaturerne var en størrelsesorden større end på enhver anden fusionsmaskine, ligesom resultaterne fra 1965 indikerede. Resultaterne blev igen mødt med skepsis, siden temperaturmålingerne var foretaget indirekte. Sovjetunionen ønskede ikke, at dette skulle udvikle sig til en diskussion igen, siden deres resultater sandsynligvis ville blive afvist ligesom sidst.

Så de tillod Storbritannien at sende et hold til forskningscentret i Sovjetunionen. Forskerne i Storbritannien havde udviklet en ny metode til direkte at måle på plasma kaldet **Thomson-spredning (Thomson scattering)**. Dette var på mange måder en sejr for Sovjetunionen. Det var meget sjældent, at folk fra Vesten blev inviteret til Sovjetunionen, og sjældnere endda, at disse folk fik lov til at forske på et sovjetisk forskningscenter. Storbritannien sendte et meget respekteret hold afsted, som blev kaldt '**The Culham Five**'. Holdet udførte deres målinger, og et år senere udgav de en artikel med resultaterne.

Artiklens konklusion var endegyldig: Resultaterne, som Sovjetunionen påstod at have opnået, var korrekte og var på det tidspunkt betydeligt bedre end resultaterne fra enhver anden fusionsmaskine. Efter Storbritannien bekræftede de utrolige resultater, fik fusionsforskere igen håb og begyndte at udvikle tokamak-designet. Dette førte til en periode kendt som 'Tokamak Stampede' eller 'Tokamak Mania', hvor mange stellaratorer blev omdannet til tokamakker, og nye tokamakker blev bygget overalt i verden. Kapløbet om at få tokamakken til at virke var således gået i gang.

Gennembrud og nedbrud

Større og bedre

Med fokus rettet mod tokamakker begyndte lande at bygge dem større og større i håbet om at bygge den bedste maskine. Derudover hjalp nye opdagelser med at konstruere endnu bedre reaktorer. Man mente, at det ikke ville tage lang tid, før nogen byggede en succesfuld fusionsreaktor. Men i takt med at maskinerne blev større, blev nye instabiliteter også opdaget. Disse nye instabiliteter krævede imidlertid mere forskning, så man kunne undgå dem, og man forestillede sig at bygge endnu større maskiner for at få fusion til at fungere. Med tiden blev disse maskiner så store, at man var nødt til at arbejde sammen på tværs af lande. Dette resulterede i **ITER**. ITER er det største projekt endnu og vil blive diskuteret i næste kapitel. I dette kapitel undersøger vi opdagelserne, udfordringerne og bedrifterne i de sidste 40 år af fusionsforskning – ud over ITER.

Bedre maskiner

I starten af 1970'erne blev USA en frontløber inden for fusion. Folkene fra Princeton Plasma Physics Laboratory i USA var dygtige til at løse problemer vedr. opvarmning af plasma. Ved slutningen af 1970'erne havde deres tokamak, Princeton Large Torus (PLT), opvarmet et plasma til 60 millioner grader celsius. Det var ca. otte gange mere end det, som den sovjetiske reaktor T-3 havde opnået på daværende tidspunkt.

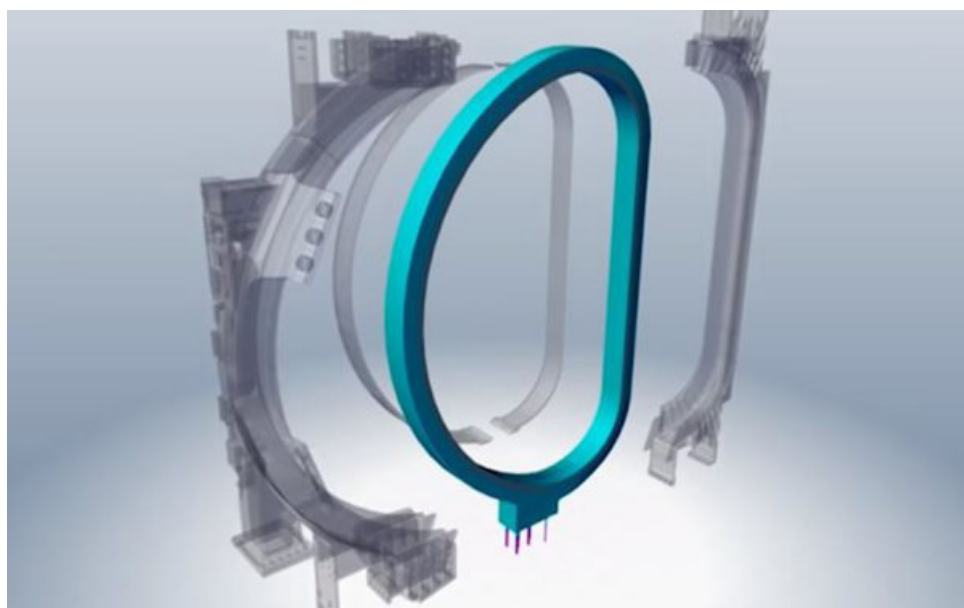
Det viste, at man kunne opnå temperaturer, som var høje nok til at understøtte fusion. Denne temperaturrekord blev hjulpet på vej af en ny og vigtig opvarmningsteknologi: NBI (neutral beam injection). Denne opvarmningsmetode går ud på at skyde meget hurtige, elektrisk neutrale partikler ind i plasmaet, hvor partiklerne afgiver deres kinetiske energi som varmeenergi til resten af plasmaet via kollisioner.

Men den egentlige årsag til at USA blev en frontløber var det store budget, de havde stillet til rådighed til fusionsforskning. Fx kostede en tokamak dengang omkring \$500,000, mens USA havde et årligt budget til fusionsforskning på ca. \$25 millioner på det tidspunkt.

En årsag til at USA var villige til at bruge så mange penge på forskning i alternative energikilder var Energikrisen i 1973. I 1973 fastslog olieeksporterende lande i Mellemøsten, at de ikke ville sælge olie til lande, som støttede Israel. USA blev hårdt ramt af denne embargo, da de var særdeles afhængige af olien. For at blive mindre afhængige af olie i fremtiden øgede USA forskningsbudgettet til alternative energikilder.

Magneterne i tokamakkerne blev også forbedret i denne periode. I løbet af 1900-tallet var der blevet forsket i og udviklet superledere. Disse superledere kunne bruges til at danne ekstremt kraftige magnetfelter. Ved slutningen af 1970'erne var superledere klar til at kunne bruges i fusionsreaktorer. Fusionsreaktoren **T-7** var den første til at anvende superledende magneter.

Geometrien af tokamak-designet ændrede sig også i denne periode. Fx opfandt man designet 'doublet', hvor man anvender **D-formede** toroidale feltspoler. Som konsekvens af dette bliver plasmaet også mere D-formet, hvilket gjorde det nemmere at undgå nogle instabiliteter. Dette gjorde det så muligt at operere tokamakkerne med højere plasmataethed.



Figur 2.10. Formen af denne toroidale feltspole ligner et stort D med runde hjørner. I forhold til mere cirkelformede spoler hjælper D-formen med at gøre plasmaet i tokamakken mere stabilt. Kilde: ITER Organization.

Større plasma

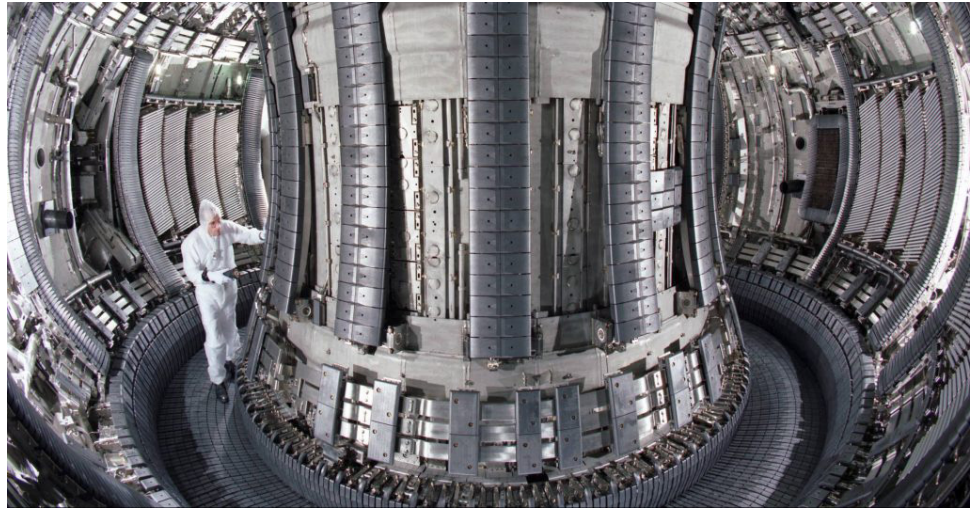
Omkring dette tidspunkt opnåede man omstændighederne for en fungerende fusionsreaktor (temperatur, indeslutningstid fx), men disse var ikke alle opnået i samme maskine. Det næste skridt var derfor at bygge én stor maskine ud fra de nye designs med bl.a. de forbedrede magneter og opvarmningsmetoder. Maskinen skulle dog også være stor af en anden grund: En større reaktor kan indeholde et større fusionsplasma, og det er nemmere at opretholde temperaturen, når plasmaet er større.

Lad os betragte plasmaets volumen og overflade. I en fusionsreaktor er der en øvre grænse for, hvor høj plasmatætheden kan være, og der er en optimal værdi for temperaturen. Så lad os antage, at tætheden og temperaturen er konstante. Når vi øger reaktorens størrelse, så øges plasmaets volumen også. Antal fusionsreaktioner i hele reaktoren afhænger direkte af plasmaets volumen. Et større volumen indeholder mere fusionsbrændstof, så flere fusionsreaktioner kan finde sted samtidig. Dette betyder, at **fusionseffekten** (fusionsenergi produceret pr. tid) stiger, når plasmaets volumen stiger. Siden temperaturen antages konstant, så indeholder plasmaet også mere termisk energi.

Samtidig så mister plasmaet energi ved dets overflade, hvor partikler og stråling forlader plasmaet, hvilket medfører et energitab. Et større plasma har en større overflade, hvilket giver anledning til større energitab ved overfladen. Et større plasma betyder dog også, at mere fusionsenergi produceres i plasmaet, og at plasmaet indeholder mere termisk energi. Forestil dig nu en kugle af plasma. Overfladearealet af kuglen er proportionalt med r^2 , hvor r er radius. Volumen af kuglen er proportionalt med r^3 . Når r stiger, så stiger volumenet altså hurtigere end overfladearealet. Så når plasmaet vokser, kan det indeholde mere termisk energi og producere mere fusionsenergi, og energitabet ved overfladen er ikke øget nok til fuldstændig at modvirke dette.

Konsekvensen af dette er bl.a., at et større plasma langsommere nedkøles. Den samme effekt begrænser

Figur 2.11. En tekniker inde i plasmakammeret i JET. JET er på nuværende tidspunkt den største, fungerende tokamak, og den har rekorden for største fusionseffekt og største Q-faktor. Kilde: UKAEA.



størrelsen af dyr, da de ikke kan nedkøle sig selv, hvis de bliver for store – elefanten har fx sine store ører for at øge sit overfladeareal! Med fusionsreaktorer er der ydermere egenskaben, at et større plasma selv producerer mere fusionsenergi. Dvs. pr. volumen så skal et større plasma tilføres mindre energi for at opnå og opretholde en ønsket temperatur end et mindre plasma. Dette kan i praksis også gøre det nemmere at opvarme et større plasma til højere temperaturer end et mindre plasma.

De store, nationale maskiner

Forskellige lande begyndte at bygge deres egne, store maskiner i håbet om at være de første til at opnå **videnskabeligt break-even** – eller bare 'break-even'. Break-even opnås, når fusionseffekt produceret i plasmaet er lig effekten tilført plasmaet. Break-even kendetegnes ved $Q=1$. **Q-faktoren** er produceret fusionseffekt delt med opvarmningseffekt. Jo højere, jo bedre.

I 1982 færdiggjorde USA deres store tokamak: **Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR)**. Den lignede en større udgave af PLT. TFTR havde oprindeligt ikke D-formede toroidale feltspoler, fordi fordelene ved disse ikke var velkendte, da man designede TFTR. Japan konstruerede en lignende maskine kaldet 'Japanese Torus-60' eller bare 'JT-60'. JT-60 stod færdig i 1985 og var udstyret med D-formede toroidale feltspoler.

Individuelle lande i Europa havde ikke et stort nok budget til at bygge så store maskiner. Derfor besluttede nogle europæiske lande at bygge en tokamak sammen. Tokamakken **Joint European Torus (JET)** stod færdig i 1983. Siden da har JET været den største tokamak, der er i drift. JET var også udstyret med D-formede toroidale feltspoler, selvom designerne ikke havde kendskab til, at D-formen hjalp med at forme plasmaet på en mere fordelagtig måde. Valget af de D-formede feltspoler havde også andre fordele: Fx gav det en bedre fordeling af kræfter i spolerne, og det gjorde det nemmere at fastgøre spoler i midten af torussen til en søjle for at danne den centrale solenoide. Sovjetunionen færdiggjorde deres store tokamak **T-15** i 1988. Målet for alle disse maskiner var at opnå break-even ($Q=1$). Men de første eksperimenter med maskinerne var mildest talt skuffende. TFTR opnåede fx kun $Q=0.2$. Nye instabiliteter var dukket frem, som ikke var blevet observeret i de ældre, mindre kraftfulde maskiner.

Forskerne kom på forskellige løsninger til de forskellige problemer, men det blev hurtigt tydeligt, at fusionsreaktorer blev nødt til at være endnu større. Dette betød, at fusion ville blive forsinket med mindst et par årtier. Dette sendte endnu en bølge af pessimisme igennem fusionsforskerne. Heldigvis var forhandlinger om at bygge en ekstremt stor, international reaktor

Opgave 2.4

En stor forskel mellem stellaratorer og tokamakker er, hvor lang tid de kan køre ad gangen. Moderne stellaratorer kan opretholde et plasma i op til 30 minutter. Tokamakker er derimod begrænset af deres pulsvarighed t_{pulse} (husk, tokamakker er pulseret pga. den centrale solenoide):

$$t_{\text{pulse}} = (\Psi - L_p I_p) / V_{\text{loop}} .$$

Her er Ψ den tilgængelige magnetiske flux, L_p er induktansen af plasmaet (hvor kraftigt det reagerer på magnetfelter), I_p er den nødvendige strømstyrke af plasmastrømmen og V_{loop} er den påkrævede spændingsforskelle for at drive plasmastrømmen. For ITER er værdierne af disse givet nedenfor. Hvor lang tid varer ITER's pulser?

$$\Psi = 250 \text{ Vs}$$

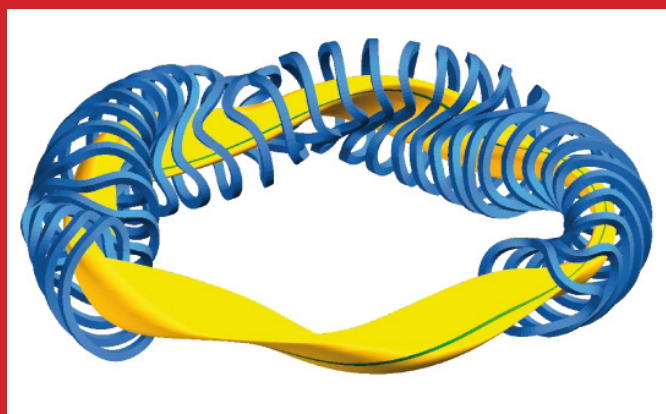
$$L_p = 12.5 \mu\text{Vs/A}$$

$$I_p = 16 \text{ MA}$$

$$V_{\text{loop}} = 0.1 \text{ V.}$$

Moderne stellaratorer

Mens mange fusionsforskere primært er optaget af tokmakker, så betyder det ikke, at der ikke er sket fremskridt for andre designs. Stellaratorer har også set forbedringer. Den stigende ydeevne af computere har haft en enorm effekt, eftersom software kan bruges til at optimere det meget komplekse stellarator-design. Dette har gjort store stellarator-projekter mulige. Wendelstein 7-X (W7-X) er p.t. den største, fungerende stellarator. Den består af omkring 50 spoler, der er bøjet og drejet i forskellige former. I figuren nedenfor er konfigurationen af spolerne i W7-X vist med blå. Den teoretiske form af plasmaet er vist med gul. Bemærk, at denne form er meget mere kompliceret end den "simple" donut-form af plasmaet i en tokamak.



Figur 2.12. En repræsentation af Wendelstein 7-X. Spolerne er vist med blå og formen af plasmaet er vist med gul. Den grønne kurve, der løber langs den gule overflade, er en magnetisk feltlinje.
Kilde: Max Planck Institute for Plasma Physics.

blevet sat i gang. Men som vil blive diskuteret i næste kapitel, så tog det noget tid, før forhandlingerne var på plads, og i dag venter vi fortsat på, at maskinen bliver færdigbygget. I løbet af denne periode er vores teknologi og viden om fusion og plasmaer vokset betydeligt, og mange rekorder er blevet sat.

Nye rekorder

Indtil 1990'erne brugte man ikke tritium i fusionseksperimenter, selvom fusion er meget nemmere at opnå med deuterium-tritium-brændstof (D-T-brændstof) end med rent deuterium-brændstof. Men

tritium er et svært og dyrt stof at arbejde med. På nuværende tidspunkt ses D-T-brændstof dog som vores eneste reelle mulighed for energiproduktion med $Q > 1$. En af tritiums problematiske egenskaber er, at det udsender radioaktiv beta-stråling. Tritium har også en tendens til at blive absorberet i nogle materialer. Se evt. modul 5, for hvorfor tritium er svært at arbejde med. Mens JET var den første maskine til at eksperimentere med D-T-brændstof, så var det TFTR, der satte den første rekord med brændstoffet. I 1994 producerede TFTR hele 10.7 MW fusionseffekt ved at anvende D-T-brændstof. På det tidspunkt havde man opgraderet TFTR med D-formede toroidale feltspoler. Senere hen i 1995 opnåede man 510 millioner grader i TFTR - en ny verdensrekord. Denne rekord blev dog allerede slået i 1996, da JT-60 dannede et plasma med en temperatur på 522 millioner grader. I 1997 satte JET en vigtig rekord på 16 MW fusionseffekt, mens plasmaet blev opvarmet med en opvarmningseffekt på 24 MW. Dette var ikke blot en rekord for den største fusionseffekt, det var også en verdensrekord for højeste Q-faktor med $Q = 16 \text{ MW} / 24 \text{ MW} = 0.67$.

Både TFTR og JET var i stand til at opnå disse ekstraordinære resultater grundet **alfapartiklerne** produceret under fusionsreaktionerne. 20 % af energien frigivet under en D-T-fusionsreaktion bliver overført til alfapartiklen som kinetisk energi. Fordi alfapartiklerne er ladede partikler, kan de også indesluttet vha. magnetfeltet i tokamakken og således overføre deres energi til resten af plasmaet. Plasmaet bliver derfor opvarmet af alfapartiklerne, hvilket sænker behovet for ekstern opvarmning af plasmaet! Alfapartiklerne opvarmede med 3.2 MW under JET's rekord i 1997. Omkring samme tidspunkt var JT-60 i stand til at opnå omstændigheder, som teoretisk kunne give $Q = 1.25$, men JT-60 brugte ikke D-T-brændstof, da JT-60 ikke er bygget til at håndtere tritium. Derfor var man aldrig i stand til at vise, at JT-60 kunne opnå $Q = 1.25$. Det teoretiske resultat er stadig meget imponerende.

JT-60 satte en ny verdensrekord i 2013: Det højeste **triple-produkt**. Triple-produktet er tre størrelser ganget på hinanden: Plasmataetheden, plasmatemperaturen og indeslutningstiden. Triple-produktet er en god indikator

for reaktorydeevne. På dette tidspunkt havde Kina bygget en stor tokamak kaldet **EAST**, som stabilt kan indeslutte et plasma i relativ lang tid. I december 2021 indesluttede man et plasma i 1056 s, og i april 2023 indesluttede man et plasma 403 s. Den nyere rekord er stadig betydelig, da plasmatemperaturen var højere, og som triple-produktet viser, skal man have optimal tæthed, temperatur og indeslutningstid – det er en balancegang.

Det er også værd at tilføje, at en tokamak kaldet **SPARC** er blevet designet. SPARC vil bruge en ny type af superledende magneter. Disse magneter vil have anderledes egenskaber end de superledere, der bruges i de nuværende maskiner. Den vigtigste af disse egenskaber er evnen til at danne endnu kraftigere magnetfelter. Kraftigere magnetfelter kan øge fusionseffekten drastisk. De nye superledere kan også anvendes ved højere temperaturer, selvom dette reducerer styrken af magnetfelterne. Denne egenskab er dog brugbar, eftersom nedkølingen af superledere er en af de dyreste elementer i en fusionsreaktor. I de fleste

Alfa, beta og gamma

Når fysikere snakker om ioniserende (radioaktiv) stråling, er der tre vigtige typer: alfa-, beta- og gammastråling. Før vi helt forstod, hvad ioniserende stråling bestod af, kunne vi kategorisere strålingen baseret på, hvor let det var at bremse strålingen, og hvordan materialer absorberede energien fra strålingen. Senere fandt man ud af, at denne kategorisering også kunne forklares ud fra, hvad strålingen bestod af.

Gammastråling består af elektromagnetiske bølger – ligesom lys. Gammastråling har dog en bølgelængde, som vores øjne ikke kan opfange. Betastråling består af elektroner, der bevæger sig meget hurtigt. Alfastråling består af hurtige alfapartikler, og alfapartikler består af to protoner og to neutroner. Siden dette svarer til en helium-4-kerne, så kalder man også et fuldt ioniseret helium-4-atom for en alfapartikel.

designs vil man dog nok ikke gøre brug af dette, fordi endnu kraftigere magnetfelter er mere fordelagtigt end besparelser på nedkølingen af magneterne.

Hvis du vil lære mere om superledere, kan du kigge på modul 4. En anden ting, som er speciel ved SPARC, er, at investorerne er private dvs. store firmaer og milliardærer i stedet for offentlige investorer såsom regeringer.

2.4

ITER

Nu til dags er det svært at tale om fusion uden at tale om ITER. ITER er en tokamak, og når den står færdig, vil den være den største tokamak til dato. ITER er et resultat af internationalt samarbejde mellem 35 lande. Den vil blive brugt til at udføre verdens største eksperimenter med plasmafysik og fusionsenergi. Dette kapitel vil først undersøge ITER's historie og vil derefter forklare, hvad ITER håber på at opnå.

Opgave 2.5

ITER er et godt eksempel på fordelene og ulemperne, når mange parter arbejder med det samme projekt. Diskuter følgende i små grupper:

- (a) Hvad forventer I er fordelene?
- (b) Hvad forventer I er ulemperne?

Under Den kolde krig

I 1973 diskuterede Richard Nixon og Leonid Brezjnev idéen om en international fusionsreaktor. Det var dog først i 1978, at et officielt projekt blev påbegyndt. Projektet, kaldet **INTOR**, blev startet af fire parter: USA, Sovjetunionen, Japan og Euratom, som repræsenterede Europa. Men grundet Den kolde krig forblev samarbejdet på tværs af Øst og Vest minimalt, og projektet var praktisk set i stilstand. Disse omstændigheder ændrede sig i 1985. Mikhail Gorbatsjov var lige blevet lederen af Sovjetunionen. Han var langt mere villig til at samarbejde med Vesten i håbet om at forbedre Sovjetunionens stagnerende økonomi – en politik som ville få langtrækkende konsekvenser og hjælpe med at bane vejen for Sovjetunionens opløsning i 1991. Under Genevekonferencen i 1985 mødte Gorbatsjov den

daværende amerikanske præsident Ronald Reagan. De var uenige om mange ting, og mange troede, at konferencen ville være spild af tid. Men begge parter var blevet opfordret af deres respektive forskere til faktisk at begynde at arbejde på en international fusionsreaktor, eftersom forskerne kunne regne ud, at prisen på en fungerende fusionsreaktor ville være større end det, som et enkelt lands budget ville have råd til. I løbet af 1900-tallet blev videnskab endnu mere betragtet som et middel til at fremme internationalt samarbejde. Andre sådanne projekter, der støtter op om internationalt samarbejde, er CERN og ISS.

Således blev Gorbatjov og Reagan enige om at puste nyt liv i INTOR-projektet. Et år senere i 1986 blev en ny aftale underskrevet af projektets fire oprindelige parter, og et fællesskab blev dannet til at styre projektet. Designfasen var skudt i gang, og projektets navn blev ændret til ITER. Navnet ITER stammer oprindeligt fra en forkortelse, men iter betyder også "vejen" eller "stien" på latin. Dette har symbolsk betydning, eftersom ITER ses som det næste store skridt på vejen til fusion. I 1990, et år før Den kolde krig sluttede, blev den konceptuelle designfase afsluttet. I 1992 blev de teknologiske målsætninger fastlagt, og den ingeniørmæssige designfase varede så fra 1992 til 1998. Reaktordesignet var nu nogenlunde færdigt, og man kunne begynde at bygge reaktoren. Ikke? Parterne havde desværre ikke kunnet blive enige, om hvor ITER skulle bygges, og hvem der skulle betale for hvad.



Figur 2.13. Sovjetunionens leder Mikhail Gorbatjov (tv.) og den amerikanske præsident Ronald Reagan (th.). Kilde: White House Photographic Office.

Opgave 2.6

Vi har tidligere nævnt, at ITER er en stor maskine – men hvor stor? På ITER's hjemmeside kan man finde meget brugbar og interessant information. Besøg <https://www.iter.org/factsfigures>. Her kan du se, at inde i ITER, i kammeret hvor plasmaet befinder sig, kan der være 840 m³. Hvor stort er dette volumen egentlig?

- (a) Et menneske fylder ca. 65 liter. Hvor mange mennesker kan der være i ITER?
- (b) En elefant fylder ca. 5 m³. Hvor mange elefanter kan der være i ITER?

Forhandlinger tager tid

I 1999 blev USA træt af alle diskussionerne, forlod ITER-projektet og startede deres eget projekt (FIRE-projektet). Canada blev dog et nyt medlem af ITER-projektet i 2001. To år senere vendte USA dog tilbage til ITER, efter udfordringerne ved at bygge deres egen reaktor blev for store. Samme år forlod Canada projektet grundet manglende finansiering.

ITER fik dog to nye medlemmer på samme tidspunkt: Kina og Sydkorea blev medlemmer i 2003. Indien blev medlem i 2005 og er stadig det nyeste medlem. På det tidspunkt var forhandlingerne om ITER's placering stadig i gang. Der var to muligheder: Tæt på Rokkasho i Japan eller tæt på Cadarache i Frankrig. Til sidst kom man frem til en aftale: ITER skulle bygges tæt på Cadarache, men Japan fik lov til at stå for 20 % af produktionsordrerne og forskerstillingerne til trods for, at Japan kun havde en andel på 10 % af projektet.

Alle forhandlingerne var færdige i 2006, hvor ITER-aftalen blev underskrevet. På det tidspunkt skulle ITER ca. koste €5.9 milliarder over en periode på ti år. Men i 2008 genovervejede man ITER's design og fastslog, at ITER vil koste tættere på €19 milliarder i løbet af de ti år. En af grundene til at prisen steg mere end tredobbelt var, at materialerne var steget betydeligt i pris. Prisen på cement var fx steget med 50%. I 2016 estimerede man, at den samlede pris af ITER er omkring €22 milliarder. ITER er måske en af verdens dyreste eksperimenter, men sammenlignet med udbyttet i det lange løb er prisen ubetydelig.

Bidrag i naturalier

Fordi forskellige landes økonomier er forskellige, og fordi prisen på materialer kan ændre sig meget i løbet af den tid, det tager at bygge en så stor maskine som ITER, blev det besluttet, at de forskellige landes bidrag skulle være i form af naturalier. Dette betyder, at landene skulle bidrage med bestemte komponenter, materialer og arbejdskraft til ITER i modsætning til at bidrage direkte med penge.

ITER-rådet fordelte ansvaret for disse elementer mellem medlemslandene i overensstemmelse med forhandlingerne. Ansvarsfordelingen var politisk. I stedet for at to lande fx havde ansvar for de toroidale feltspoler, så ville Kina, Euratom, Japan, Sydkorea, Rusland og USA alle levere dele til de toroidale feltspoler. Fra et ingeniørmæssigt synspunkt kommer dette med sine egne udfordringer, eftersom alle disse dele skal passe perfekt sammen, og det er nemmere at få to af sine egne designs til at passe sammen end at få et af sine designs til at passe med en anden persons design. Produktionen af komponenterne begyndte i 2008, og installationen af komponenterne blev påbegyndt i 2020.

Konstruktionen skrider fremad

I mellemtiden skrider konstruktionen af ITER fremad. I perioden 2007–2009 blev jorden ryddet og jævnet, og fra 2010–2014 blev fundamentet lagt. ITER's fundament har foranstaltninger mod jordskælv, hvilket hjælper ITER med at overleve et potentielt jordskælv med 40 gange større amplitude og 250 gange mere energi end det stærkeste jordskælv målt til dato i området nær ITER. Konstruktionen af hovedbygningen blev derefter påbegyndt med en deadline i 2021. Konstruktionen af sidebygningerne begyndte i 2010, hvor deadlineen også var i 2021.

Når konstruktionen er nået tilstrækkeligt langt, skal de mange forskellige elementer samles, og med tiden kan man tænde for ITER. Den store samlefase begyndte i marts 2020, og den nuværende plan er følgende: I 2023 skal installationen af den centrale solenoide begynde, og i 2024 vil den såkaldte kryostat (hovedkomponenten

i nedkølingen af de superledende magneter) stå samlet og blive lukket omkring maskinen. På dette tidspunkt vil den inderste del af ITER-torussen stå færdigbygget. I 2025 håber man at have det første plasma i ITER. Men bl.a. på grund af Coronaviruspandemien er ITER-projektet blevet forsinket, og der kommer en opdateret tidsplan i starten af 2024. På trods af dette, forventer man stadig, at i 2035 kan man begynde at eksperimentere med D-T-brændstof med en fusionseffekt på 500 MW med $Q=10$. Man regner med at forske og eksperimentere med dette indtil 2050.

Opgave 2.7

Man passerede en anden vigtig milepæl i 2012. Det år blev ITER godkendt til at fungere som en 'Basic Nuclear Installation' (løst oversat: En "basal atomreaktor"). Reaktionsprodukterne af D-T-reaktionen er helium-4 og en neutron. Ingen af disse er radioaktive.

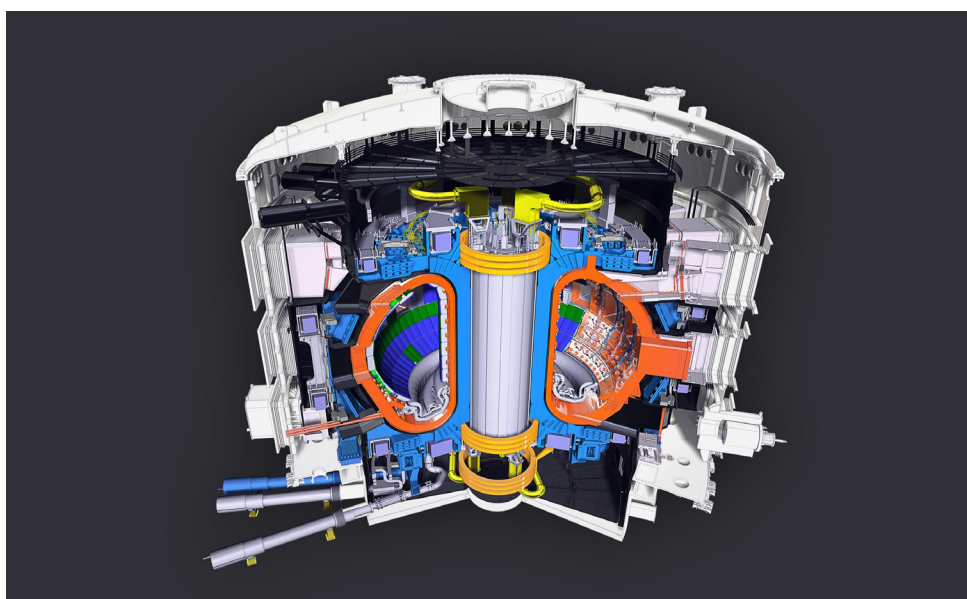
Hvorfor skulle ITER så godkendes ligesom fissionskraftværker, hvor radioaktivt affald er et problem?

ITER's målsætninger

Nu hvor vi har diskuteret ITER's tidslinje, så lad os snakke om, hvad vi håber at opnå med ITER.

ITER's primære målsætning er at opnå bedre resultater end videnskabelig break-even. Som nævnt tidligere var JET og TFTR designet i håbet om at opnå $Q = 1$.

Figur 2.14. En digital illustration af et tværsnit af ITER. Den orange del repræsenterer vakuumkammerets vægge. Kammeret har et volumen på 840 m³. ITER er en stor maskine og er placeret i en bygning, der er 73 m høj: Det er højere end Triumfbuen i Paris. Kilde: ITER Organization.



Derimod er ITER designet til at opnå $Q = 10$. Med 50 MW opvarmningseffekt håber man på at producere 500 MW fusionseffekt.

Men ITER er ikke et kraftværk og er ikke i stand til at omdanne fusionsenergi til elektricitet, som vi kan bruge. Dette vil først finde sted i tokamakken DEMO, som er designet til netop dette (se evt. modul 5). Det skal dog understreges, at når ITER opnår $Q > 1$, vil det være et gennembrud. Det vil være første gang, at man genererer mere energi, end man bruger i en tokamak. Plasmaet vil også opføre sig anderledes end plasmaet i tidligere tokamakter, og ITER vil derfor indeholde vigtig viden om plasmafysik og fusionsteknologi.

I mindre plasmaer er plasmaet opvarmet primært med ekstern opvarmning. Men som nævnt tidligere kan alfapartiklerne, som produceres i fusionsreaktionerne, hjælpe med at opvarme plasmaet. Når ITER opnår Q en del større end 1, så vil plasmaet hovedsageligt være opvarmet af alfapartiklerne. **Hvordan alfapartiklerne påvirker plasmaets opførsel**, er et emne, der ikke vides særlig meget om endnu. At undersøge dette er også et af ITER's formål. ITER skal især også bruges til at forstå, **hvordan instabiliteter i plasmaet opstår**, og hvordan de kan **kontrolleres** under omstændighederne i ITER – dette er essentielt at vide mere om.

Udover plasmaets egenskaber vil ITER være en af de første steder, hvor man kan teste materialerne i bestemte komponenter og se, hvordan de opfører sig under omstændigheder, der minder om et fusionskraftværk. Af disse komponenter er især den såkaldte **divertor**, **first wall** (væggen i tokamakken tættest på plasmaet) og **tritium breeding blanket** værd at nævne. Disse komponenter undersøges nærmere i modul 4.

Det er især vigtigt at få testet det såkaldte tritium breeding blanket. Denne komponent skal producere tritium i ITER vha. neutronerne fra fusionsreaktionerne og er aldrig blevet testet før.

Det er vigtigt at kunne producere tritium, fordi tritium ikke findes i naturen, så vi skal lave vores eget – og endnu bedre hvis produktionen finder sted tæt på reaktoren!

ITER's sidste store målsætning er at vise, at **fusion er en praktisk mulig energikilde**. Fusionsforskere ved, at en fusionsreaktor og i forlængelse et fusionskraftværk ikke skader klimaet, når det producerer energi, og dette kommer ITER til at demonstrere. Dette er et vigtigt skridt på vejen til fusion. Jo mere vi ved om fusion jo bedre, men den forestilling, som gennemsnitlige mennesker har om fusion, er også væsentlig. Selvom fusion virker hensigtsmæssigt, så kommer man ikke til at bygge et fusionskraftværk, hvis folk tror, at fusion er ufordelagtigt. Ved at arbejde hen mod alle disse målsætninger vil ITER hæve niveauet for fusionsforskning både teoretisk, eksperimentelt og samfundsmæssigt.

Opsummering

I dette modul har vi undersøgt historien bag fusion. Fra opdagelsen af fusionsreaktioner som Solens energikilde til de første forsøg på at lave fusionsreaktorer her på Jorden. Fra de forskellige designs, som folk har fundet på, til pessimismen og overbevisningen, at ingen af dem ville virke. Fra fusionsreaktorer, der kunne stå på et bord, til ITER, som er næsten 30 m høj. Vi har diskuteret de forskellige udfordringer og rekorder, som er blevet opnået. Udfordringerne har været baseret på både fysik – fx hvordan man kan løse problemer med plasmadrift – og på politik – fx lange forhandlinger, om hvor man skal bygge en fusionsreaktor. Vi har kortlagt, hvordan fusion startede, og hvor vi står nu.

Men hvad med fremtiden? I løbet af ITER's levetid vil man passere vigtige milepæle indenfor fusionsforskning. Der kommer til at være adskillige øjeblikke, der kan være med til at afgøre, hvor vejen til fusion ender henne. Hvis man løser alle udfordringerne, så er fremtiden for fusion uden tvivl en lovende en. ITER kommer til at være et vigtigt skridt på vejen. Efter ITER er der stadig adskillige udfordringer, vi skal løse, som bestemt ikke kun er relateret til fysik. Hvis du er interesseret i

fremtiden for fusion, så kan du tage et kig på modul 5. Hvis du vil lære mere om, hvordan fusionsreaktorer fungerer, så kan modul 3 og 4 være nyttige.

Yderligere læsning

Andre moduler

FuseNet har i alt udviklet fem moduler, som kigger på fusion fra forskellige vinkler. Besøg hjemmesiden nedenfor for at se de fire andre moduler, der handler om (1) Introduktion til fusion, (3) Plasmakontrol, (4) Fusionsmaterialer og (5) Implementering.

De kan findes på FuseNets' 'educational materials browser' på <https://fuset.net/education/material>

Onlineresurser

Hvis du gerne vil lære mere om teknologierne og koncepterne, som vi har diskuteret i dette modul, kan du besøge følgende links:

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.

https://www.youtube.com/watch?v=0hyEtr_EhVU.

Historien bag fusion fortalt af en fusionsforsker, som personligt var en del af historien.

<https://www.iter.org>. ITER's officielle hjemmeside. Tidslinjen og status på ITER kan findes her samt information om fusionsforskning generelt. Der er også en 'virtual tour'.

https://www2.ipp.mpg.de/ippcms/eng/externe_daten_en/panoramaw7x/. En 'virtual tour' af W7-X.

https://www.ipp.mpg.de/1727365/zeitraffer_w7x. Et kort klip om konstruktionen af W7-X.

<https://www.iter.org/newsline/-/3033>. En artikel om genbrug af fusionsmaskiner.

<https://www.iter.org/newsline/-/932>. En artikel om hvordan teknologier udviklet til ITER også bruges til at lave komponenter til fly.

Kolofon

'Vejen til fusion' er det andet 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
Arno Claassen

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
Nomen nescio/ITER Organization

Forlag
FuseNet

Finansiell 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.

