

Hvor står fusionsforskningen i dag?

Vagn O. Jensen, seniorkonsulent i Afdelingen for Optik og Plasmaforskning, Forskningscenter Risø

Fusionsforskningen har udviklet sig til et af menneskehedens største forskningsprojekter. Store resultater er opnået, men det må erkendes, at det vil tage op mod 40 år, før fusionsenergien kan bidrage væsentligt til dækning af det globale forbrug. I de kommende 10-15 år vil fusionsreaktoren ITER blive bygget i Frankrig og bane vejen for udnyttelsen af fusionsenergien.

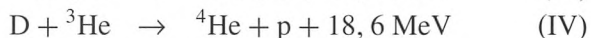
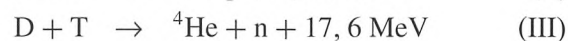
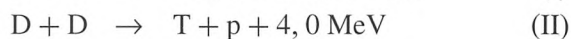
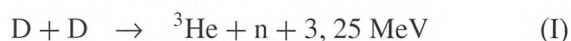
Når de fossile energikilder er opbrugte, eller når miljøhensyn forbyder fortsat stort brug af dem, så vil der blive stort behov for enten vedvarende kilder (se KVANT nr. 1, 2004), atomkraft eller kontrolleret fusion. Denne artikel er en statusrapport fra fusionsforskningen.

Først for ca. 75 år siden blev fysikere klar over, at de store energimængder, Solen udsender, stammer fra fusionsprocesser. I sin artikel *Modern Alchemy* i Scientific American, juni 1932 nævner W.D. Harkins muligheden for, at fusion vil kunne erstatte kul som energikilde, men han konkluderer, "there is no indication at present that it will ever give a source of energy for industrial purpose under the conditions existent on earth."

Det var først i 1950'erne, at man begyndte at tro, at fusionsenergien kunne udvikles til en betydningsfuld energikilde. Mange lande gik i gang med fusionsforskning, og et omfattende internationalt samarbejde blev etableret. Optimismen var så stor, at den amerikanske fysiker M.N. Rosenbluth kunne afslutte sin tale ved den første konference om *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* i 1961 med ordene "If I may make a statement from the heart, I believe that chances are very good that in twenty years or so mankind will have solved the problem of controlled fusion if only he has not lost in the meantime the far more difficult struggle against uncontrolled fusion".

Termonuklear fusion

Alle atomkerner med massetal op til ca. 50 kan udvikle energi ved fusion. De letteste afgiver op til omkring 5 MeV pr. nukleon, de tungere væsentligt mindre. I unge stjerner er det mest lette kerner, der fusionerer, medens det i ældre stjerner er tungere kerner, der står for energiproduktionen. De fusionsprocesser, der har mest interesse for fusionsforskningen, er:



D står for den tunge brintisotop, deuterium, med en proton og en neutron i kernen. T er den supertunge brintisotop, tritium, med én proton og to neutroner i kernen. p og n er hhv. en proton og en neutron. ${}^3\text{He}$

og ${}^4\text{He}$ er de to stabile heliumkerner med to protoner og hhv. én og to neutroner i kernen. ${}^4\text{He}$ kaldes også en α -partikel. Den dannede energi optræder som kinetisk energi på de to nye partikler, hver får en del, der er proportional med den anden partikels masse. F.eks. har neutronen i (III) 14,1 MeV, og α -partiklen 3,5 MeV.

Boks 1: Den globale fusionsforskning

Lige siden sin start i midten af 1950'erne har den internationale fusionsforskning været præget af stor åbenhed. Den lange tidshorisont og de mange komplicerede problemer, der skulle løses, gjorde det klart, at et tæt samarbejde ville være til alles fordel. Derfor er nye resultater blevet fremlagt og diskuteret åbent ved konferencer, og forskere fra forskellige lande har besøgt og hjulpet hinanden. Fra en beskedent start er det globale årsbudget for fusionsforskningen nu over 10 milliarder danske kroner. Hovedindsatsen har ligget i de fire områder: Europa (EU-landene og Schweiz), Japan, Rusland og USA. Gennem de senere år har også Kina og Sydkorea startet væsentlige programmer, bl.a. er de nu partnere i ITER-projektet. Det er interessant at sammenligne fusionsforskningens årsbudget på ca. 10 milliarder kr. med det beløb på ca. 20.000 milliarder kr. om året, som den samlede menneskehed bruger til energi. Det er altså ca. 0,05 % af de samlede energiudgifter, der går til forskning i denne potentielle nye energikilde.

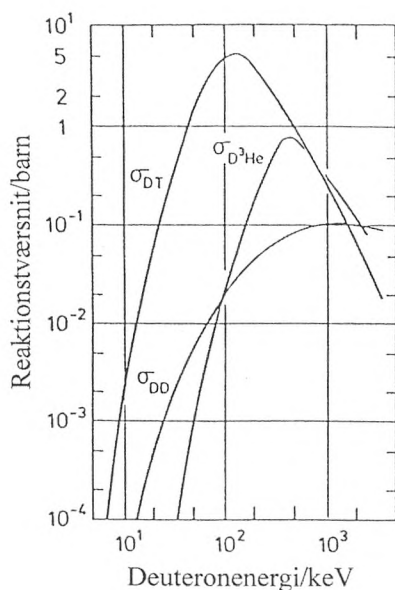
Den europæiske fusionsforskning er administreret og delvis betalt af EU, og den har i øjeblikket et årsbudget på noget over 3,5 milliarder kr. Hovedparten af arbejdet foregår på nationale laboratorier, som har associeringskontrakter med EU, som karakteristisk betaler 1/3 af omkostningerne. Ved siden af de nationale laboratorier udfører EU også fusionsforskning på egne laboratorier. JET er et fællesprojekt mellem EU og de lande, der er partnere i EU-programmet.

Fordelen ved den europæiske ordning er, dels at EU-bidraget støtter de nationale laboratoriers interesse for at forske i fusion, og dels at EU via sit bidrag har så megen indflydelse på de nationale programmer, at disse nu udgør et sammenhængende europæisk program, der dækker alle fusionsforskningens påtrængende problemer uden unødvendig overlappning. Ordningen har medført, at det europæiske program anses for at være effektivt og på mange områder førende i forhold til de andre landes programmer.

Risø's fusionsprogram er den danske partner i det europæiske program.

Der er tre grunde til, at de fire processer (I)-(IV) er mest interessante: 1) deres energiudbytte er relativt stort, 2) de forløber lettere end andre processer, og 3) brændstoffet til disse processer findes i store mængder.

For at fusionere må kernerne bringes meget tæt sammen ($\sim 2 \cdot 10^{-14}$ m). Da de har positiv elektrisk ladning, frastøder de hinanden med Coulomb-kræfter, så det er svært at få dem tæt sammen. Tværnittene på figur 1 for processerne (I)-(IV) er målt ved at accelerere deuteroner til energier mellem 0,5 og 500 keV og skyde dem mod hvilende D-, T-, og ^3He -kerner. Da D + T-processen har de største tværsnit, forløber den lettest og er derfor den mest interessante.



Figur 1. Tværsnit for udvalgte fusionsprocesser. (1 barn = 10^{-28} m²). σ_{DD} -kurven repræsenterer summen af de to lige store tværsnit for processerne (I) og (II).

Den mest nærliggende – men desværre urealistiske – måde at udvinde fusionsenergi på, ville være at accelerere deuteroner til ca. 100 keV og skyde dem mod et fast tritiumtarget. Men de fleste deuteroner vil tabe deres energi ved Coulomb-kollisioner med targetkernerne, så denne metode fører ikke til energigevinst.

Fusionsreaktorer vil komme til at arbejde efter det såkaldte termonukleare princip. I en termonuklear reaktor opvarmes en blanding af deuterium og tritium så meget, at partiklernes termiske hastigheder er store nok til at forårsage fusionsprocesser. Derfor skal en passende del af partiklerne have termiske energier omkring 100 keV, hvilket kræver temperaturer omkring 100 MK. I en så varm fusionsgas vil der også ske mange Coulomb-kollisioner med energiudveksling mellem partiklerne. Men da kollisioner ikke fjerner energi fra gassen, sænker de ikke temperaturen og hindrer derfor ikke processerne. Ved disse høje temperaturer befinder brændstoffblandingen sig i plasmatilstanden

¹Inden for fusionsforskningen måles temperaturer ofte i energienheder, idet $T_{\text{kin}} = kT$, hvor k er Boltzmanns konstant. $T_{\text{kin}} = 10$ keV svarer til $T = 116$ MK.

– hvor atomerne er slået i stykker i negativt ladede elektroner og positive kerner, der bevæger sig frit rundt.

Af tekniske grunde må reaktorkammeret i et fusionskraftværk forventes at producere en effekttæthed i samme størrelse som i ovnen i et almindeligt kraftværk, altså omkring 1 MW/m³. Effekttæthed i et fusionsplasma kan beregnes som funktion af temperatur og plasmatæthed ud fra tværnittene på figur 1. Man finder, at tætheden i et plasma med en kinetisk temperatur¹, T_{kin} , på 10 keV, svarende til godt 100 MK, der producerer 1 MW/m³, skal være ca. 10^{20} ioner/m³. Det svarer til tætheden i et middelt godt vakuum. På grund af den høje temperatur er trykket alligevel relativt stort, omkring 3 atm.

Antænding og opretholdelse af fusionsforbrænding

Forløbet af processerne i en fusionsreaktor kommer til at minde om en almindelig forbrænding, hvor kulstof og ilt forbindes til CO₂. Forbrændingen i et kulstofkraftværk kræver også, at partiklerne kolliderer med en vis energi, omkring 1 eV, som jo er meget mindre end de ca. 100 keV, der kræves for fusion. Kollisionerne forårsages også af termiske bevægelser, men den nødvendige temperatur er kun få hundrede grader. Ved hver proces dannes der energi. Hvis tilstrækkeligt meget af denne energi afsættes i brændstoffet, kan den nødvendige temperatur opretholdes, og forbrændingen fortsætter af sig selv. Forbrændingen er antændt. Hvis der ikke afsættes tilstrækkelig energi i brændstoffet, eller hvis varmetabene er for store som f.eks., hvis brændstoffet er vådt, så vil forbrændingen gløde en vis tid og derefter gå ud. Forbrændingen kan så kun opretholdes, hvis der tilføres supplerende energi udefra, f.eks. fra en blæselampe. I et fusionsplasma er forholdene analoge, blot skal plasmaet holdes indesluttet i et magnetfelt (se senere). Da det kun er de i fusionsprocessen dannede α -partikler, der holdes indesluttet, er det kun de 20 % af fusionseffekten, som de bærer, der afsættes som varme i plasmaet. Neutronernes 80 % afsættes i afskærmningen omkring plasmaet.

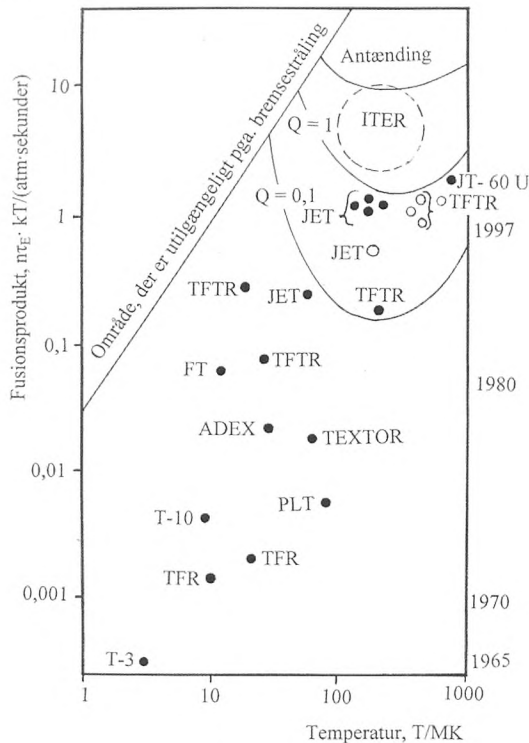
For at vurdere, om antænding i et fusionsplasma kan opnås, eller hvor meget supplerende energi der skal tilføres plasmaet for at opretholde forbrændingen, må energitabene kendes. Et fusionsplasma taber energi på forskellige måder. Når en elektron, der farer rundt i sin termiske bevægelse, kommer nær en ion, udsættes den for en kraftig acceleration og udstråler derfor elektromagnetisk stråling i form af bremsestråling. Bremsestrålingstabene er uundgåelige; hvis de er de eneste tab fra et D+T-fusionsplasma, så kan vi opnå antænding i temperaturområdet mellem 50 MK og ca. 10 GK.

Et fusionsplasma i et magnetfelt vil imidlertid tabe energi på andre måder end ved bremsestråling. F.eks. kan ladede partikler diffundere gennem magnetfeltet og afgive deres energi til den omliggende beholder. Også konvektion og turbulens kan føre energi ud til væggene.

Energiforstærkningsfaktoren Q defineres som forholdet mellem den dannede fusionseffektthæthed, P_{fus} , og den effektthæthed, P_{eks} , der eksternt må tilføres plasmaet for at opretholde forbrændingen, altså

$$Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{eks}}. \quad (1)$$

For et antændt plasma er $Q = \infty$, idet $P_{\text{eks}} \rightarrow 0$ når der ikke er behov for tilførsel af eksternt energi. Situationen $Q = 1$ kaldes "break-even", da hele fusionseffekten skal føres tilbage i plasmaet for at holde det brændende.



Figur 2. Udviklingen i opnåede resultater for temperaturer og fusionsprodukter i fusionseksperimenter gennem de sidste 40 år. Ved de enkelte punkter er angivet, i hvilket eksperiment resultatet er opnået. De lukkede punkter, hvoraf de fleste ligger nederst til venstre, er opnået i deuteriumplasmaer og har derfor ikke givet nævneværdige fusionsreaktioner. De åbne cirkler øverst til højre er opnået i D+T-plasmaer, og det er dem, der har givet de op til 16 MW fusionseffekt. Årstellene til højre antyder, hvornår de forskellige resultater er opnået. Cirklen med ITER øverst på tegningen viser, hvor ITER er designet til at arbejde.

I figur 2 er indtegnet forskellige Q -værdier i et diagram over tidligere fusionseksperimenter med det såkaldte fusionsprodukt, $n\tau_E \cdot kT$ – her målt i atm · sekunder – som funktion af temperaturen.

Hvis vi kun medregner bremsestrålingstabene for et 10 keV fusionsplasma med $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$, så er energiindeslutningstiden $\tau_E \approx 10$ sek, som altså er den absolut længste tid, der kan opnås. Hittidige forsøg har vist, at det er svært at opnå blot ét sekund.

For at opnå et antændt fusionsplasma skal man kunne opvarme det til over 100 MK og holde det så effektivt indesluttet, at fusionsproduktet ligger tæt ved 10 atm · sekunder. Man skal opnå eksperimentelle

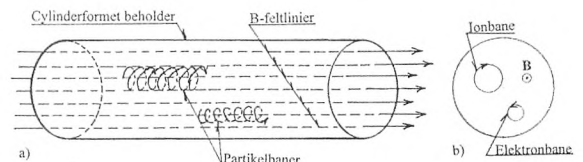
værdier, der ligger over kurven mærket "Antænding". For at opnå en forstærkning af den energi, man udefra tilfører plasmaet, skal man ligge mellem de to kurver, "Antænding" og " $Q = 1$ ". Jo nærmere man ligger på Antænding, jo større er forstærkningsfaktoren Q . De uundgåelige bremsestrålingstab gør det umuligt at opnå værdier over "Område, der er utilgængeligt pga. bremsestråling". De to betingelser om henholdsvis høj temperatur og højt fusionsprodukt, der skal tilfredsstilles for at få en brugbar energigevinst fra et fusionsplasma, kaldes Lawson-kriteriet.

Magnetisk indeslutning

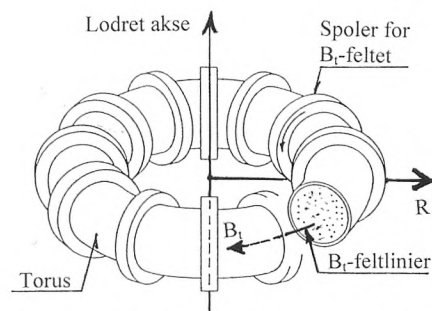
Muligheden for at holde et fusionsplasma indesluttet i et magnetfelt beror på, at det består af elektrisk ladede partikler. En ladet partikel, der bevæger sig i et homogent magnetisk \mathbf{B} -felt, følger en skrueformet bane, hvis akse er parallel med de rette magnetfeltlinier. I sin bevægelse vinkelret på feltlinierne følger en partikel med massen m , ladningen q og hastigheden v_{\perp} en cirkelformet bane med radius

$$\rho = mv_{\perp}/qB. \quad (2)$$

På figur 3 er vist en cylinderformet beholder med akse parallel med feltlinierne, som så skærer endevæggene. Det ses, at partiklerne midt i beholderen holdes borte fra sidevæggen, medens de i deres bevægelse langs feltlinierne rammer endevæggene. Da væggene i en beholder i et homogent magnetfelt nødvendigvis må skæres af feltlinierne, er et homogent felt ikke løsningen for magnetisk indeslutning af et fusionsplasma.



Figur 3. a) I et homogent magnetfelt bevæger ladede partikler sig i skrueformede baner langs feltlinierne. b) Set mod feltlinierne roterer ionerne med uret og elektronerne mod uret.



Figur 4. Magnetfeltet i en simpel torus. Feltlinierne er vandretliggende cirkler med deres centre liggende på den lodrette akse.

En nærliggende løsning er at bøje cylinderen sammen til en lukket ring, en torus, som på figur 4. Magnetfeltlinierne løber som lukkede cirkler rundt i den

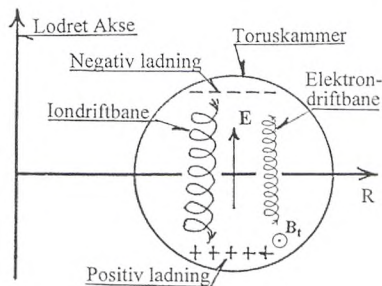
toroidale retning, og feltet kaldes derfor et B_t -felt. Da feltlinierne ikke skærer væggene, vil vi forvente, at et ringformet plasma i torus vil kunne holdes indesluttet i dette felt. Forsøg allerede i slutningen af 1950'erne viste, at det ikke er tilfældet. Plasmaringen, som har en iboende tendens til at udvide sig, finder en måde at bevæge sig gennem B_t -feltet ud mod væggen. Simple fysiske argumenter skal nu vise, at denne bevægelse må ventes, og hvilke ændringer i feltet, der må forventes at afhjælpe problemet.

Den væsentligste grund til, at ringen kan udvide sig, er, at B_t -feltet er inhomogent og aftager med afstanden R fra midteraksen. Det er dannet af strømmen i de toroidale spoler og givet ved

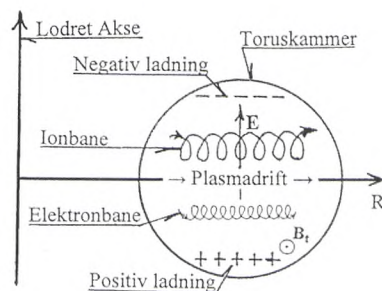
$$B_t = \mu_0 I / 2\pi R. \quad (3)$$

I er summen af strømmene i spolerne, μ_0 er vakuumpempeabiliteten, og R er afstanden fra den lodrette akse til et punkt i torus. $R = R_0$ midt i plasmaringen.

Betragter vi en ladet partikel i et plan, som indeholder den lodrette midterakse, og som følger partiklen rundt i den toroidale retning, forløber dens bane som vist på figur 5. Banen for en positiv ion, der roterer med uret, vil ifølge (2) have en større krumningsradius, når den er langt fra den lodrette midterakse, og en mindre krumningsradius, når den er nær denne akse. Derfor driver alle ioner nedad, hvorved der dannes positiv rumladning nederst i plasmaringen. Elektronerne, der roterer mod uret, har også større krumningsradier, når de er fjernest fra den lodrette akse, og de driver derfor opad, hvorved der dannes negativ rumladning øverst i plasmaringen. Resultatet er, at der opstår et opadrettet elektrisk E-felt fra den positive til den negative rumladning.



Figur 5. Driftbevægelser i et lodret snit gennem et simpelt toroidalt felt med feltlinierne pegende ud fra papirets plan.



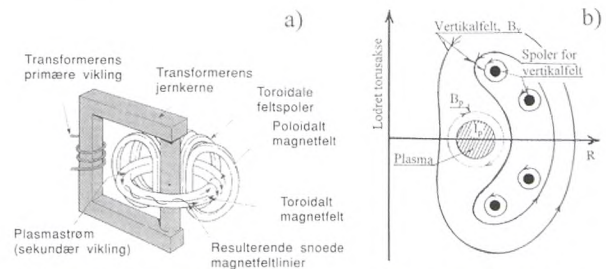
Figur 6. Driftbevægelser, der skyldes det opbyggede elektriske felt, i et lodret snit gennem et simpelt toroidalt felt.

Figur 6 viser dette E-felts virkning på partiklerne. Feltet påvirker de positive partikler opad, så de bevæger sig hurtigere øverst i deres baner og langsommere nederst. Ifølge (2) har de derfor større krumningsradius øverst i banerne end nederst, og de driver udad. Elektronerne påvirkes nedad af det elektriske felt, og de vil derfor have deres største hastigheder og dermed de største krumningsradier, når de er nederst i banen. Det betyder, at også de vil drive udad i R -retningen. Plasmaet er ikke i ligevægt. Det driver samlet ud i det svage magnetfelt og rammer torusvæggen.

Tokamakken

Ovenfor så vi, hvordan et plasma i et inhomogent magnetfelt finder en måde at bevæge sig vinkelret på feltlinierne ud i det svagere felt. Generelt vil et plasma kun kunne holdes indesluttet og være i ligevægt i et magnetfelt, hvis feltstyrken vokser i alle retninger bort fra plasmaet, dvs. hvis plasmaet befinder sig i en såkaldt "magnetisk dal". Sådanne felter kan opnås på forskellige måder i toroidale konfigurationer. Tokamakken er en russisk idé fra 1960'erne med denne egenskab.

I en tokamak opnås den ønskede feltkonfiguration ved at addere yderligere to felter til det rent toroidale felt, som det fremgår af principtegningen på figur 7. På a) ses en række toroidalfeltspoler, der er lagt om en torusformet beholder, som for overskuelighedens skyld ikke er vist. Disse spoler genererer B_t -feltet med sine cirkelformede feltlinier. Plasmaet ligger som en lukket ring i torus og udgør sekundærviklingen på en transformer, hvis jernkerne er stukket ned gennem torus. En strøm gennem primærviklingen genererer en plasmastrøm, I_p , som løber i den toroidale retning. I_p genererer et polært magnetfelt, B_p , hvis feltlinier løber rundt om plasmaringen i lukkede kurver. Summen af B_t - og B_p -felterne er et felt, hvis feltlinier snor sig som skrueinier rundt i plasmaet. Feltstyrken i denne konfiguration har stadig den egenskab, at feltet svækkes i R -retningen, og den kan derfor heller ikke holde plasmaet indesluttet.



Figur 7. Tokamakprincippet. a) Hovedprincippet: Plasmaringen udgør sekundærviklingen i en transformer. Spolerne for det vertikale felt er ikke vist her. b) Magnetfeltforløbet i et lodret snit. Her vises fire vertikalfeltspoler.

For at opnå, at den magnetiske feltstyrke også vokser fra plasmaringens midterlinie ved $R = R_0$ ud mod større R -værdier, er der indlagt nogle vertikalfeltspoler, som ikke er vist på a). b) viser et lodret snit gennem torusaksen. Plasmaringens tværsnit har centrum ved

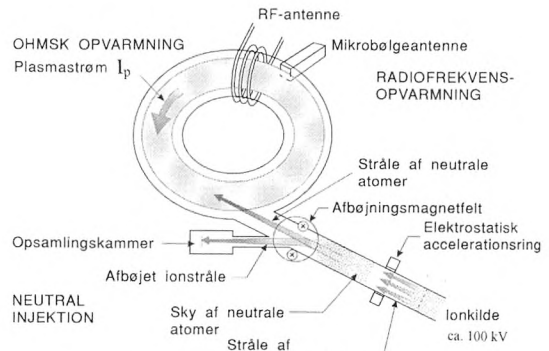
$R = R_o$, og plasmastrømmen løber ind i papirets plan. De poloidale feltlinier løber rundt om plasmaringen, opad på indersiden og nedad på ydersiden. På b) vises også fire vertikalfeltspoler, der ligger som vandrette ringe symmetrisk om den lodrette akse. Disse spoler fører strømme i modsat retning af I_p , altså ud fra papirets plan, og de genererer et vertikalt magnetfelt, B_v , med nyreformede feltlinier, der løber ned gennem plasmaet. På indersiden af plasmaringen for $R < R_o$ er B_p og B_v modsatrettede, så deres resulterende felt bliver svagere her. På ydersiden for $R > R_o$, hvor begge felter er nedadrettet, bliver det resulterende felt stærkt. Enten vi bevæger os udad eller indad fra R_o , vil det resulterende felt vokse. Plasmaet ligger i en magnetisk dal og kan holdes indesluttet.

At et plasma befinder sig i en magnetisk dal, er imidlertid kun en nødvendig men ikke tilstrækkelig betingelse for, at det holdes indesluttet. I plasmaer i magnetfelter er der stærke tendenser til, at der opstår instabiliteter, som ødelægger eller nedsætter indeslutningen. Instabiliteter kan have form af bølger på overfladen, som vokser sig så store, at plasmaet rammer væggen. Der kan også opstå mikroinstabiliteter, hvor meget kortbølgede og hurtige svingninger vokser sig store og ryster plasmaet, så dets partikler og dermed energi hurtigt diffunderer ud til væggene. Hovedindsatsen gennem de sidste 50 års fusionsforskning har ligget på at konstruere de bedst mulige magnetfelter, både hvad angår ligevægt i magnetiske dale og undertrykkelse af de forskellige instabiliteter. De første tokamakeksperimenter omkring 1970 viste, at ligevægt kunne opnås, men at instabiliteter forhindrede tilstrækkelig indeslutning til blot at nærme sig Lawson-kriteriets krav. Større og mere komplicerede eksperimenter gennem de sidste 30 år har opnået bedre og bedre resultater i retning af at kunne opfylde dette krav.

De tangenter, man har at spille på, er først og fremmest plasmavolumenet. Energiindholdet i plasmaet er E_{kin} ganget med volumenet, altså proportionalt med den lineære målestok i tredje potens, medens de samlede tab er proportionale med overfladearealet, altså med målestokken i anden potens. Vi forventer derfor at opnå højere τ_E -værdier blot ved at forøge plasmavolumenet, hvilket også er eksperimentelt påvist. Andre parametre, der har indflydelse på energiindeslutningen, er plasmatværsnittets form, plasmastrømmens størrelse og fordeling over tværsnittet, det relative forhold mellem magnetfeltets tre komponenter o.m.a. De resultater, der er opnået, repræsenterer et langt og intenst samarbejde mellem teoretikere og eksperimentalfysikere fra mange lande.

Opvarmning af fusionsplasma

Som nævnt skal et fusionsplasma opvarmes til 100 MK, før processerne går rigtigt i gang, og det kan være nødvendigt med supplerende opvarmning for at opretholde forbrændingen. De tre mest benyttede metoder til opvarmning af tokamakplasmaer ses på figur 8.



Figur 8. De tre mest anvendte metoder til opvarmning af et plasma i tokamakker er *Ohmsk Opvarmning*, *Højfrekvensopvarmning* og *Neutral Injektion*.

Boks 2: Tre metoder til opvarmning af plasma

Ohmsk Opvarmning. Denne metode udnytter, at plasmastrømmen I_p afsætter en varmeeffekt i plasmaet, som er givet ved produktet af plasmaets specifikke modstand og I_p^2 . Da den specifikke modstand falder med temperaturen, afsættes der mindre og mindre effekt, efterhånden som temperaturen stiger. Dette kan ikke kompenseres ved at forøge I_p , da det vil medføre instabiliteter, der ødelægger indeslutningen. I praksis kan man kun opnå ca. 10 MK ved Ohmsk opvarmning. Der er derfor brug for mindst én af de andre metoder til supplerende opvarmning.

Højfrekvensopvarmning. Denne metode udnytter, at de ladede plasmapartikler roterer omkring magnetfeltlinierne med frekvenser, der afhænger af feltstyrken og af partiklernes masse. Elektronerne roterer hurtigt, ioner langsommere. Hvis plasmaet bestråles med elektromagnetiske bølger, hvis frekvens er i resonans med partiklernes rotationsfrekvens, absorberer det energi fra bølgen og opvarmes. I karakteristiske eksperimenter er radiobølger i frekvensområdet 10-100 MHz i resonans med ionerne. Mikrobølger i området 20-200 GHz er i resonans med elektronerne. Højfrekvensopvarmning er en meget benyttet metode, f.eks. er JET udstyret med højfrekvensudstyr, der kan levere ca. 25 MW til plasmaet. JET, som er verdens største tokamak, er et fællesprojekt under det europæiske fusionsprogram, som ligger nær Oxford i England.

Neutral Injektion. Her opvarmes plasmaet ved, at det bombarderes udefra med meget hurtige, energirige neutrale partikler. Partiklerne skal være elektrisk neutrale for at trænge gennem magnetfeltet og ind i plasmaet. I plasmaet ioniseres de ved stød mod plasmaets partikler og indfanges dermed i magnetfeltet. I efterfølgende stød afgiver de deres energi til plasmaet, som opvarmes. Strålen af hurtige neutrale partikler opnås som vist på figur 8. Ionkilden er fyldt med en gas af de partikler, f.eks. deuteroner, der ønskes i strålen. I ionkilden dannes positive ioner af den slags, f.eks. deuteroner, som ønskes i strålen. De trænger ud i et rør, hvor de accelereres elektrostatisk til ca. 100 keV. De fleste ioner indfanger en elektron i en sky af neutrale atomer og kan så fortsætte ind i plasmaet. Et afbøjningsmagnetfelt bøjer de resterende ioner ud i et opsamlingskammer. Neutral Injektion er meget effektiv. JET er forsynet med opvarmningsenheder, der kan afsætte op mod 25 MW varmeeffekt i plasmaet.

Boks 3: Risøs fusionsforskning

Allerede ved sin start i 1958 oprettede Risø en lille gruppe, der skulle holde sig orienteret om og selv yde bidrag til den internationale fusionsforskning. De første arbejder var beregninger af reaktionshastigheder og energibalancer i fusionsplasmaer. Omkring 1960 blev interessen rettet mod bølgefænomener i plasmaer, og der blev bygget et eksperiment til studier af kolliderende chokbølger, som senere blev suppleret med et roterende plasmaeksperiment. Hen mod midten af 1960'erne forlod to førende medlemmer af gruppen Risø, og hele gruppens fortsatte eksistens blev taget op til vurdering. Det blev besluttet at forstærke indsatsen, og der blev ansat en udenlandsk seniorplasmafysiker, som bragte nyt liv i gruppen bl.a. ved at initiere opbygningen af Risøs Q -maskine. En Q -maskine er et eksperiment med en rolig (Q står for quiescent) plasmasøjle, der holdes indesluttet i et magnetfelt, og som er særdeles velegnet til studier af bølgefænomener og instabiliteter i plasmaer.

Med Danmarks indtræden i EF i 1973 blev Risøs fusionsforskning tilsluttet det fælleseuropæiske fusionsprogram gennem en associeringskontrakt mellem Risø og EFs fusionsprogram, og arbejdet blev indpasset i dette store program.

Gruppen blev opfordret til at udvikle systemer, der kunne accelerere frosne brændstoffiller af deuterium til så høje hastigheder, at de kunne trænge ind i et fusionsplasma. Dette arbejde førte i løbet af 1980'erne til konstruktion af injektorer, der kunne accelerere piller til hastigheder op mod 2 km/s. Risøs pilleinjektorer bruges stadig i flere eksperimenter inden for det europæiske program.

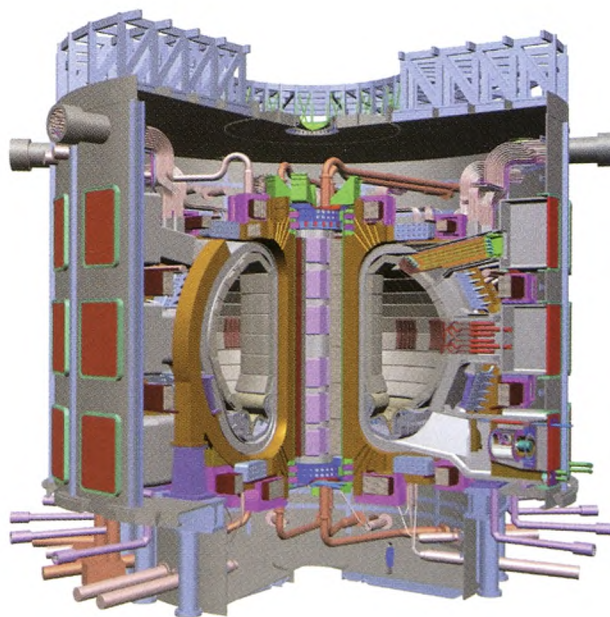
I slutningen af 1970'erne indgik Risøgruppen en kontrakt med JET om, at den skulle opbygge et måleudstyr baseret på Thomsonspreddning til måling af temperaturen i JET-plasmaet. Udstyret blev leveret, og den Risø-medarbejder, der havde stået for opbygningen, flyttede til JET for at benytte udstyret.

Omkring 1990 gennemførte Risø en større omstrukturering, som medførte en beslutning om at nedtrappe fusionsforskningen. Arbejdet med Q -maskinen og med udvikling af pilleinjektorer blev opgivet. Kun en mindre indsats inden for teoretiske studier af plasmaindeslutning blev opretholdt. Samtidigt blev en del af Risøs arbejde med neutronstrålingsbeskadigelse af materialer, der skal indgå i strukturen omkring et fusionsplasma, lagt under associeringen. Gennem de sidste ca. 5 år har Risøs interesse for fusionsforskning igen været stigende, og gruppen har haft muligheder for visse udvidelser, således at den nu består af ca. 15 forskere med et årsbudget på godt 20 millioner kr. Programmet har tre hovedelementer:

1. En fortsættelse af de teoretiske studier af instabiliteter i magnetisk indesluttede plasmaer, som nedsætter indeslutningseffektiviteten. Dette arbejde udføres i tæt samarbejde med andre europæiske laboratorier, bl.a. med JET.
2. Udvikling af et CTS-udstyr (Collective Thomson Scattering) til måling af ioners, bl.a. α -partiklers, hastighedsfordeling i fusionsplasmaer. Sådanne målinger kan få stor betydning for studiet af magnetisk indeslutning af brændende plasmaer som f.eks. i ITER. Gruppen udfører allerede målinger på store eksperimenter i andre europæiske laboratorier, og den er leder af planlægningen af et CTS-udstyr for ITER.
3. Arbejdet med neutronbestråling af materialer til reaktorstrukturer er under nedtrapping.

Forskningens status og planer, ITER

Figur 2, der viser betingelserne for at opfylde Lawson-kriteriet, viser også udviklingen i opnåede resultater. Omkring 1980 var der kun opnået temperaturer på ca. 10 MK og fusionsprodukter, der var tre størrelsesordener under kravet for antænding. Ved brug af de nye opvarmningsmetoder, først og fremmest neutral injektion, nåede man midt i 1980'erne de 100 MK. Udviklingen i de opnåede fusionsprodukter har været jævn, og med de nyeste resultater, fra bl.a. JET, ligger vi nu tæt ved break-even. Denne markante udvikling svarer til en fordobling af indeslutningseffektiviteten hvert 1,5 år siden 1970. I slutningen af 1980'erne havde fusionsforskerne samlet viden nok til, at de kunne designe og derefter bygge en tokamak med en opretholdt forbrænding med en Q -værdi på mindst 10. På initiativ af USAs præsident Reagan og USSR's Gorbatsjov i 1985 blev der i 1992 nedsat en forskergruppe med medlemmer fra EU, Japan, USA og USSR, som skulle designe en sådan tokamak, som fik navnet ITER. ITER er akronym for **I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor; men det betyder 'vej' på latin, så ITER er vejen til fusionsenergien.



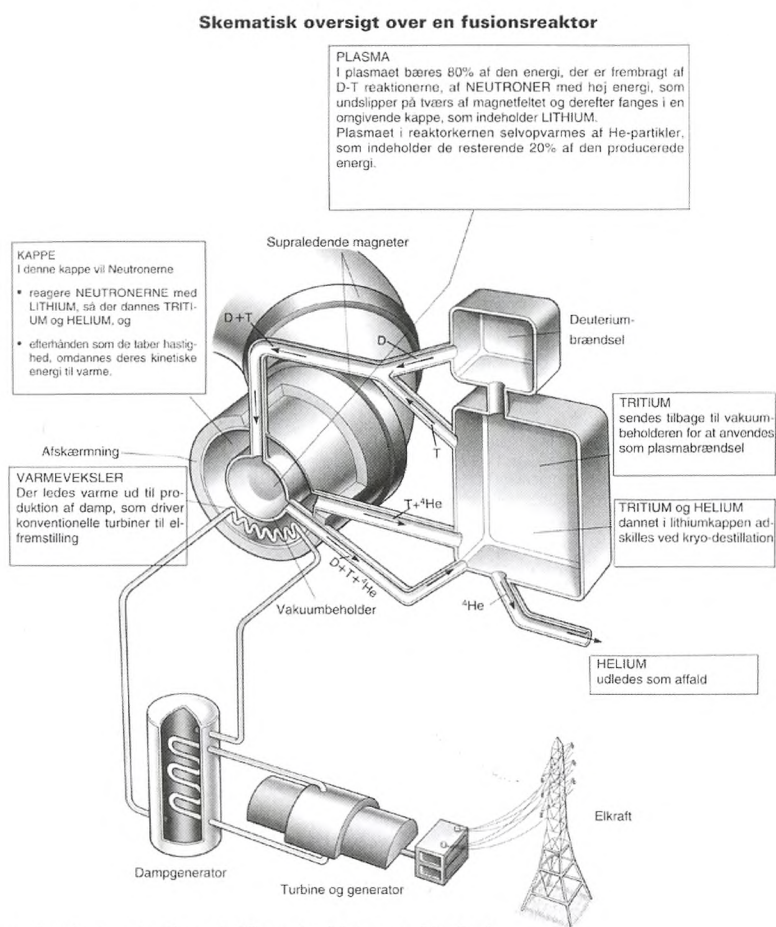
Figur 9. Cut-away tegning af ITER – bemærk størrelsen af den blå mand nederst i billedet (www.iter.org).

Resultatet forelå i 2001 i form af et design, der er beregnet til at kunne bygges for ca. 35 milliarder danske kroner i løbet af ca. 10 år. ITER vil producere en fusionseffekt på ca. 500 MW i 400 sekunder lange pulser. Plasmaet antændes ikke, men forbrændingen opretholdes ved, at ca. 10 % af den producerede energi føres tilbage i plasmaet. ITER vil få en 20 år lang udnyttelsesperiode. De første 10 år går til hovedformålet: at studere og forbedre magnetisk indeslutning af plasmaer, hvori der produceres en betragtelig fusionseffekt. De sidste 10 år tænkes brugt til at studere og udvikle materialer, der skal indgå i fusionsreaktorer, hvor de udsættes for kraftig neutron- og varmebestråling. Totaludgifterne i udnyttelsesperioden anslås til godt 40 milliarder danske kr.

En kritisk vurdering i medlemslandene, som nu var suppleret med Kina og Sydkorea, konkluderede i december 2003, at ITER var et sundt og velgennemtænkt design, som man ville bygge. Man kunne imidlertid

ikke opnå enighed om placeringen af ITER. Japan og EU foreslog hver sit lokale byggested. Først i slutningen af juni 2005 enedes man om, at ITER skulle bygges i Cadarache i Frankrig. Samtidig vedtog man en fordelingsnøgle for udgifterne og den overordnede administrative ledelse af projektet, samt at andre interesserede lande skulle inviteres til at deltage.

Da ITER er en forsøgsopstilling, vil dens fusions-effekt ikke blive udnyttet. Under forudsætning af, at ITER bygges efter planerne, regner man med, at der vil kunne bygges et demonstrationsværk, DEMO, i perioden 2025-35, hvis fusionseffekt vil blive udnyttet, og som skal demonstrere, at der er fundet løsninger på alle fysiske og tekniske problemer. Planen er så, at de første kommercielle kraftværker står klar omkring år 2050. Hvis de politiske beslutningstagere, industrien og de store energiforsyningsselskaber virkelig vil satse på en hurtig udvikling, kan de første kraftværker måske fremmes med ca. 10 år i forhold til nævnte plan.



Figur 10. Principtegning af et fusionskraftværk (figur fra Naturens Verden).

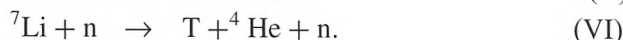
Fusionskraftværket

Figur 10 viser princippet i et fusionskraftværk baseret på tokamak-konceptet. Det minder om et konventionelt kraftværk, hvor blot ovnen er erstattet af fusionsreaktoren. Det brændende plasma ligger som en lukket ring i den toroidale reaktorbeholder, som er omgivet af superledende magnetfeltspoler, der holder plasmaet in-

desluttet. Plasmaet tilføres frisk brændstof ved injektion af deuterium og tritium.

Deuterium udvindes af vand, som indeholder så store mængder, at der i havene er deuterium nok til at dække det globale energiforbrug i milliarder af år. Tritium findes ikke i naturen, men det vil blive

dannet i selve reaktoren ved at lade neutronerne fra fusionsprocessen blive indfanget i grundstoffet lithium, som indgår i afskærmningen omkring plasmaet. Processerne, der danner tritium, er



Af litiumforekomsterne i naturen vil der kunne dannes tritium nok til at dække energiforbruget i millioner af år. Det tritium og helium, der dannes i afskærmningen, pumpes ud i en beholder, hvor tritiummet separeres, hvorefter det kan sendes ind i plasmaet som brændstof. Den dannede fusionsenergi afsættes i afskærmningen omkring plasmaet og føres via et kølesystem til en varmeveksler, hvori der dannes damp, der via en konventionel turbine trækker en el-generator.

Man regner med, at økonomiske fusionskraftværker kun vil kunne bygges i ret store enheder på over 1 GW_{el}. 10-15 fusionsværker vil altså kunne dække Danmarks samlede energiforbrug.

Fusionskraftværker forventes at kunne producere energi til priser, der kun er lidt højere end for el fra fossile energikilder. Priserne vil være på niveau med energi fra mange vedvarende kilder.

Al energiproduktion påvirker miljøet; og det vil fusionsenergien også. Fusionsprocesserne medfører dannelse af radioaktivitet, hvoraf hovedparten skyldes neutronerne, som gør materialet i afskærmningen radioaktivt. Reaktorbygningen vil blive så radioaktiv, at ingen kan opholde sig i den. Vedligeholdelse og komponentudskiftning skal derfor udføres ved hjælp af robotter.

Under almindelig drift er der intet radioaktivt eller andet forurenende udslip fra et fusionsværk. Der er ingen risiko for ødelæggende eksplosioner i værket. Skulle noget gå skævt, afkøles plasmaet automatisk, så processerne går i stå. Fusionsprocesserne kan ikke løbe løbsk.

Skulle et fusionskraftværk blive udsat for ødelæggende påvirkning i form af jordskælv, flystyrt eller sabotage, kan radioaktivt materiale blive spredt. Beregninger viser imidlertid, at sådanne hændelser ikke vil nødvendiggøre evakuering af befolkningen uden for kraftværkets område.

Deponering af radioaktivt materiale fra brugte reaktorkomponenter bliver heller ikke et stort problem. I sammenligning med fissionsværker danner fusionsværket væsentligt mindre radioaktivitet, og den henfalder så hurtigt, at den efter 50 år er nede på samme niveau som radioaktiviteten i asken fra kulfyrede værker.

Et fremtidigt samfund med fusion som hovedenergikilde vil få et forbrugsmønster, der er meget forskelligt fra det nuværende. Da fusionsenergien optræder som varme i afskærmningen omkring plasmaet, er der visse begrænsninger på, hvordan den kan udnyttes. Den er mest egnet til el-produktion i store kraftværker, men man kan dog også tænke sig at udnytte spildvarmen til opvarmning af huse som i kraftvarmeværker. Ligesom for mange af de vedvarende energikilders vedkommende vil et samfund, hvis hovedenergikilde er fusion,

i stor udstrækning bruge el som sekundær energikilde. Opvarmning og afkøling af huse vil være baseret på el. Produktion i industri og landbrug samt transport vil også i størst muligt omfang benytte el. Inden for visse dele af transportsektoren, især i biler, fly og skibe, er det ikke muligt at benytte el som sekundær energikilde. Her er der behov for at medbringe drivmidler, der kan bevæge fartøjet over lange afstande. I øjeblikket benyttes de fossile energikilder til disse formål, men man kan let forestille sig, at der fremstilles syntetiske drivmidler, som f.eks. brint, vha. energi fra fusionskraftværker.

Konklusioner

Der er en meget stor sandsynlighed for, at resultaterne fra ITER, der er vedtaget medio 2005, vil sætte forskerne i stand til at bygge de første fusionskraftværker i løbet af en menneskealder. Hvis det lykkes, har menneskeheden en ny energikilde med store potentialer og fordele:

- Brændstofferne deuterium og litium findes i store mængder fordelt over hele kloden.
- Under almindelig drift udsender et fusionskraftværk ingen miljøskadelige stoffer.
- Fusionskraftværker er sikre i den forstand, at selv de værst tænkelige uheld ikke medfører behov for evakuering uden for kraftværksområdet.
- Den radioaktivitet, der dannes, er relativt lille, og den har så korte henfaldstider, at deponeringen bliver et begrænset problem.
- Prisen for fusionsenergi vil ligge på samme niveau som prisen for energi fra de fleste vedvarende kilder og kun lidt over de nuværende priser.

På RISØs websider om fusion [1], kan man læse videre om Fusionsenergi, Det Europæiske fusionsprogram, ITER og Fusionsforskning på RISØ. Her findes også links til andre websider og til en 65-siders lærebog skrevet på gymnasieniveau [2].

Litteratur

- [1] RISØs websider om fusion, www.risoe.dk/fusion
- [2] Vagn O. Jensen (2001), FUSIONSENERGI – Fremtidens dominerende energikilde? (kan downloades via www.risoe.dk/fusion/dk/info).



Vagn O. Jensen, dr. phil., har arbejdet i Risøs fusionssektion siden 1958, nu som senior-konsulent. Han har i mere end 25 år, som ekstern lektor, undervist i fusionsplasmafysik på DTU.