

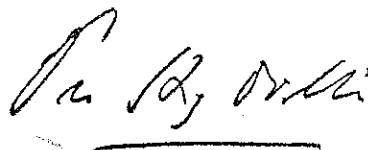
Medlemmerne af Folketingets Europaudvalg  
og deres stedfortrædere

Asiatisk Plads 2  
DK-1448 København K  
Tel. +45 33 92 00 00  
Fax +45 32 54 05 33  
E-mail: um@um.dk  
Telex 31292 ETR DK  
Telegr. adr. Etrangeres  
Girokonto 300-1806



Bilag	Journalnummer	Kontor	
1	400.C.2-0	EUK	9. august 2005

I opfølgning af mødet i Folketingets Europaudvalg den 3. juni 2005 -  
rådsmødet (konkurrenceevne) den 7. juni 2005 vedlægges Videnskabs-  
ministeriets notat om fusionsforskning.

  
\_\_\_\_\_

# Notat om Fusionsenergi

21. juni 2005

## Indhold

1	Synopsis.....	1
2	Hvad er fusionsenergi?.....	1
3	Fusionsforskningens mål, standpunkt og udvikling.....	2
4	Målene med ITER.....	4
5	Erfaringsbase og forudsigelser.....	4
6	Sikkerhed og miljø.....	5
7	Det Europæiske fusionsprogram.....	6

## 1 Synopsis

Solens energi kommer fra fusion. Målet med fusionsforskningen er at udvikle kraftværker baseret på fusion til produktion af elektricitet og eventuelt brint til en fremtidig brint økonomi. Fusionsenergi er sikker, fri for CO<sub>2</sub>-emission og i praksis udtømmelig. Fusion er en kernereaktion men produkterne af fusionsreaktionen er ikke radioaktive så der er ikke noget radioaktivt brugt brændsel. Reaktionen bestråler de strukturer der omgiver fusionen så der efterlades radioaktivt maskineri og byggeri efter endt energiproduktion. Efter ca. 50 år er denne radioaktivitet dog faldet til et niveau der ligger under niveauet i slagterne fra en tilsvarende energiproduktion med kul. Endvidere forventes en stor grad af genanvendelse mulig.

Udviklingen af fusionsenergi har gjort store fremskridt de sidste 30 år. Denne udvikling er godt illustreret af forøgelsen af fusions-brændstoffets tryk og af hvor godt brændstoffet er isoleret fra omgivelserne. Tilsammen danner disse størrelser en central indikator for hvor langt udviklingen af fusionsenergi er nået. I 1970 var denne indikator 1 million gange mindre end krævet for et fusionskraftværk. I år 2000 var samme indikator kun 10 gange for lille. Fusionsindikatoren var med andre ord blevet 100.000 gange større på 30 år. Til sammenligning blev regnekraften i computere i samme periode 10.000 gange større. Fortsættelse af udvikling af fusion afventer nu ibrugtagningen af ITER, et kraftigere og mere avanceret fusionseksperiment. Det forventes at den sidste forbedring på 10 gange hentes på ITER.

I 1991 blev der for første gang udviklet over 1 Megawatt fusionsenergi i et kraftværksrelevant fusionseksperiment. Det var på det Europæiske fusionsforskningscenter JET. I 1998 nåede JET en fusionseffekt på 16 Megawatt. Målet med ITER er 500 Megawatt fusionseffekt og netto energiproduktion.

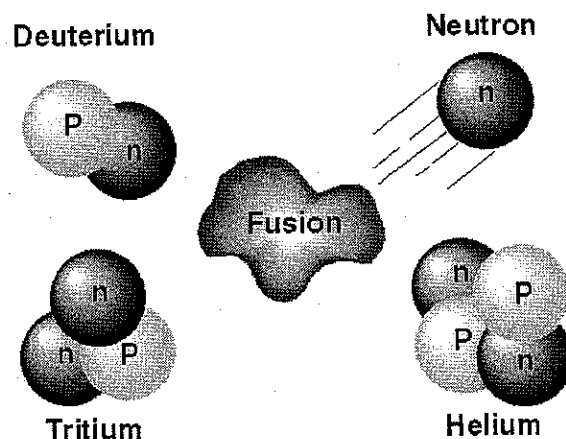
Udover forbedringen i fusionsindikatoren, har de sidste 30 års fusionsforskning udforsket store dele af fysikken bag fusionsenergi så der nu er en god basis for at forudsige hvad der skal til for at lave et fusionskraftværk. Et centralt mål for ITER er at afdække de sidste dele af fysikken bag fusion og dermed verificere og eventuelt tilrette ideerne om hvordan et fusionskraftværk skal bygges.

## 2 Hvad er fusionsenergi?

Energiudvikling på solen og andre stjerner skyldes fusion (sammensmeltning) af det lette element brint til det tungere element helium. Målet med fusionsforskningen er at

udnytte fusionsenergi i kraftværker på jorden til produktion af elektricitet og eventuelt til produktion af brint til brug i en fremtidig brintøkonomi.

De første fusionskraftværker vil benytte fusion af de tunge versioner af brint, kaldet deuterium og tritium. Herved produceres almindeligt helium samt en neutron. Mens deuterium findes i alt vand, må tritium produceres på kraftværket. Det skal gøres ved at indfange neutroner med det lette metal litium, hvorved der produceres tritium og helium. Fusionsprocessen er skitseret i Figur 1.



Figur 1 Deuterium (tungt brint) og tritium (ekstra tungt brint) fusionerer og producerer helium og en neutron. Tritium produceres ved at neutronen indfanges af det lette metal litium.

Brændstoffet til et fusionskraftværk er deuterium, der kan udvindes af havvand, samt litium, der findes jævnt fordelt i jordskorpen. 50 gram litium, en klump på størrelse med to fingre, og 400 liter vand, indholdet af et soppebassin, kan ved fusion omdannes til lige så meget energi som over 300 tons olie eller indholdet af 10 olietankbiler. Denne energimængde svarer til mere end en danskers samlede energiforbrug gennem et helt liv. Reserverne af litium rækker til at dække jordens samlede energiforbrug i millioner af år. Reserverne af deuterium i vand rækker endnu længere. Med en senere generation af fusionskraft, der udelukkende kører på deuterium, er der reserver til milliarder af år, længere end solens og jordens resterende levetid.

### 3 Fusionsforskningens mål, standpunkt og udvikling

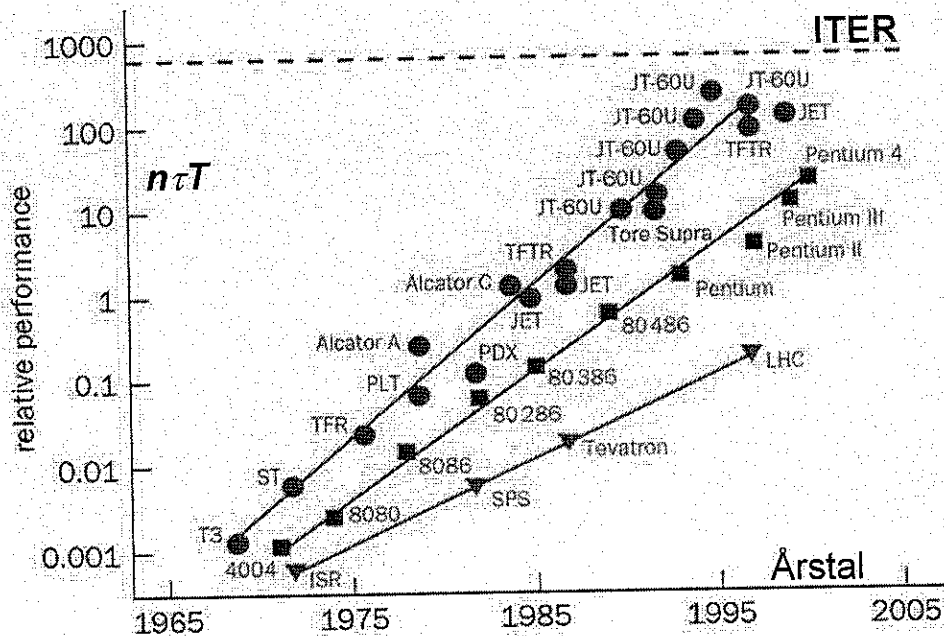
Kommerciel udnyttelse af fusionsenergi kræver at brændstoffet, en gas af deuterium og tritium, opvarmes til 200 millioner grader og sammentrykkes til et tryk på 10 atmosfære for at give en tæthed på  $10^{20}$  brændstofatomer per kubikmeter. Ved den temperatur ioniseres gasserne, de bliver til et plasma, og kan da fastholdes og sammentrykkes i magnetfelter.

Fusionsforskningen har nået den krævede temperatur på 200 millioner grader og den krævede tæthed på  $10^{20}$  brændstofatomer per kubikmeter. Dog er begge ikke nået samtidig. Produktet af temperatur og tæthed ( $T$  gange  $n$ ), der har dimension af tryk, skal op på 10 atmosfære og er i dag på cirka 6 atmosfære. De opnåede temperaturer og tætheder førte i 1991 til at der for første gang blev udviklet over 1 Megawatt fusionsenergi i et kraftværksrelevant fusionseksperiment. Det var på det Europæiske fusionsforskningscenter JET. I 1998 nåede JET en fusionseffekt på 16 Megawatt.

Brændstoffet, eller plasmaet, holdes varmt af en del af energiudviklingen i fusionsprocesserne og ved ekstern opvarmning, hvor energi sendes tilbage til plasmaet udefra. I et kraftværk skal den producerede fusionsenergi være meget større end den energi der bruges til ekstern opvarmning. Forholdet mellem disse kaldes effektforstærkningen,  $Q$ . I et kraftværk vil det være hensigtsmæssigt at  $Q$  er ca. 30. Behovet for ekstern opvarmning afhænger af hvor hurtigt plasmaet taber sin varme. Et mål for dette er energi-indslutningstiden,  $\tau$ , der er den tid det tager plasmaet at køle af hvis al opvarmningen slukkes. For at holde behovet for ekstern opvarmning på et rimeligt niveau og nå en effektforstærkning på 30 er det nødvendigt at  $\tau$  er mindst 6 sekunder. I dag er  $\tau$  cirka 1 sekund.

Hermed er de centrale krav til plasmaet i et fusionskraftværk lagt frem: temperatur  $T$  på 200 millioner grader celsius, tæthed af brændstof  $n$  på  $10^{20}$  brændstofatomer per kubikmeter og en energi-indslutningstid  $\tau$  på 6 sekunder.

Værdien af produktet af de tre størrelser  $n\tau T$  ( $n$  gange  $\tau$  gange  $T$ ) er en god indikator for hvad fusionsforskningen skal nå, hvor den er og hvad dens udvikling har været. Denne indikator skal op på 60 atmosfære $\times$ sekunder og var i år 2000 på 6 atmosfære $\times$ sekunder, 10 gange mindre end målet. I 1970 var den samme indikator 1 million gange mindre end målet. Over 30 år var denne indikator for fusionsforskningens stade altså blevet 100.000 gange større. Til sammenligning blev computeres regnekraft i samme periode 10.000 gange større. Udviklingen er skitseret i Figur 2. De blå punkter markeret med navne som T3, PLT, JT60-U og JET repræsenterer opnåede værdier for fusionsindikatoren ved forskellige eksperimenter med de pågældende navne i Rusland, USA, Japan og Europa.



Figur 2 Udviklingen i mål for ydeevne. I blå: fusionsplasmaer, fordobling hver 18. måned. Punkterne repræsenterer opnåede værdier for fusionsindikatoren ved forskellige eksperimenter med de angivne navne (fx T3, PLT og JET). I rødt: computere, fordobling hver 24. måned. I grønt: partikelacceleratorer, fordobling hver 3. år.

Denne udvikling af fusionsplasmaer baserede sig på at ny viden fra store og små faciliteter førte til stadig bedre udnyttelse af de førende eksperimentelle faciliteter, og når forbedringsraten tog af på de førende faciliteter blev nye mere avancerede faciliteter bygget. Siden år 2000 er forbedringsraten på de førende faciliteter, JET og JT60 taget af. Fortsættelse af udviklingen af fusionsplasmaer afventer nu ibrugtagning af ITER, næste generation af fusionseksperiment. Et design for ITER lå faktisk klar i begyndelsen af 1990'erne så et nyt ITER ville have kunnet stå klart nu og udviklingen i fusionsplasmaerne fortsat. Politiske forhandlinger har udskudt beslutningen om at bygge ITER hvilket har forsinket udviklingen af fusionsenergi.

## 4 Målene med ITER

ITER skal demonstrere at vi kan skabe et fusionsplasma af den kaliber der kræves i et kraftværk. Fusionseffekten skal nå op på 500 Megawatt hvilket svarer til den termiske effekt i et mindre kulkraftværk, og effektførstærkningen,  $Q$ , skal nå op på 10. Plasmaet i ITER vil hovedsageligt blive opvarmet ved sin egen fusionsenergi hvilket giver adgang til at checke og forbedre vores forståelse af det sidste og afgørende område af fysikken bag fusionsenergi.

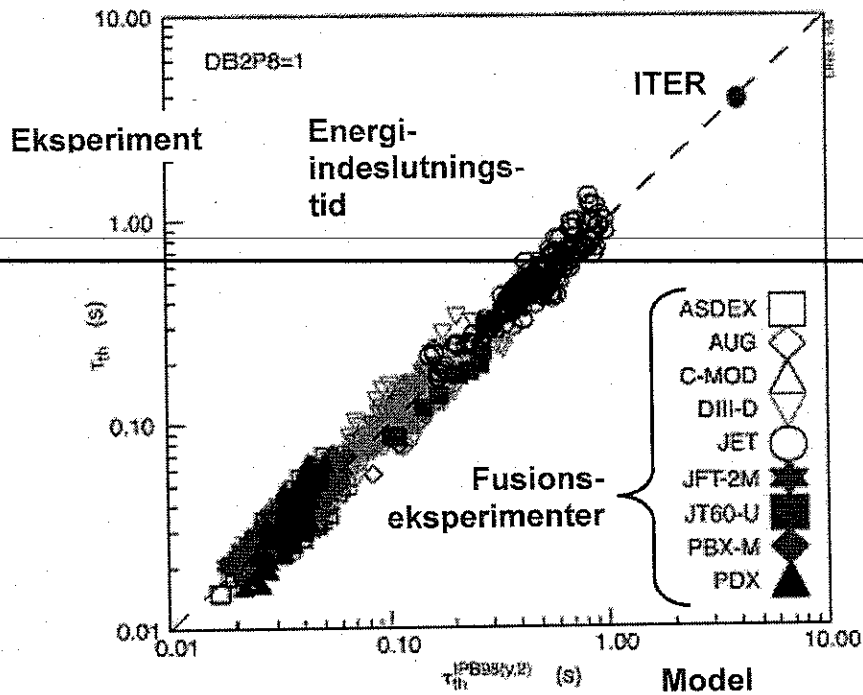
Endvidere skal ITER hjælpe til udvikling af tekniske systemer i et fusionskraftværk samt afprøve materialer til brug i konstruktionen af samme.

## 5 Erfaringsbase og forudsigelser

ITER er groft sagt dobbelt så stor som JET, det førende fusionseksperiment i dag. ITER repræsenterer hermed et skridt fremad der er lige så stort som da JET i 70'erne blev designet. Selvom JET har afdækket megen ny fysik har JET nået de mål der blev sat da det blev designet.

Designet af ITER og forudsigelserne af dens ydeevne er baseret på de erfaringer der er samlet de sidste 30 år med en bred vifte af fusionseksperimenter, store som små. Eksperimenter der på de fleste punkter adskiller sig fra hinanden mere end JET adskiller sig fra ITER. På basis af disse erfaringer er matematiske modeller af fusion blevet udviklet med det formål at kunne forudsige hvad mere avancerede fusionsfaciliteter vil yde. Disse modeller skal selvfølgelig korrekt kunne repræsentere de eksisterende eksperimentelle observationer. Et eksempel på en sådan model, holdt op imod eksperimentelle målinger, er vist i Figur 3. Denne model benyttes til at forudsige energi-indeslutningstiden i ITER, den centrale parameter der skal forbedres med ITER.

Sikkerheden af sådanne forudsigelser afhænger helt af hvor langt ud over det kendte der forudsiges og af hvor stort erfaringsgrundlaget er. Det ses at eksperimentelle erfaringer gjort på JET de sidste 20 år (sorte cirkler i figuren) repræsenterer godt en tredjedel af erfaringsgrundlaget og halverede, groft sagt, afstanden til ITER.



Figur 3 For alle typer plasmaer på en række fusionseksperimenter, store som små, er målte værdier af energi-indeslutningstiden plottet imod værdier beregnet ved hjælp af en og samme matematiske model. Det ses at model-beregningerne er i fin overensstemmelse med målte værdier. Model-beregningen bruges til forudsigelse af energi-indeslutningstiden i ITER.

## 6 Sikkerhed og miljø

Fusionskraft er baseret på kernereaktioner og medfører radioaktivitet. Et fusionskraftværk kan ikke komme ud for en nedsmeltning; hvis kontrollen mistes med plasmaet, hvor fusion finder sted, vil plasmaet ramme vægen, der omslutter plasmaet. Herved afkøles plasmaet prompte, og fusionsprocesserne stopper. Tritium benyttes i fusionsreaktionen og produceres på kraftværket. Tritium er radioaktivt med en levetid på 12 år. Det er sundhedsfarligt, hvis det kommer ind i kroppen. I reaktionskammeret vil der være ca. 1 gram tritium, mens der i eksterne systemer rundt om reaktoren vil være nogle få kg tritium. Ved ulykker, hvor bygninger beskadiges, kan udslip af tritium finde sted. Ved den værste tænkelige ulykke, inklusive terror med store fly, vil det dog ikke være nødvendigt med evakuering uden for kraftværkets område.

Energiproduktionen er fri for CO<sub>2</sub>-emmission. Produkterne af fusionsreaktionen er ikke radioaktive, så der er ikke noget radioaktivt brugt brændsel. Reaktionen bestråler de strukturer, der omgiver fusionen, så der efterlades radioaktivt maskineri og byggeri efter endt energiproduktion. Efter 50 år er denne radioaktivitet dog faldet til et niveau, der ligger under niveauet i slagterne fra en tilsvarende energiproduktion med kul, og det forventes at en stor grad af genanvendelse er mulig. Fusionsenergi giver derfor ikke anledning til væsentlige affaldsproblemer.

Et rentabelt fusionskraftværk vil formodentligt producere 1.5 Gigawatt elektrisk. Med Danmarks eksisterende energiforbrug og under antagelse af at en brintøkonomi er etableret, og at brinten hertil skal produceres uden CO<sub>2</sub> emission, ville dækning af Danmarks energibehov med fusion kræve 15 til 20 fusionskraftværker.

## 7 Det Europæiske fusionsprogram

Det Europæiske fusionsprogram udføres af forskningscentre i Europa, der har indgået associeringsaftaler med EURATOM. Gennem associeringsaftalerne sikres det at fusionsforskningen er koordineret og at Europa har et integreret og sammenhængende program med effektiv kvalitetssikring. En række forskningscentre uden associeringsaftaler deltager i programmet via associerede centre. I Danmark har Risø en associeringsaftale og kan derfor fungere som brohoved til deltagelse i fusionsprogrammet. Associeringerne deltager i udviklingen af ITER og driver JET i fællesskab. Associeringsaftalerne tilgodeser også en fælles udnyttelse af større faciliteter i nationale forskningscentre. Koordineringen og den åbne adgang til Europæiske faciliteter gør det muligt for mindre fusionsgrupper, som den Danske, at koncentrere indsatsen om få emner og samtidig få denne specialiserede indsats integreret i en effektiv sammenhæng. Endvidere giver deltagelsen i fusionsprogrammet adgang til hele programmets set af kompetencer og dermed til hurtigere udbygning af kompetencer lokalt, hvilket fusionsgruppen på Risø har draget stor fordel af. EURATOM medfinansierer forskningen i nationale centre med 20 % generelt og 40 % ved visse større investeringer.

Eventuelle spørgsmål kan rettes til  
Henrik Bindslev  
Programleder  
Plasmafysik og - teknologi  
Afdelingen for Optik og Plasmaforskning  
Forskningscenter Risø  
Telefon: 4677 4531  
e-mail: [henrik.bindslev@risoe.dk](mailto:henrik.bindslev@risoe.dk)  
web: [www.risoe.dk/ofd/people/hebi.htm](http://www.risoe.dk/ofd/people/hebi.htm)