

Kernfusie, een zon op aarde

Auteur: Dr.ir. M.T. Westra, FOM-instituut voor plasmafysica 'Rijnhuizen'

1.	Inleiding.....	1
2.	De principes van kernfusie.....	2
2.1	Plasma, de vierde toestand van de materie.....	3
2.2	Een zon op aarde.....	3
2.3	Het opsluiten van een heet plasma: de tokamak.....	4
2.4	Verhitting van het plasma.....	6
2.5	Hoe groter, hoe beter.....	7
2.6	Alternatieven: de stellerator en traagheidsopsluiting.....	8
3.	Fusie als energiebron.....	9
3.1	Werking en bouw van een fusiecentrale.....	9
3.2	De brandstof: deuterium en lithium.....	11
3.3	Veiligheidsaspecten.....	11
3.4	Milieu-aspecten.....	12
3.5	De economie van fusie-energie.....	13
3.6	Fusie in de energiemix.....	15
4.	Status van het fusieonderzoek.....	16
4.1	Korte geschiedenis van het fusieonderzoek.....	16
4.2	Vooruitgang in getallen.....	18
4.3	Organisatie van het fusieonderzoek.....	19
5.	De weg naar de eerste fusie-energiecentrale.....	20
5.1	ITER.....	21
5.2	Materiaalonderzoek in IFMIF.....	22
5.3	DEMO.....	22
	Noten.....	24
	Internetbronnen.....	24
	Informatie auteur:.....	24

1. Inleiding

Kernfusie, het proces waarbij lichte kernen samensmelten tot zwaardere, is de energiebron van de zon en de sterren. Sinds de wetenschap zich voor het eerst realiseerde wat de oorzaak is van de enorme hoeveelheid energie die de zon uitstraalt, is het een droom geweest om die energiebron op aarde te leren beheersen. Aan het begin van het fusieonderzoek voorspelde men dat een werkende fusiereactor binnen 20 jaar realiseerbaar moest zijn, maar dat bleek te optimistisch. Inmiddels is er veel meer bekend over deze vrijwel onuitputtelijke en schone bron van energie.

Het doel van het internationale fusieonderzoek is het realiseren van een prototype fusie-energiecentrale die voldoet aan de eisen die de maatschappij daaraan stelt: veilig, betrouwbaar, ruim voorradige brandstof, minimale milieubelasting en economisch rendabel. In het laatste decennium is er belangrijke wetenschappelijke en technische vooruitgang geboekt in het fusieonderzoek. Die vooruitgang, waaronder de productie van

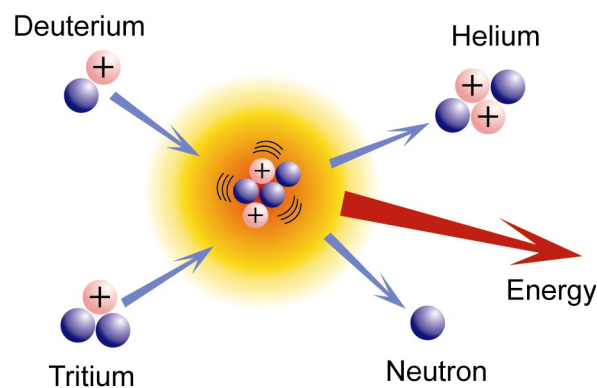
fusie-energie tot een niveau van 16 Megawatt – gedurende de korte pulsen die kenmerkend zijn voor de huidige generatie experimenten – bevestigt dat fusie als geloofwaardige energie-optie beschouwd kan worden met de potentie voor grootschalige en schone energie-opwekking.

Het huidige onderzoek, waarbij routinematig plasma's worden geproduceerd die tien maal heter zijn dan het inwendige van de zon, heeft aangetoond dat de technische en wetenschappelijke kennis klaar is voor de constructie van een machine van de volgende generatie. De ontwerpactiviteiten van deze volgende stap, ITER (*International Tokamak Experimental Reactor*) genaamd, zijn inmiddels voltooid, en de internationale onderhandelingen over de locatie zijn in volle gang. ITER moet de technische haalbaarheid van fusie-energie als energiebron aantonen door een langdurig brandend plasma te genereren. De ontwikkeling van ITER luidt de overgang in van fundamenteel onderzoek naar technologie-ontwikkeling.

Het snelste tijdspad gaat ervan uit dat na ITER een eerste prototype van een commerciële fusiecentrale gebouwd kan worden, en dat benodigd materiaalonderzoek parallel aan ITER wordt gedaan. Als dit tijdspad wordt gevolgd kan op een tijdschaal van 30-35 jaar gedemonstreerd worden dat de grootschalige opwekking van fusie-energie technisch mogelijk en economisch rendabel is, en aantrekkelijke veiligheids- en milieueigenschappen heeft.

2. De principes van kernfusie

Tijdens het kernfusieproces versmelten twee lichte atoomkernen tot één zwaardere, zoals getoond in figuur 1. Bij dit proces komt veel energie vrij. Er zijn veel verschillende fusiereacties mogelijk: in sterren worden op die manier van het lichtste element – waterstof – steeds zwaardere kernen gevormd, een proces dat zich voortzet tot het element ijzer.



Figuur 1: Twee atomen, hier deuterium en tritium, fuseren. Daarbij ontstaat een heliumkern, een vrij neutron, en zeer veel energie.

Kernfusie is de energiebron van het heelal. In sterren zoals de zon versmelt waterstof tot helium, bij een temperatuur van 10 tot 15 miljoen graden Celsius. De zon zet elke seconde ongeveer 600 miljoen ton waterstof om in 596 ton helium. Vier miljoen ton materie wordt daarbij omgezet in energie, volgens Einsteins beroemde formule $E=mc^2$. Die vier miljoen ton is goed voor $3.6 \cdot 10^{26}$ joule per seconde, ongeveer een miljoen maal zoveel energie als we op aarde in een heel jaar verbruiken.

Fusie gaat niet vanzelf. Om te fuseren moeten de atoomkernen dicht genoeg bij elkaar komen, zodat de sterke kernkracht – die slechts op korte afstand voelbaar is – de kernen naar elkaar toe kan trekken. Op grotere afstand overheerst echter de elektrische kracht, en aangezien de kernen positief geladen zijn stoten ze elkaar af. Om te bereiken dat de kernen voldoende dicht bij elkaar komen moet de temperatuur voldoende hoog gemaakt worden, zodat de kernen met hoge snelheid tegen elkaar botsen.

2.1 Plasma, de vierde toestand van de materie

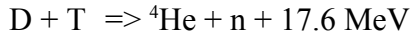
Materie met een zeer hoge temperatuur bevindt zich in een bijzondere toestand: de elektronen en kernen bewegen los van elkaar, en vormen een gas van geladen deeltjes. Een dergelijke toestand heet een *plasma*. Plasma wordt wel de ‘vierde toestand van de materie’ genoemd, omdat materie bij toenemende temperatuur na de vaste, vloeibare en gasvormige fase in de plasma-fase komt. Plasma is de meest voorkomende toestand in het heelal: de zon en alle sterren bestaan uit plasma. Op aarde zijn TL-buizen, bliksemontladingen, plasmabeeldschermen voorbeelden van plasma’s. In de industrie worden plasma’s op grote schaal gebruikt voor verschillende materiaalbewerkingen, en voor het maken van computerchips [1].

Een plasma gedraagt zich als een turbulente vloeistof, waarin bovendien elektrische en magnetische velden een belangrijke rol spelen. Dat maakt een plasma tot een ingewikkelde medium dat zeer complex gedrag kan vertonen. Een groot deel van het vooruitgang in het fusie onderzoek bestaat uit het enorm toegenomen begrip van het gedrag van plasma’s, en de mogelijkheid om met moderne computertechnieken dat gedrag nauwkeurig te beschrijven en te voorspellen.

2.2 Een zon op aarde

Het fusieproces dat de zon en de sterren van energie voorziet – de fusie van waterstofkernen – is niet geschikt om op aarde te gebruiken. De reden hiervoor is dat het proces slechts zeer langzaam verloopt: eigenlijk brandt de zon op een laag pitje. Dat er toch zoveel energie vanaf komt is te danken aan de enorme afmeting van de zon, en de dientengevolge enorm hoge druk in het centrum.

Hoewel er vele denkbare fusiereacties mogelijk zijn, zijn er maar een paar interessant voor fusie op aarde. Dat zijn de reacties die bij een relatief lage temperatuur en druk toch een redelijke reactiewaarschijnlijkheid hebben. De fusiereactie die op aarde het gemakkelijkst tot stand te brengen is, is de reactie tussen de waterstof-isotopen deuterium en tritium:



Hierin staat D voor deuterium (het stabiele isotoop van waterstof, met één proton en één neutron in de kern), T voor tritium (het radioactieve isotoop van waterstof, met één proton en twee neutronen in de kern), ${}^4\text{He}$ voor helium, en n voor neutron. De reactie is afgebeeld in figuur 1. De vrijkomende energie wordt uitgedrukt in mega-elektronvolt (1 MeV = $1.602 \cdot 10^{-13}$ Joule). Om voldoende fusiereacties te produceren moet de temperatuur van het plasma ongeveer 150 miljoen graden Celsius bedragen.

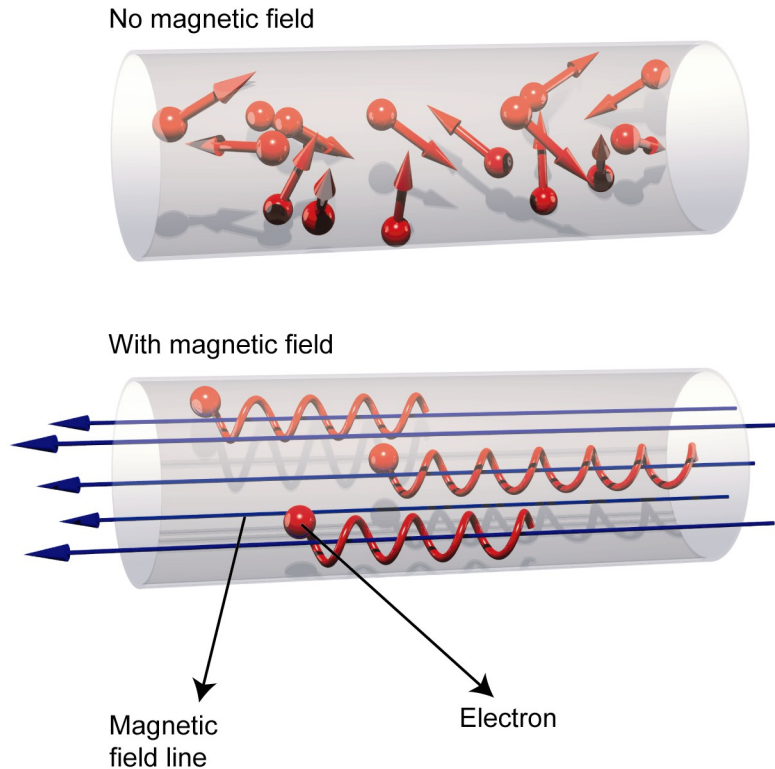
Bij een fusiereactie komt ongeveer vier miljoen maal meer energie vrij dan bij een chemische reactie, zoals bijvoorbeeld bij de verbranding van koolstof. Dat enorme verschil zorgt er voor dat een fusiecentrale – vergeleken met bijvoorbeeld een kolencentrale – slechts een minimale hoeveelheid brandstof nodig heeft. Om een elektriciteitscentrale van 1000 MW (de grootte van een gemiddelde kolencentrale) een jaar lang aan de gang te houden, moet ongeveer 2,7 miljoen ton steenkool worden verbrand. Dezelfde hoeveelheid energie kan in een fusiecentrale worden opgewekt door de fusie van slechts 250 kilogram van een deuterium-tritium mengsel.

De D+T reactie is niet de enige mogelijkheid voor een fusiecentrale; ook bijvoorbeeld de fusie tussen twee deuteriumatomen (D+D) is mogelijk. Deze reactie zou het gebruik van tritium overbodig maken, en bovendien hebben de geproduceerde neutronen een lagere energie, zodat ze gemakkelijker zijn op te vangen en minder schade toebrengen aan de reactorwand. Voor deze reactie is echter een hogere temperatuur nodig, dus voorlopig liggen de mogelijkheden van deze ‘geavanceerde’ fusiereacties nog in de toekomst, en is alleen de D+T reactie relevant voor de eerste generatie fusiecentrales.

2.3 Het opsluiten van een heet plasma: de tokamak

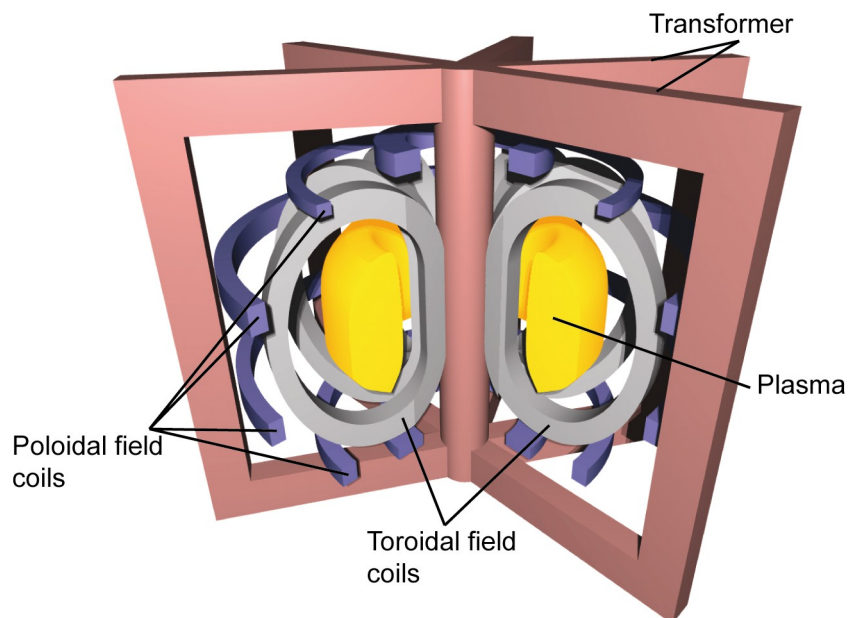
De grootste hindernis in het tot stand brengen van kernfusie is de enorm hoge temperatuur van een fusieplasma. Tegen een dergelijke temperatuur – 150 miljoen graden Celsius – is geen enkel materiaal bestand. In een reactorvat moet daarom de warmteoverdracht van het hete plasma naar de wand beperkt worden om de wand tegen te hoge temperaturen te beschermen, en om het plasma op temperatuur te houden. Het plasma moet dus worden *opgesloten*.

Om dit tot stand te brengen kunnen we gebruik maken van een eigenschap van het plasma: omdat een plasma uit geladen deeltjes bestaat – ionen en elektronen – kan een plasma worden gemanipuleerd met magneetvelden. Een geladen deeltje is gedwongen om een magneetlijn te volgen, zoals afgebeeld in figuur 2. De magneetlijnen zijn zo georganiseerd dat het plasma de binnenwand van het vat niet meer raken: deze techniek wordt daarom *magnetische opsluiting* genoemd.



Figuur 2: Met behulp van een magneetveld wordt er voor gezorgd dat de geladen deeltjes in het plasma niet meer met de wand in contact komen. Hier zijn alleen de elektronen weergegeven. Boven: door de afwezigheid van het magneetveld kunnen de deeltjes ongehinderd bewegen en de wand raken. Onder: geladen deeltjes cirkelen rond de veldlijnen en maken geen contact meer met de wand: ze zitten in het magneetveld opgesloten.

De eerste pogingen om een plasma op te sluiten hadden vanwege dit principe de vorm van een rechte cylinder met elektromagneten er omheen. In het middelste gedeelte van de cylinder werkt dat goed, maar de uiteinden leiden tot problemen. Een grote doorbraak in het kernfusie-onderzoek was de introductie van de *tokamak*. De tokamak heeft de vorm van een ring, (of *torus*) zodat uiteinden vermeden worden. Het woord ‘tokamak’ is een Russische afkorting van de woorden "toroidalnaya", "kamera", en "magnitnaya", wat betekent “torusvormige magnetische kamer”. Een tokamak, met de bijbehorende magneten, is afgebeeld in figuur 3.



Figuur 3: Een tokamak met bijbehorende magneten. Het vacuümvat waarin het plasma zich bevindt is hier weggelaten. Met het transformatorjuk kan door het plasma een stroom worden gestuurd, waarbij het plasma als secundaire wikkeling fungeert. Het magneetveld dat deze stroom opwekt, is nodig voor het opsluiten van het plasma.

Deze techniek van magnetische opsluiting werkt zeer efficiënt: het warmteverlies van het hete plasma naar de binnenwand wordt met een factor 10^{15} teruggebracht, vergelijkbaar met de warmte-isolatie van piepschuim.

2.4 Verhitting van het plasma

Om in een plasma de fusiereactie te laten plaatsvinden, moet het plasma eerst verhit worden tot de 150 miljoen graden Celsius die daarvoor nodig is. Voor het verhitten van een plasma zijn drie verschillende technieken beschikbaar, die in de praktijk in een reactor allemaal worden gebruikt. We noemen de drie methoden hier kort.

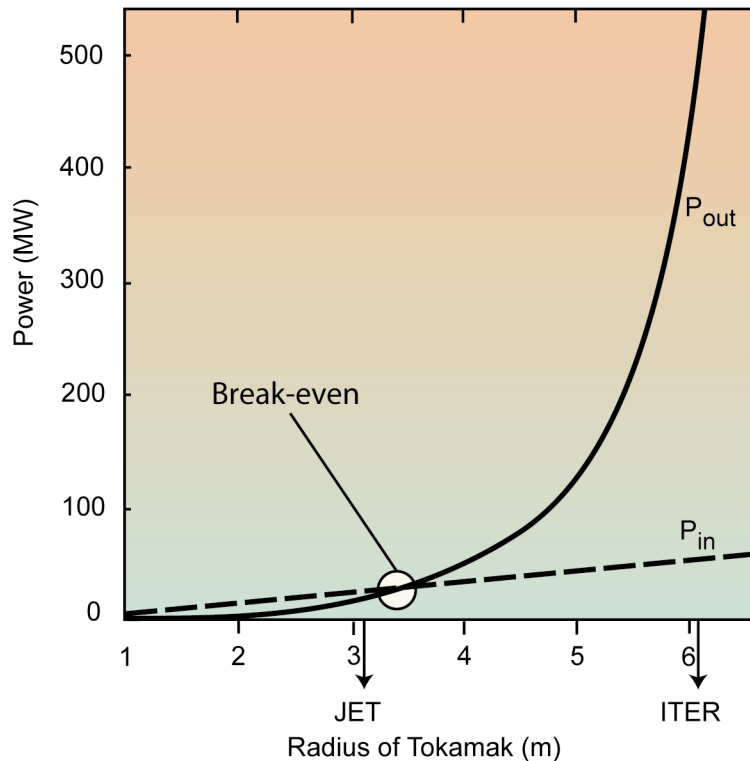
De eerste methode is om een elektrische stroom door het plasma te sturen, en daarmee het plasma te verhitten. Het plasma, dat uit geladen deeltjes bestaat, is immers een gesloten stroomkring, waarin een stroom geïnduceerd kan worden met een transformator. Het transformatorjuk is te zien in figuur 3. Op deze manier kan met eenvoudige Ohmse verhitting een temperatuur van een paar miljoen graden bereikt worden.

Een tweede methode maakt gebruik van microgolfstraling, die door het plasma wordt geabsorbeerd. De microgolfstraling kan bovendien met behulp van antennes nauwkeurig op een bepaalde plaats in het plasma worden gedeponereerd, wat een extra mogelijkheid biedt om ongewenste turbulenties in het plasma te onderdrukken.

Een laatste verhittingstechniek is het inschieten van neutrale deeltjes met een hoge energie: de *neutrale-bundel injectie*. Ook deze techniek geeft een extra mogelijkheid om het plasma te manipuleren, en kan bovendien gebruikt worden om brandstof toe te voeren.

2.5 Hoe groter, hoe beter

Om een fusieplasma op de vereiste temperatuur te houden, moeten warmteverliezen gecompenseerd worden. Bij een tokamak gaat het om de warmte die van het centrum van het plasma naar de rand van de torus stroomt, en dit warmteverlies is daarom evenredig met de straal van de torus. Het geproduceerde fusievermogen is echter evenredig met het *volume* van de torus. Bij toenemende grootte groeit het geproduceerde vermogen (P_{uit}) dus sneller dan het vermogen dat nodig is om de verliezen te compenseren (P_{in}), zoals weergegeven in figuur 4.



Figuur 4: De groei van het geproduceerde fusievermogen P_{uit} en het benodigde verhittingsvermogen P_{in} , versus de straal van de tokamak. Het is duidelijk dat bij JET P_{in} nog kleiner is dan P_{uit} , terwijl dat bij ITER niet meer zo is. Het geproduceerde fusievermogen neemt snel toe met de grootte van de tokamak

Een alles bepalende factor voor de prestatie van een tokamak is dus zijn grootte: als een tokamak ondanks de isolerende magneetvelden toch nog te snel zijn warmte verliest, is dat te verhelpen door de tokamak groter te maken.

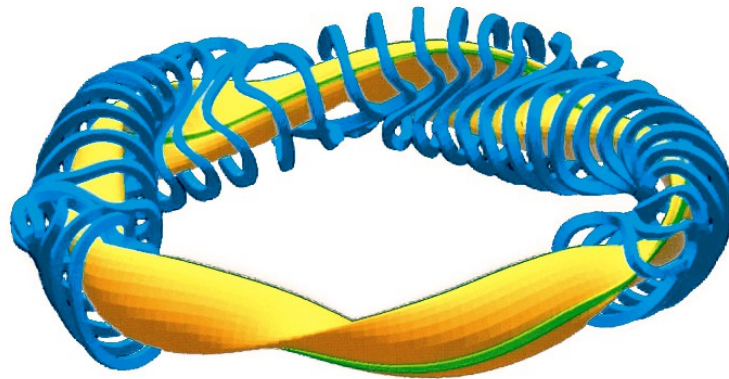
Dit heeft een belangrijk gevolg: *een fusiecentrale heeft een minimale grootte*. Een fusiereactor die kleiner is dan de minimale maat, heeft altijd meer energie nodig om op gang te blijven dan dat er aan energie uitkomt. De verhouding tussen P_{uit} en P_{in} wordt Q genoemd. De grootste fusiereactor op dit moment, JET in Engeland, haalt $Q=0,7$. Het zogenaamde ‘break-even’ punt, waarbij er evenveel energie uitkomt als er ingaat,

correspondeert met $Q=1$. De volgende te bouwen fusiereactor, ITER, zal $Q=10$ hebben, en een commerciële fusiereactor zal met $Q=30$ tot $Q=100$ werken.

Het probleem van het bouwen van een fusiereactor is dat een werkend schaalmodel niet mogelijk is: het kleinste werkende model heeft al bijna de grootte van een toekomstige fusie-energiecentrale.

2.6 Alternatieven: de stellerator en traagheidsopsluiting

De tokamak is niet de enige mogelijkheid om beheerste kernfusie te realiseren. Twee andere technieken zijn vooral van belang: de *stellerator*, en *traagheidsopsluiting*. Machines die op deze technieken zijn gebaseerd lopen echter een generatie achter op de tokamak, en komen niet in aanmerking om in de eerste generatie fusiecentrales gebruikt te worden.



Figuur 5: Een model van de stellerator Wendelstein 7-X, die op dit moment wordt gebouwd in Duitsland. Bochtige magneten zorgen voor het benodigde magneetveld om het plasma in op te sluiten.

In een gewone tokamak wordt het magneetveld dat nodig is om het plasma op te sluiten voor een deel gemaakt door een stroom door het plasma te sturen, met behulp van een transformator (zie figuur 3). Het gebruik van een transformator heeft echter een aantal nadelen, waaronder het grote volume dat de transformator in beslag neemt, en de moeilijkheid om het plasma lang in stand te houden: om een stroom in het plasma te laten lopen moet de stroom in de primaire kring steeds blijven toenemen, wat maar een beperkte tijd mogelijk is.

In een stellerator wordt het gewenste magneetveld tot stand gebracht met spoelen met een zeer bijzondere, grillige vorm, zoals te zien in figuur 5. Hoewel dit een zeer complex ontwerp tot gevolg heeft, kan een fusiecentrale gebaseerd op dit concept compacter gebouwd worden omdat het hele transformatorjuk komt te vervallen. Bovendien kunnen efficiënter plasma's van langere tijdsduur gemaakt worden.

Het tweede alternatieve concept is *traagheidsopsluiting*. Bij traagheidsopsluiting zorgt de traagheid van de materie ervoor dat het plasma in een klein volume wordt opgesloten. Kleine bolletjes fusiebrandstof worden bestookt met een zeer intense laserpuls, waardoor de buitenste schil van het bolletje verdampt en naar buiten wegvliegt. De reactiekracht

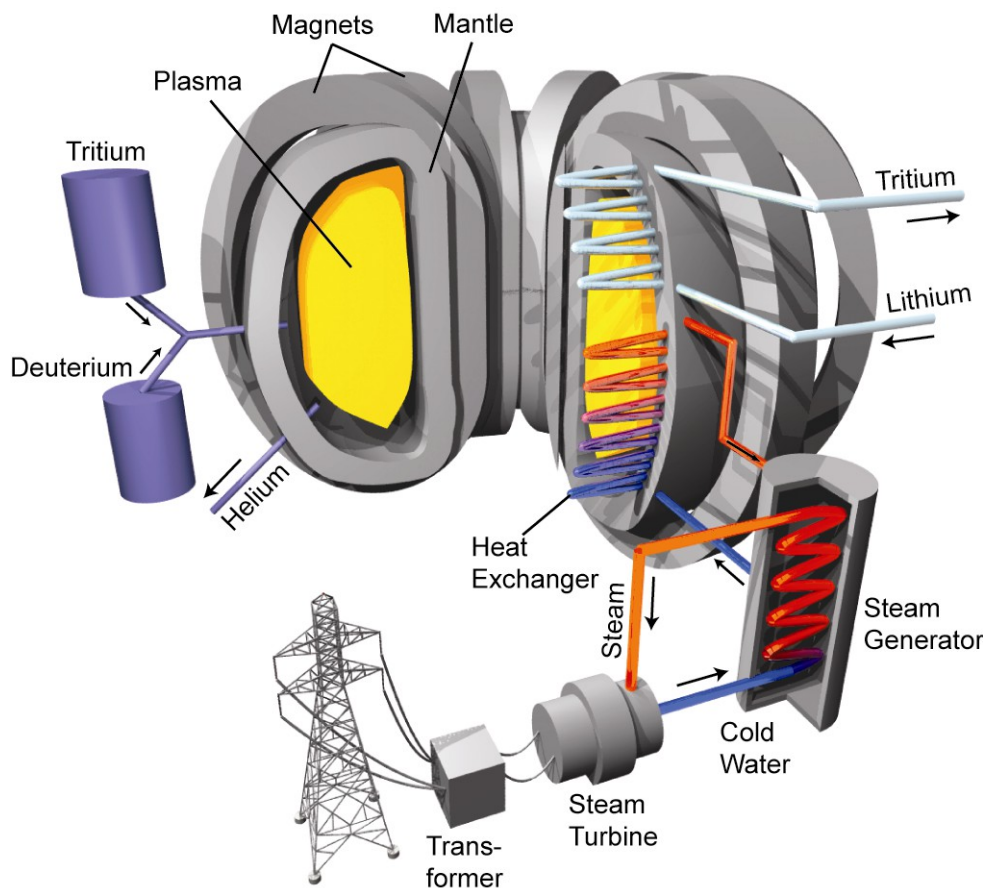
van de wegvliegende materie perst de overblijvende fusiebrandstof ver genoeg samen om de ontbrandingstemperatuur te bereiken, waarna een mini-explosie plaatsvindt. Een reactor gebaseerd op dit type zou gebruik maken van een gestage stroom bolletjes, die één voor één beschoten worden, zodat semi-continu energie wordt opgewekt. Vooral in de VS en in Frankrijk wordt naar dit type veel onderzoek gedaan.

3. Fusie als energiebron

Energieproductie moet gericht zijn op het garanderen van ononderbroken beschikbaarheid van energie, voor een prijs die betaalbaar is voor de consument. Verder is het wenselijk dat de energie op een milieuvriendelijke manier en veilig wordt geproduceerd. Milieuproblemen hebben de aandacht gericht op de zwaktes van het huidige wereld-energiesysteem, dat voor het grootste deel (ongeveer 85%) gebaseerd is op fossiele brandstoffen. Ook het veiligstellen van de toelevering van de benodigde brandstoffen wordt een steeds belangrijker probleem. Er is daarom een enorme behoefte aan nieuwe niet-vervuilende en duurzame energiebronnen die op grote schaal energie kunnen leveren, enerzijds om de energie-afhankelijkheid van westerse landen te verminderen, anderzijds om mogelijke klimaatveranderingen ten gevolge van de uitstoot van broeikasgassen tegen te gaan.

Kernfusie lijkt één van de meest aantrekkelijke lange-termijn energie-opties, vooral vanwege de voor iedereen overvloedig beschikbare en goedkope brandstoffen en de zeer gunstige veiligheids- en milieu-eigenschappen. In deze sectie bespreken we de mogelijkheden en eigenschappen van kernfusie als energiebron.

3.1 Werking en bouw van een fusiecentrale



Figuur 6: De verschillende componenten van een fusiecentrale.

Een fusiecentrale zoals die is afgebeeld in figuur 6, heeft in het midden het torusvormige vat waarbinnen het fusieplasma zich bevindt. De neutronen die bij de fusiereactie tussen deuterium en tritium vrijkomen worden opgevangen in een mantel. De mantel heeft twee functies: ten eerste wordt daar lithium omgezet in tritium, doordat lithium bestraald wordt door neutronen. Het tritium dat in de mantel wordt aangemaakt wordt van het overblijvende lithium gescheiden, en gemengd met deuterium als brandstof aan het plasma toegevoerd.

De tweede functie van de mantel is om de warmte af te voeren. De warmte die vrijkomt bij de lithiumreactie, en bij de botsing van de snelle neutronen met water, wordt afgevoerd met een warmtewisselaar. Met de opgevangen warmte wordt stoom gemaakt, waarmee een conventionele stoomturbine wordt aangedreven. De stoomturbine produceert elektriciteit, die via een transformator aan het distributienet wordt geleverd. Het bij de reactie vrijkomende helium wordt afgezogen uit de plasmaruimte, en afgevoerd als bijproduct.

3.2 De brandstof: deuterium en lithium

Één van de belangrijkste voordelen van fusie-energie is dat de brandstof zo goed als onuitputtelijk is, goedkoop, en voor iedereen toegankelijk. Bovendien is er maar zeer weinig brandstof nodig: om een elektriciteitscentrale van 1000 MW een jaar lang te laten draaien is 250 kg deuterium-tritium mengsel nodig.

Deuterium is het niet-radioactieve isotoop van waterstof. Zo'n 0,015% van alle waterstof op aarde is deuterium; een liter water bevat 33 milligram. Dat maakt deuterium zeer overvloedig beschikbaar: de hoeveelheid deuterium in de wereldzeeën wordt geschat op $4.6 \cdot 10^{13}$ ton. Deuterium kan worden gewonnen via elektrolyse van water (zwaar water elektrolyseert moeilijker, en blijft dus achter bij de elektrolyse van water), via de destillatie van vloeibaar waterstof, of via verschillende chemische adsorptietechnieken.

De complete verbranding van deuterium levert een energie-inhoud van $350 \cdot 10^{15}$ joule per ton deuterium. Het deuterium aanwezig in zeewater is dus goed voor ongeveer $5 \cdot 10^{11}$ TW-jaar aan energie. In het jaar 2002 gebruikte de hele wereld ongeveer 13.7 TW-jaar aan energie, dus de energie-inhoud van het deuterium in zeewater zou voldoende zijn voor veertig miljard jaar energievoorziening, langer dan de zon zal branden. Gezien de enorme hoeveelheid beschikbaar deuterium, is het dus zaak om op de lange duur de D+D fusiereactie te leren benutten.

Tritium is het radioactieve isotoop van waterstof: het zendt bètastraling (elektronen) uit met een halfwaardetijd van 12.3 jaar. Door de korte halfwaardetijd komt tritium niet in de natuur voor, maar het kan eenvoudig worden gemaakt door het element lithium-6 met neutronen te bestralen. Natuurlijk lithium bestaat ongeveer voor 7.4% uit lithium-6. In een fusiecentrale is het lithium aanwezig in een mantel rond het plasma, waar het bestraald wordt met de neutronen die uit de fusiereactie in het plasma komen. Het radioactieve tritium wordt dus in de fusiecentrale gemaakt, en wordt onmiddellijk als brandstof verbruikt. De echte brandstoffen van een fusiecentrale, de stoffen die 'door de poort' gaan, zijn dus deuterium en lithium, zodat buiten de centrale geen transport van radioactieve brandstoffen nodig is.

Lithium is een metaal dat overvloedig beschikbaar is, en onder andere wordt gebruikt in de bekende lithiumbatterijen en in antidepressiva-medicijnen. De bekende voorraden bedragen ongeveer 15 miljoen ton in erts, en 200 miljard ton opgelost in zeewater, voldoende om voor respectievelijk 1000 jaar en 12 miljoen jaar het gehele wereldenergiegebruik te kunnen dekken op het niveau van het jaar 2002. De hoeveelheid benodigde energie om lithium te winnen is verwaarloosbaar ten opzichte van de energie die vrijkomt in de fusiereactie.

3.3 Veiligheidsaspecten

Het belangrijkste veiligheidsaspect betreft de aanwezigheid van het radioactieve tritium. Omdat het tritium in de centrale zelf wordt gemaakt, is er geen vervoer van radioactieve brandstoffen nodig buiten de centrale. Omdat steeds maar weinig tritium nodig is, kan de hoeveelheid die in de centrale aanwezig is zo laag mogelijk worden gehouden. Studies

laten zien dat zelfs in het zeer onwaarschijnlijke geval dat alle tritium in de buitenlucht terecht komt, er geen evacuatie nodig is buiten het terrein van de fusiecentrale [2].

Tritium heeft een korte halfwaardetijd van 12,3 jaar, zodat eventueel ontsnapt tritium weer relatief snel uit het milieu verdwijnt. Eventueel vrijgekomen tritium wordt niet opgeslagen in de voetselketen maar wordt snel tot ongevaarlijke concentraties verdund in het oppervlaktewater. In het lichaam heeft tritium een biologische halfwaardetijd van 10 dagen, zodat het snel wordt uitgescheiden. In een fusiecentrale zorgen verschillende fysieke barrières ervoor dat tritium niet kan ontsnappen.

In het fusieplasma is op elk moment maar heel weinig brandstof aanwezig, genoeg voor een paar minuten. Het fusieproces stopt daarom snel en zonder problemen als de brandstoftoevoer wordt gesloten. Er is bovendien geen sprake van een kettingreactie: het proces kan dus niet uit de hand lopen. Omdat er op elk moment maar weinig brandstof in het plasmavat aanwezig is, kan er in geval van een ongeluk niet genoeg energie vrijkomen om de opsluitingsbarrières te doorbreken. Het proces kan ook eenvoudig worden gestopt door de stroom door het plasma te laten dalen, zodat het plasma afkoelt.

Wat de veiligheid betreft is de complexiteit van een fusiecentrale een voordeel. Als er iets niet aan de strenge fysische voorwaarden die de fusiereactie mogelijk maken voldoet, stopt de reactie. Als bijvoorbeeld het plasma de wand raakt, of als er een storing is in het magneetveld, zal het plasma altijd afkoelen zodat de reactie stopt. Een fusiecentrale is daarom inherent veilig.

Een fusiecentrale maakt bovendien geen gebruik van uranium, plutonium, of andere splijtbare materialen, en geen van de benodigde materialen valt onder non-proliferatie verdragen. Omdat dergelijke materialen niet in een fusiecentrale thuishoren, is dat een gemakkelijk criterium voor internationale controle.

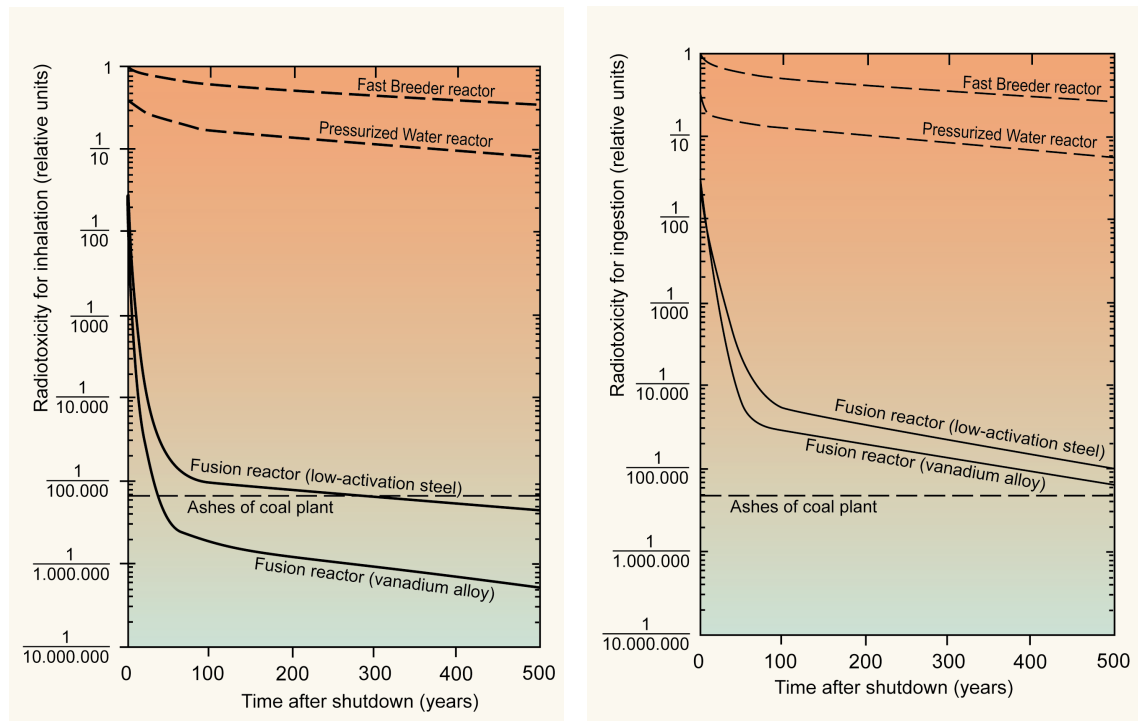
3.4 Milieu-aspecten

Het belangrijkste milieuvoordeel van fusie-energie is dat het een CO₂-vrije energiebron is, waarbij bovendien geen andere schadelijke gassen zoals SO₂ en NO_x vrijkomen. Het enige bijproduct van het fusieproces is helium, een onschadelijk, inert gas waarvan bovendien maar heel weinig van geproduceerd wordt, zo'n 250 kg per jaar voor een 1000 MW centrale.

De fusiereactie zelf veroorzaakt dus geen radioactief afval, en buiten de centrale is geen vervoer van radioactieve brandstoffen nodig. Het wandmateriaal van het plasmavat wordt bestraald met neutronen, en wordt daardoor wel radioactief. De radiologische eigenschappen zoals vervaltijd hangen af van de keus van de wandmaterialen. Er wordt onderzoek gedaan naar de materialen met de beste eigenschappen, en met een zo kort mogelijke halfwaardetijd.

Geactiveerd wandmateriaal zal door vervanging en uiteindelijke ontmanteling gedurende de levensduur van de centrale een even grote hoeveelheid afval opleveren als een kerncentrale, maar het afval is zeer verschillend van karakter. Ten eerste is de

radiotoxiciteit na een afkoelperiode van zo'n 50 tot 100 jaar ongeveer een factor 3.000 tot 100.000 lager, afhankelijk van welke materialen er voor het plasmavat worden gebruikt, en welke maat voor radiotoxiciteit wordt gebruikt (zie figuur 7). Verder heeft het afval geen actieve koeling nodig. Na die 100 jaar is de activiteit van het afval vergelijkbaar met dat van de as van een kolencentrale. Omdat er geen langlevende splijttingsproducten zijn, is de opslag en verwerking van dergelijk afval relatief eenvoudig.



Figuur 7: Radiotoxiciteit van het afval van fusiecentrales vergeleken met afval van een kerncentrale, en de as van een kolencentrale, zowel voor inademing als inname.

Een belangrijke mogelijkheid om de hoeveelheid afval verder in te perken is om het wandmateriaal na een afkoelperiode van 50 jaar opnieuw te gebruiken. Op die manier kan mogelijk tot 80% van het wandmateriaal opnieuw worden gebruikt in nieuwe fusiecentrales, en de rest kan relatief eenvoudig worden opgeslagen.

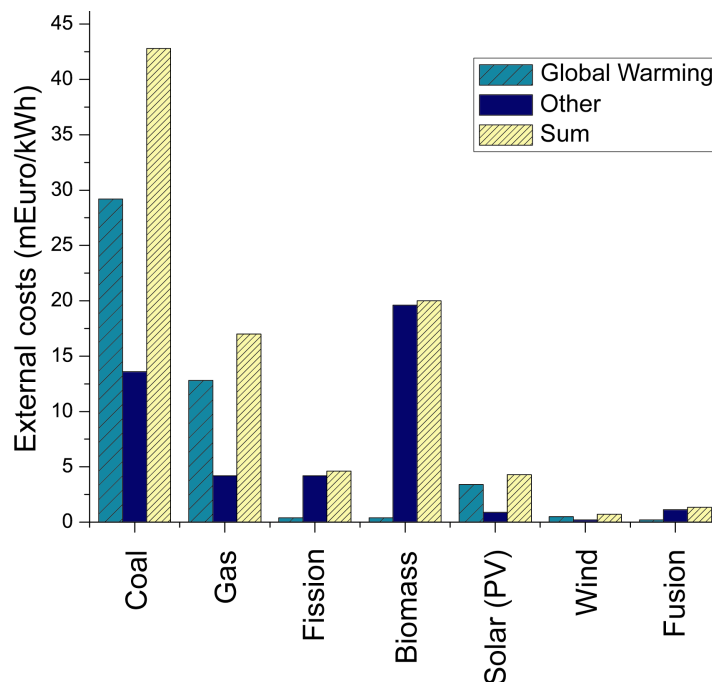
3.5 De economie van fusie-energie

In de laatste 10 jaar zijn er verschillende onafhankelijke studies verricht naar de economische aspecten van elektriciteit uit kernfusie. Hiervoor zijn standaard economische methodieken, computercodes en berekeningsmethoden gebruikt, die bovendien gecontroleerd zijn door onafhankelijke experts. De belangrijkste conclusie van die studies is dat kosten van elektriciteit uit kernfusie fusie vergelijkbaar zal zijn met die van elektriciteit uit duurzame energiebronnen [3].

Er zijn twee soorten kosten die bij elke energiebron van belang zijn: de directe kosten en de externe kosten van fusie energie. Met de directe kosten worden de kosten bedoeld die voortkomen uit de bouw, het gebruik tijdens de gehele levensduur, de brandstof, en de uiteindelijke ontmanteling van een fusiecentrale. Deze kosten komen uiteindelijk tot uiting in een kilowatt-uur prijs van de elektriciteit. De externe kosten hebben betrekking op de kosten verbonden aan milieuschade en gezondheidsschade, die door de samenleving worden gedragen.

De directe kosten van fusie-elektriciteit zijn geschat met behulp van een standaard kostenmethodologie die gebruikt wordt in OECD en IAEA studies. De totale kosten in deze methodologie worden berekend door de fusiecentrale op te delen in 80 deelsystemen waarvan de kosten individueel geschat worden. Hierbij wordt rekening gehouden met rente, vervangingskosten, bouwkosten, bedrijfskosten, en kosten om de centrale na zijn levensduur buiten dienst te stellen. Het resultaat van deze methode is dat fusie-elektriciteit tussen de 0,05 en 0,10 Euro per kWh gaat kosten, met als meest waarschijnlijke waarde 0,07 Euro per kWh. Dit is ongeveer 50% duurder dan kolen of kernsplitsing, maar is vergelijkbaar met schoon fossiel en duurzame bronnen, wanneer van de laatste de kosten voor energieopslag buiten beschouwing worden gelaten.

De bedoeling van een externe kostenanalyse is om een idee te krijgen van de negatieve gevolgen van een energietechnologie die niet in de directe kosten tot uitdrukking komen. Een methodologie hiervoor, de zogenaamde "ExternE-methode" werd al eerder door de Commissie van de Europese Unie ontwikkeld, en toegepast op vele energiebronnen. De ExternE methode kijkt naar de totale levenscyclus van een energiecentrale op een bepaalde plaats, inclusief bouw, brandstoftoelevering, bedrijf en uiteindelijke ontmanteling. Daarbij wordt gekeken naar factoren als gevaarlijke chemische en radioactieve emissies, verkeersongelukken, bedrijfsongelukken, ongelukken op de centrale met gevolgen voor de omgeving, en bedrijfsmatige blootstelling aan gevaarlijke situaties. Het resultaat van deze studie is dat fusie, samen met wind- en zonne-energie, tot de bronnen met de laagste externe kosten behoren, zoals te zien in figuur 8. De externe kosten van bijvoorbeeld olie zijn ongeveer 20 keer zo hoog.



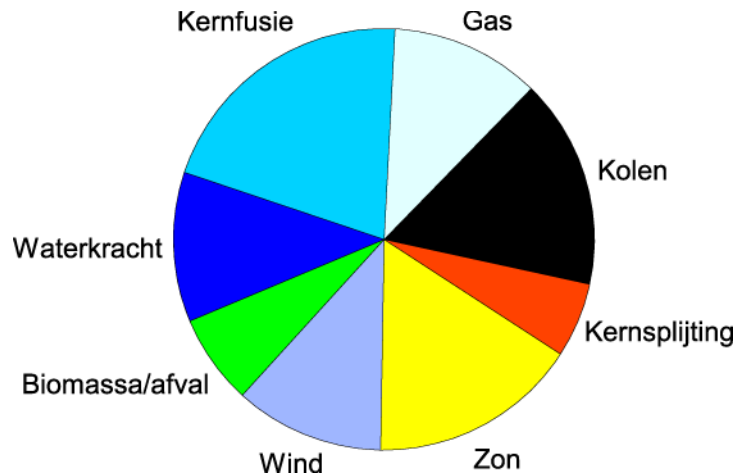
Figuur 8: Externe kosten van verschillende energiebronnen verdeelt over kosten verbonden aan de opwarming van de aarde door het broeikaseffect, en overige kosten, zoals de gevolgen van gezondheidsschade, bedrijfsongelukken en zwaveluitstoot.

3.6 Fusie in de energiemix

In de toekomst zal fusie deel uitmaken van een energiesysteem waarin verschillende bronnen elkaar aanvullen in een energiemix. De evolutie van de energiemix wordt in kaart gebracht met energiescenario's, die het gebruik en de productie van energie over een bepaalde periode in de toekomst beschrijven. Dergelijke scenario's kunnen met computermodellen worden doorgerekend. Het computermodel MARKAL bijvoorbeeld, simuleert de evolutie van de energiemarkt in West-Europa.

Het model, dat in Europa veelvuldig wordt gebruikt om energie-gerelateerde vraagstukken door te rekenen, bevat de vraag naar energie, de beschikbaarheid en implementatiesnelheid van energietechnologieën, de kosten en beschikbaarheid van energiedragers, beperkingen en belastingen op de uitstoot van schadelijke stoffen, etc. Op basis van deze gegevens ontwerpt het model energie-scenario's over een bepaalde tijdsperiode, waarbij de totale kosten van levering, distributie en gebruik van energie geminimaliseerd worden.

In Nederland heeft het ECN met behulp van het MARKAL model de rol van fusie in energiescenario's tot het jaar 2100 onderzocht. Deze en soortgelijke studies laten zien dat de rol van fusie in de energiemarkt van deze eeuw sterk afhangt van maatregelen om CO₂-uitstoot tegen te gaan. In scenario's zonder dergelijke uitstootbeperkingen kunnen fusie-energie en andere duurzame energiebronnen niet concurreren met kolen. Bij een redelijke uitstootbeperking kan fusie tot 20% van de elektriciteitsbehoefte leveren in het jaar 2100, zoals te zien in figuur 9 [4,5].



Figuur 9: Energiemix voor elektriciteitsproductie in het jaar 2100 volgens het MARKAL-model, bij gemiddelde CO₂-uitstoot reductie.

Een tweede belangrijke factor voor de toekomstige energiemix is de rol die duurzame bronnen als zon, wind, en biomassa kunnen spelen. Wat modellen als MARKAL laten zien is dat fusie en duurzame bronnen door hun verschillend karakter als continue en niet-continue bron naast elkaar kunnen bestaan, en elkaar aanvullen in een toekomstige energiemix. Daarbij is fusie vooral geschikt om een deel van de basislast van de energiebehoefte te verzorgen.

Een derde factor is de wens van veel landen om zelfstandig hun energie te kunnen opwekken en niet afhankelijk te zijn van andere landen. In een recent *green paper* van de Europese Commissie werd erop gewezen dat Europa nu zo'n 50% van haar brandstoffen importeert, en dat dit over 20 jaar tot 70% zal oplopen, als er niets verandert. Vooral met het oog op internationale spanningen ten gevolge van olie- en gasbelangen wordt dit een steeds belangrijke factor.

Een laatste factor is de ontwikkeling van de inzet van kernsplijtingsenergie, waarbij vooral de problemen rond de afvalverwerking, de proliferatie van splijtbare stoffen, de ontwikkeling van inherent veilige reactoren, en de publieke acceptatie van splijtingsenergie van belang zijn.

4. Status van het fusieonderzoek

In de vijftig jaar dat het kernfusieonderzoek nu gaande is, is enorme vooruitgang geboekt. Van een toestand van bijna complete onwetendheid op het gebied van het gedrag van hete plasma's en hoe ze beheerst kunnen worden, is men nu zover dat routinematig plasma's gemaakt kunnen worden van honderden miljoenen graden, in opstellingen op industriële schaal. In deze sectie beschrijven we kort de vooruitgang van het fusieonderzoek.

4.1 Korte geschiedenis van het fusieonderzoek

Het onderzoek naar kernfusie vond zijn oorsprong rond 1920. In dat jaar ontdekte de fysicus F.W. Aston met zeer nauwkeurige experimenten dat vier waterstof atomen

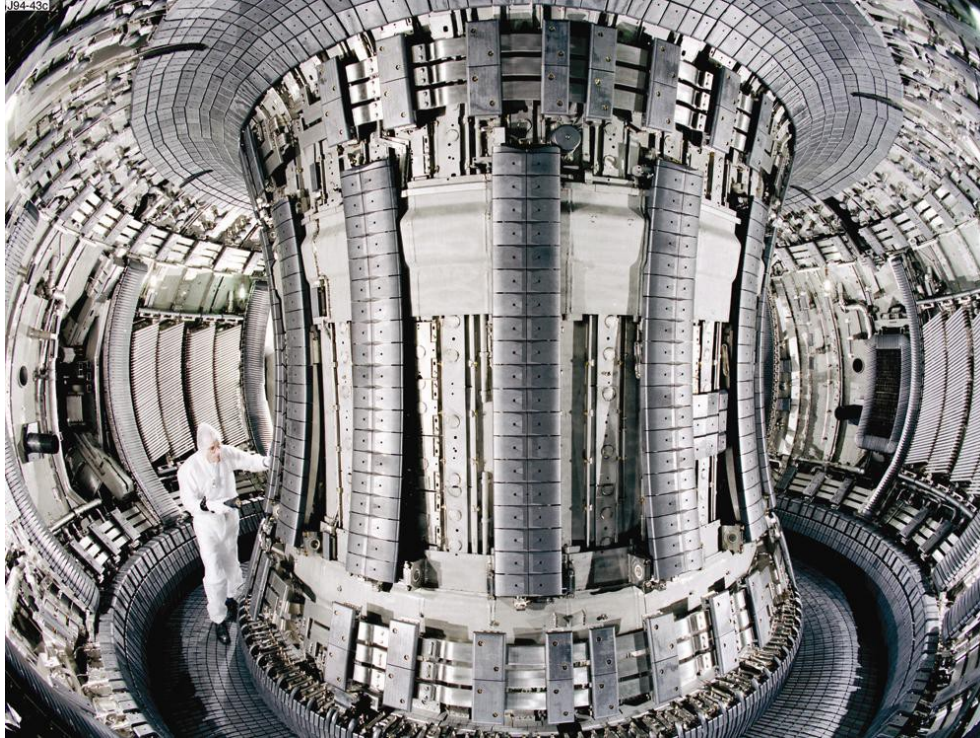
zwaarder zijn dan één helium atoom. Het belang van deze ontdekking werd onmiddellijk ingezien door de briljante Engelse astrofysicus Sir Edmund Eddington, die beseftte dat het verschil in massa betekende dat de zon kan branden door waterstof in helium om te zetten, waarbij het massaverschil van 0.7% – volgens Einsteins beroemde relatie tussen massa en energie $E=mc^2$ – in energie wordt omgezet. Berekeningen toonden aan dat de zon op die manier nog voldoende brandstof had voor miljarden jaren. Al in 1938 werden in de VS experimenten opgezet die probeerden een heet plasma met magnetische velden op te sluiten.

Kort na de tweede wereldoorlog was er een internationale golf van interesse voor het beheersen van kernfusie, en in vele landen werden experimenten opgezet. Omdat men dacht dat het onderzoek militair belang had, waren de meeste experimenten geheim, en was er nog geen sprake van internationale samenwerking. Dat veranderde in 1958, tijdens de “Atoms for Peace” conferentie in Geneve. Tijdens die conferentie onthulden vele landen, waaronder Rusland en de VS, de resultaten van hun fusieprogramma's. Men beseftte dat beheersbare fusie-energie mogelijk was, maar men beseftte ook dat ten gevolge van plasma-instabiliteiten en andere problemen het geen eenvoudige taak zou zijn.

Om de technologische en wetenschappelijke problemen het hoofd te bieden, werd eind jaren vijftig besloten het onderzoek geheel internationaal op te zetten. In Europa werden associaties opgezet tussen het Europese atoomagentschap EURATOM en de wetenschappelijke instituten van de lidstaten. In Nederland werd in 1958 het FOM-instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen opgericht, met onderzoek naar kernfusie als doel.

Een doorbraak in het kernfusieonderzoek vond plaats in 1968, toen Russische onderzoekers bekend maakten dat ze ongekende resultaten hadden bereikt met een *tokamak*: een speciale geometrie met de vorm van een torus. In 1969, nog in de koude oorlog, reisde een brits team af naar Moskou, waar ze de resultaten van hun Russische collega's bevestigden. Vanaf dat tijdstip werden er in hoog tempo overal ter wereld tokamakexperimenten ontworpen en in bedrijf genomen.

De huidige generatie moderne, grote tokamaks lagen in de jaren zeventig op de tekentafel. De Joint European Torus (JET), gelegen vlakbij Oxford in Engeland, kwam in 1983 in bedrijf. Andere grote tokamaks staan in Duitsland, Frankrijk, Japan en de VS. In de huidige generatie tokamaks worden routinematig fusieplasma's van honderden miljoenen graden opgewekt en minutenlang in stand gehouden.

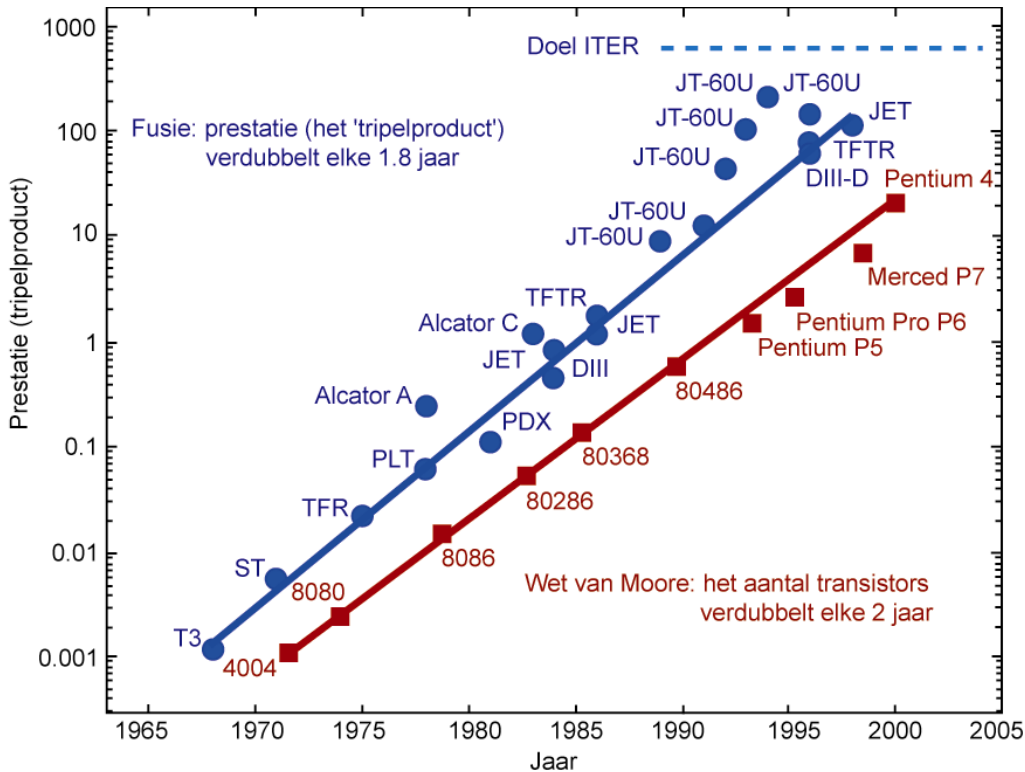


Figuur 10: Een kijkje in de torus van de Joint European Torus bij Oxford, Engeland. De persoon links op de foto toont de schaal: de torus is ongeveer vier meter hoog.

Het ontwerp van JET, het grootste fusie-experiment ter wereld, begon in 1973. In 1979 startte de bouw, en het experiment werd in 1983 in bedrijf genomen. JET was de eerste tokamak ter wereld waarin met de echte fusiebrandstof, deuterium en tritium, gewerkt werd. JET is nog steeds recordhouder van het wereldrecord opwekking fusie-energie: in 1997 werd gedurende 1 seconde 16 Megawatt opgewekt, en een continu fusievermogen van 4 MW gedurende 4 seconden. JET is nu een Europese gebruikersfaciliteit waar honderden wetenschappers uit Europa, Japan, de VS en Rusland onderzoek komen doen [6].

4.2 Vooruitgang in getallen

Er zijn drie dingen van belang in een fusieplasma: de temperatuur, de dichtheid en de tijd dat de warmte kan worden vastgehouden in het plasma. De prestatie van fusiereactoren wordt daarom afgemeten aan het product van deze drie grootheden, het zogenaamde *tripelproduct*. De beste resultaten tot nu toe zijn gehaald in JET. Belangrijk is dat de resultaten van JET al tijdens de ontwerpfase in de zeventiger jaren waren voorspeld, en dat JET volgens plan deze resultaten gehaald heeft in de negentiger jaren.

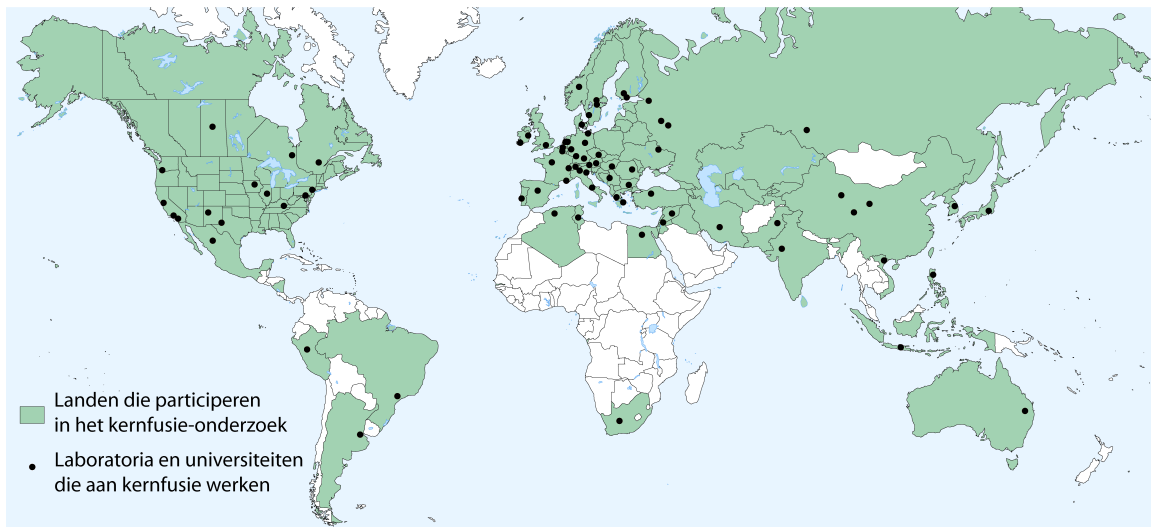


Figuur 11: De vooruitgang van het fusie-onderzoek door de jaren heen, gemeten aan de hand van het tripelproduct, dat een maat is voor de prestatie van een fusieplasma. In de grafiek is ook de ontwikkeling van computerchips weergegeven.

In figuur 11 is de toename van het tripelproduct door de jaren heen te zien. Gedurende de 40 jaar onderzoek tot nu toe is het tripelproduct met een factor 100.000 toegenomen, wat neerkomt op een verdubbeling na elke 1.8 jaar. Het hoogst gehaalde tripelproduct ligt nog ongeveer een factor 6 onder het niveau wat nodig is voor een werkende fusiecentrale. Ter vergelijking is de ontwikkeling van het aantal transistoren op computerchips afgebeeld, die al jaren aan de beroemde Wet van Moore gehoorzaamd: een verdubbeling in elke 2 jaar.

4.3 Organisatie van het fusieonderzoek

Het fusieonderzoek is geheel internationaal georiënteerd, zoals geïllustreerd in figuur 12. De wetenschappelijke uitdagingen en de kosten van grote fusie-experimenten maakten het al in een vroeg stadium van het fusie-onderzoek noodzakelijk dat meerdere landen gingen samenwerken.



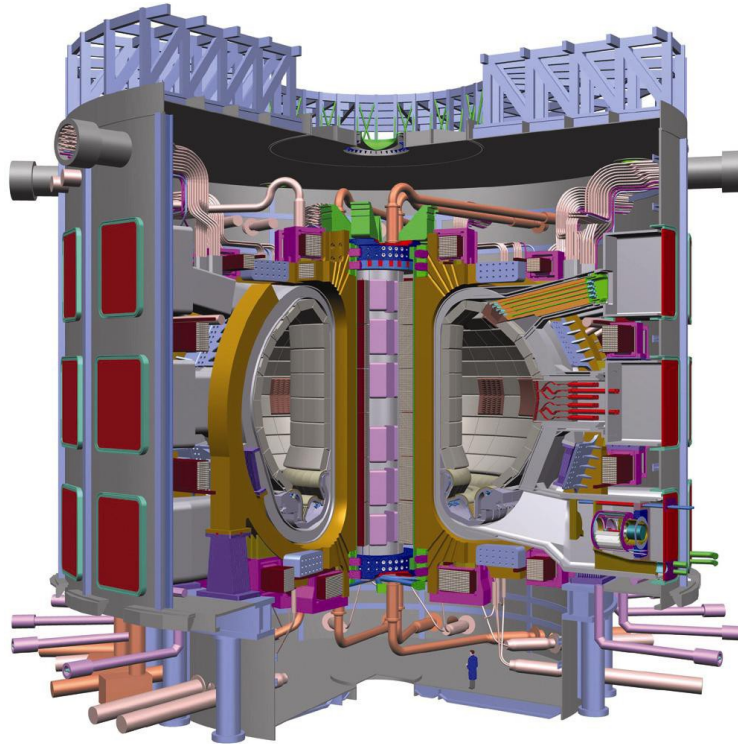
Figuur 12: Onderzoek aan kernfusie wereldwijd. De landen die participeren zijn donker gekleurd, laboratoria en universiteiten die aan kernfusie werken zijn met stippen aangegeven.

Wereldwijd hebben naast Europa vooral de VS, de Russische Federatie en Japan een sterk fusie-onderzoeksprogramma. In Europa werken zo'n 2000 wetenschappers in meer dan 20 onderzoeksinstellingen aan kernfusie. Het werk wordt gecoördineerd door de Europese commissie, vooral via samenwerkingscontracten met de onderzoeksinstellingen in de lidstaten. In heel Europa wordt ongeveer 500 miljoen Euro per jaar aan kernfusieonderzoek uitgegeven. Een groot deel daarvan, zo'n 190 miljoen, wordt via de Europese Unie gefinancierd.

In Nederland vindt onderzoek naar kernfusie plaats op twee locaties: bij het FOM-instituut voor plasmafysica Rijnhuizen te Nieuwegein, en bij de Nuclear Research & Consultancy Group (NRG) te Petten. Het onderzoek in Nieuwegein richt zich vooral op de interactie van een heet plasma met de binnenwand van het plasmavat, en op de theoretische beschrijving van het gedrag van plasma's. Zowel bij de tokamak TEXTOR in Jülich, Duitsland, als bij JET in Engeland zijn continu wetenschappers uit Nieuwegein werkzaam. In Petten richt men zich op het onderzoeken van nieuwe, hoogwaardige wandmaterialen met behulp van de hogeflux-reactor.

Behalve de belofte van een geheel nieuwe tak van industrie in de toekomst – het bouwen van fusie-energiecentrales – biedt het fusie-onderzoek mogelijkheden voor technologische ontwikkeling op andere gebieden. Vooral op het gebied van cryogene technieken, microgolfttechniek, supergeleidende materialen, *remote handling* en industrieel gebruik van plasma's heeft fusie-onderzoek de nodige spin-off.

5. De weg naar de eerste fusie-energiecentrale



Figuur 13: De International Tokamak Experimental Reactor, ITER.

5.1 ITER

ITER, de *International Tokamak Experimental Reactor*, is een internationaal samenwerkingsproject met als doel de wetenschappelijke en technische haalbaarheid aan te tonen van kernfusie als energiebron. De huidige partners in het ITER-project zijn Europa, Japan, Canada, China, de Verenigde Staten en de Russische Federatie. De Verenigde Staten, die zich in 1998 eenzijdig terugtrokken uit het ITER-project, zijn begin 2003 weer teruggekeerd. Ook China heeft zich begin 2003 als partner aangemeld. Op dit moment hebben vier landen een locatie aangeboden voor de vestiging van ITER: Frankrijk, Spanje, Canada en Japan. De beslissing over de locatie wordt dit jaar verwacht, waarna met de constructie in 2005 kan worden begonnen.

De ITER-samenwerking begon eind jaren tachtig als een initiatief van de toenmalige presidenten Reagan en Gorbatsjov. De toenmalige Sovjetunie, de VS, Japan en de Europese Unie richtten een samenwerkingsverband op onder de noemer van de International Atomic Energy Agency. Het eerste ontwerp van de ITER-machine voorzag in een fusievermogen van 1.5 Gigawatt thermisch, vergelijkbaar met dat van een toekomstige commerciële energiecentrale. Na een verzoek van de ITER-partners om een substantiële vermindering van de kosten, werd het ITER ontwerp verkleind naar een machine van 500 Megawatt. Het uiteindelijke ontwerp werd in 2001 goedgekeurd. De totale bouwkosten bedragen ongeveer 5 miljard Euro, verspreid over 10 jaar.

De fusie-experimenten van dit moment zoals JET (Culham, Engeland), JT-60 (Naka, Japan), TFTR (Princeton, USA, gesloten in 1997), en de kleinere Europese machines,

hebben een grote hoeveelheid kennis opgeleverd over de technologie en fysica van kernfusie. De volgende stap is om de fysica van brandende plasma's op de schaal van een energiecentrale te bestuderen, en om de technologie te testen die fusie als veilige en betrouwbare energiebron beschikbaar maakt. In ITER zullen bijvoorbeeld mantelmodules getest worden voor de tritiumproductie en voor het opvangen van de geproduceerde warmte. Om deze doelen te bereiken, zal ITER een stuk groter zijn dan de grootste huidige tokamak, JET. Deze extrapolatie is mogelijk door de solide basis die de diverse internationale experimenten hebben gelegd, en een gedegen kennis van de fysische principes die aan de tokamak ten grondslag liggen.

ITER wordt een tokamak-machine met een fusievermogen van 500 MW thermisch en een inputvermogen van 50 MW, zodat de energie-vermenigvuldiging $Q=10$ bedraagt. De tijdsduur van het plasma bedraagt 500 seconden, wat met geavanceerdere technieken uit te breiden is tot zo'n 3000 seconden. ITER is ongeveer 24 meter hoog en 34 meter in doorsnede, en het plasmavolume bedraagt 850 m³. De straal van de torus is ongeveer 6 meter, en de plasmakamer is ongeveer 8 meter hoog.

5.2 Materiaalonderzoek in IFMIF

Om van fusie een duurzame, milieuvriendelijke en economisch aantrekkelijke energiebron te maken is het noodzakelijk om materialen te ontwikkelen die bestand zijn tegen de condities in een fusiecentrale. De materialen moeten zo weinig mogelijk radioactief worden geactiveerd, en de activatie die plaatsvindt, mag niet lang-levend zijn. Verder moeten de materialen stralingsbestendig zijn, en niet bros worden door de sterke neutronenflux die het fusieplasma produceert. Lage-activatie bouwstaal en vanadiumlegeringen met goede fysische eigenschappen zijn al geproduceerd, en bestralingstesten worden inmiddels uitgevoerd. Dergelijke testen worden onder andere uitgevoerd in de hoge-flux reactor in Petten.

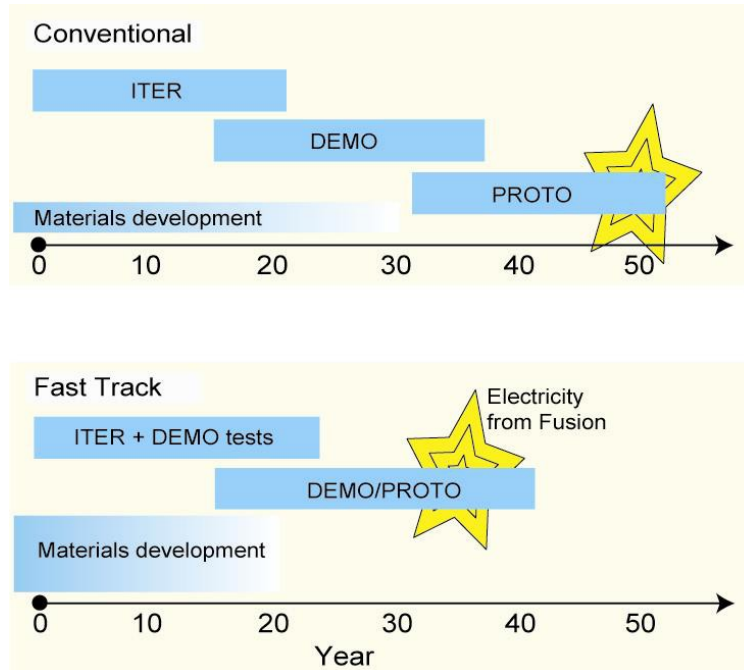
Om dergelijke materialen onder fusie-condities te onderzoeken zijn testen nodig met een hoog-energetische, hoge-intensiteit neutronenbron, zoals de International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF), waarvan de eerste ontwerpen op dit moment in ontwikkeling zijn.

5.3 DEMO

Het 'conventionele' tijdspad voor elektriciteitsproductie met fusie gaat uit van drie achtereenvolgende generaties machines: (1) de 'volgende stap' ITER, (2) een fusiecentrale die de technische haalbaarheid, betrouwbaarheid van bedrijf en economische aantrekkelijkheid van fusie-energie demonstreert, DEMO, en (3) een eerste prototype commerciële fusiecentrale, PROTO. DEMO zou 35 jaar na het begin van de bouw van ITER netto elektriciteitsproductie kunnen bereiken, en fusie kan dan rond het midden van deze eeuw klaar zijn voor commerciële inzet. Dit referentie-tijdspad gaat uit van de parallelle ontwikkeling van geschikte constructiematerialen.

Midden 2001 publiceerde een groep onafhankelijke experts, voorgezeten door David King (hoofd wetenschappelijk adviseur van premier Tony Blair van het Verenigd Koninkrijk), een rapport waarin een snellere ontwikkeling van commerciële fusie-energie

wordt aanbevolen. Dit zogenaamde ‘Fast Track’, afgebeeld in figuur 14, zou de ontwikkelingstijd bekorten door een aantal stappen te combineren, en deels parallel uit te voeren. Vooral het combineren van DEMO en PROTO in een enkele stap lijkt een aantrekkelijke optie, waarbij de gecombineerde machine ontworpen moet worden als een geloofwaardig prototype van een energieproducerende fusiecentrale. Deze mogelijkheid hangt sterk af van de ontwikkeling van geschikte materialen.



Figuur 14: Het tijdpad naar elektriciteit uit fusie-energie. Boven: het ‘conventionele’ tijdpad, onder het fast track tijdpad

Als de “Fast Track” wordt gevolgd, kan elektriciteit uit fusie over 35 jaar na de start van de bouw van ITER beschikbaar zijn voor commerciële inzet, zodat grootschalige energieproductie halverwege deze eeuw kan beginnen. Uiteindelijk zouden de totale kosten om het lange-termijn doel te realiseren substantieel verlaagd kunnen worden, maar wel met de prijs van verhoogde korte-termijn financiering.

Ook buiten Europa wint het *fast track* tijdpad terrein: volgend op een vraag van het Ministerie voor Energie van de Verenigde Staten, heeft de Amerikaanse adviescommissie voor fusie, FESAC, een rapport gepubliceerd met een gedetailleerd plan om over 35 jaar elektriciteit uit fusie aan het net te leveren.

Dit tijdpad – de ontwikkeling van een demonstratie fusiecentrale in 35 jaar – veronderstelt de tijdige ontwikkeling van materialen die geschikt zijn voor gebruik in fusiecentrales. Daarvoor is nodig dat de materiaalonderzoeksfaciliteit IFMIF parallel aan ITER gebouwd wordt, zodat voor de generatie fusiecentrales na ITER de benodigde materialen beschikbaar komen.

Noten

- 1) Voor een algemene introductie over fusie en plasma's: H. Wilhelmsson, *Fusion, a Voyage through the Plasma Universe*, IoP Publishing, Bristol, 2000.
- 2) I. Cook *et al.*, *Safety and Environmental Impact of Fusion*, EFDA-S-RE-1, April 2001.
- 3) G. Borelli *et al.*, *Socio-Economic Research on Fusion, Summary of EU Research 1997-2000*, EFDA-RE-RE-1, July 2001.
- 4) P. Lako, J.R. Ybema, en A.J. Seebregts, *Long-term Scenarios and the Role of Fusion Power*, ECN-C-98-095, Petten, February 1999.
- 5) P. Lako, J.R. Ybema, en A.J. Seebregts, *The Long-term Potential of Fusion power in Western Europe*, ECN-C-98-071, Petten, December 1998.
- 6) Voor een overzicht van vijftig jaar fusie-onderzoek: C.M. Braams en P.E. Stott, *Nuclear Fusion, Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research*, IoP Publishing, Bristol, 2002.

Internetbronnen

- www.fusie-energie.nl: Nederlandse webpagina over kernfusie
www.rijnh.nl: Homepage van het FOM-instituut voor plasmafysica 'Rijnhuizen'
www.efda.org: Startpunt voor het Europees Fusie programma
www.iter.org: Homepage van het 'volgende stap' experiment ITER
www.jet.efda.org: Het grootste fusie-experiment ter wereld, JET in Culham, Engeland.
www.fusion.org.uk: Algemene informatie over fusie

Informatie auteur:

Dr. ir. M.T. Westra
Wetenschapsvoorlichter
FOM-instituut voor plasmafysica 'Rijnhuizen'
Postbus 1207
3430 BE Nieuwegein
Tel. 030-6096999
Email: m.t.westra@rijnh.nl