

Kernfusie vergt geduld



Dubbelwandig reactorvat
Het vacuümvat bevat plasma van 110 miljoen graden Celsius.

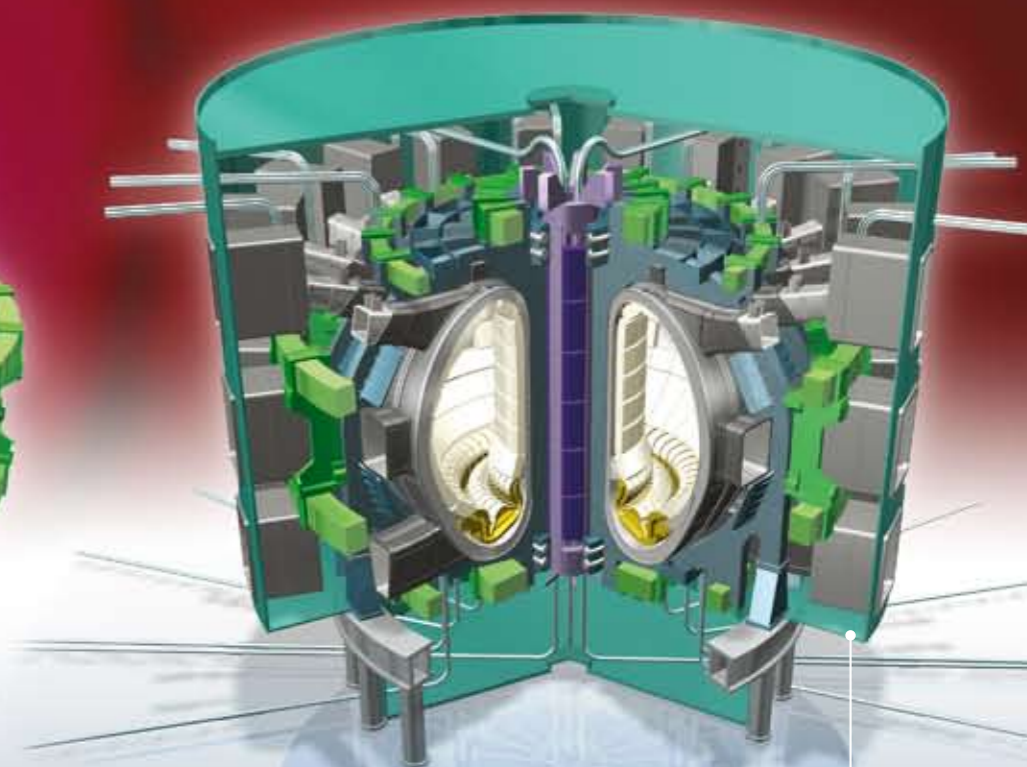


Achttien toroïdale magneetspoelen



Zes centrale transformatorspoelen

Zes poloïdale magneetspoelen



Mens
1.85 m hoog

Cryostaat
Koelvat van 24 m hoog en 28 m doorsnede.

Nu onze energievoorziening onzekerder is dan ooit staan alle alternatieven voor fossiele brandstoffen in de belangstelling. Ook kernfusie. Volgend jaar begint na jaren politiek talmen de bouw van de experimentele fusiereactor ITER. Is het mogelijk het ontwikkelingstraject te bekorten? Als de olieprijs hoog is,

groeit het budget voor fusie-onderzoek. Het leren beheersen van de ultieme energiebron is echter niet zozeer een kwestie van geld maar vooral van tijd. Een inventarisatie van de resterende technologische uitdagingen.

■ Kernfusie is een volledig nieuw energieopwekkingsstelsel en het is er niet voor morgen. Het zal al heel mooi zijn als tegen het einde van de 21e eeuw tien procent van de wereldenergie kan worden geleverd door kernfusie. Dat komt neer op zo'n tweeduizend fusiereactoren wereldwijd."

"Aan het woord is prof dr ir Roger Weynants van de Koninklijke Militaire School in Brussel, verantwoordelijk voor het fysieke onderzoek aan kernfusie in België. "Tot die tijd zullen we andere energiebronnen zoals kernsplijting nodig hebben om aan de vraag te voldoen. De mensen die zeggen dat kernfusie het energieprobleem reeds in deze eeuw zal oplossen, die dromen." Een nieuwe energietechnologie moet zijn plek in de samenleving veroveren, legt Weynants uit. Hoe lang duurt het niet voordat we met de dynamo echt grootschalig elektriciteit gingen opwekken? "In de toekomst zullen we van meer uiteenlopende energiebronnen gebruikmaken dan nu. Ooit kunnen we waarschijnlijk dertig procent van onze energiebehoefte met kernfusie dekken."

ITER, die de komende jaren in Frankrijk wordt gebouwd, is een volgende stap in onderzoek dat bijna vijftig jaar geleden is gestart. Op 21 november was de ondertekening van het ITER-verdrag. Ruim twintig jaar nadat Ronald Reagan en Michael Gorbatsjov het idee lanceerden voor dit internationale project kan ITER (Lat.: de weg, oorspronkelijk een acronym van International Tokamak Experimental Reactor) nu echt van start gaan. In 2007 rest slechts nog de ratificatie door de diverse landen. In juni 2005 werd, na jarenlang gesteggel, het Franse Cadarache gekozen als de vestigingsplaats. Een Europese organisatie, Fusion for Energy, coördineert vanuit Barcelona de Europese bijdrage aan ITER. Japan, dat lang op de vestigingsplaats heeft geaasd, mag als troostprijs een relatief groot deel van de staf leveren. Tot directeur-generaal van ITER is inmiddels Kanama

"Fusie is moeilijk, veel moeilijker wellicht dan het ruimtevaartprogramma. Daarom moet het wel langer duren."

Ikedo, voormalig Japans ambassadeur in Kroatië, benoemd. Nu al het papierwerk klaar is kan midden volgend jaar de eerste spade in de grond, hoopt dr Tony Donné, fusiefysicus en werkzaam voor het FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen te Nieuwegein. "Dan duurt het nog circa tien jaar voordat het apparaat kan werken." De fusiereactor is een ringvormig vacuümvat waarin deuterium- en tritiumkernen (waterstofkernen met respectievelijk een en twee extra neutronen) met elkaar moeten fuseren. Bij die reactie ontstaan een heliumkern en een neutron, en een flinke dosis energie. Die energie moet in toekomstige reactoren, de generatie na ITER, via verhitting van water leiden tot aandrijving van stoomturbines en daarmee de zo broodnodige elektriciteit opwekken.

De kritiek van buitenstaanders is dat het wel erg lang duurt voordat het onderzoek iets oplevert. Weynants, hoofd van het laboratorium voor plasmafysica aan de Koninklijke Militaire School, wijst dat aan het feit dat de schatting uit de jaren vijftig dat we er vijftig jaar over zouden doen naïef was. "Fusie is moeilijk, veel moeilijker wellicht dan het ruimtevaartprogramma. Daarom moet het wel langer duren."

Weynants schat dat sinds 1960 tien à vijftien jaar is verloren door trage besluitvorming. Eerst binnen Europa in het geval van de voorganger van ITER, de Joint European Torus (JET). "Nadat ITER in 1998 als te duur was afgewezen, volgde daarop in 2001 een ontwerp voor het huidige afgeslankte model, en ook daarmee is tijd verloren gegaan." Vooruitgang is alleen mogelijk met steeds grotere en dus duurdere machines. "Het heeft geen

Voor niets gaat de zon op

De tien jaar durende constructie kost circa 4,7 miljard euro, waarvan Europa – de initiator van het experiment – ruim de helft voor haar rekening neemt. Een groot deel van de bijdragen van de diverse landen is in natura – de kostbare onderdelen van de reactor die zij ontwikkelen. Met name de industrie zal een belangrijk deel van de bijdragen gaan leveren. De twintig jaar dat ITER vervolgens moet draaien, zal ook nog eens vijf miljard euro kosten. Tegen de tweeduizend wetenschappers zullen in Cadarache werken aan de fusiereactor, en daarnaast voorziet de organisatie nog een drieduizend banen aan ondersteunend personeel.

Frankrijk en de EU delen de kosten voor een vijfde van de kosten van de constructie van ITER, waaronder gebouw, faciliteiten, cryostaat en spoelen. De overige viervijfde van de kosten wordt gedeeld door alle partners. Tijdens de onderhandelingen over de vestigingsplaats is afgesproken dat de EU en Japan beide een kwart van deze gedeelde kosten voor hun rekening nemen, en de rest verdeeld over de overige partners (Verenigde Staten, Rusland, Japan, China en Zuid-Korea). Dankzij de deelname van India aan het project is de bijdrage van Japan en de EU iets verlaagd. Frankrijk en de EU zullen voor hun deel van het project uitnodigingen voor bijdragen door de industrie laten uitgaan, de zogenaamde call for tenders.

Einstein

In de 20e eeuw ontstaat inzicht in de energievoorziening van de zon. Albert Einstein ontdekte de bekende formule $E=mc^2$ bij zijn formulering van de speciale relativiteitstheorie. Nadat Francis William Aston in 1920 ontdekte dat helium minder massa heeft dan vier waterstofatomen, besefte Sir Arthur Eddington dat wellicht de zon waterstofatomen omzet in helium en daarbij 0,7% van de waterstofmassa in energie omzet. Aan de vooravond van de Tweede Wereldoorlog, in 1939, publiceert Hans Bethe een kwantitatieve theorie voor deze opwekking van energie door middel van fusie in sterren.

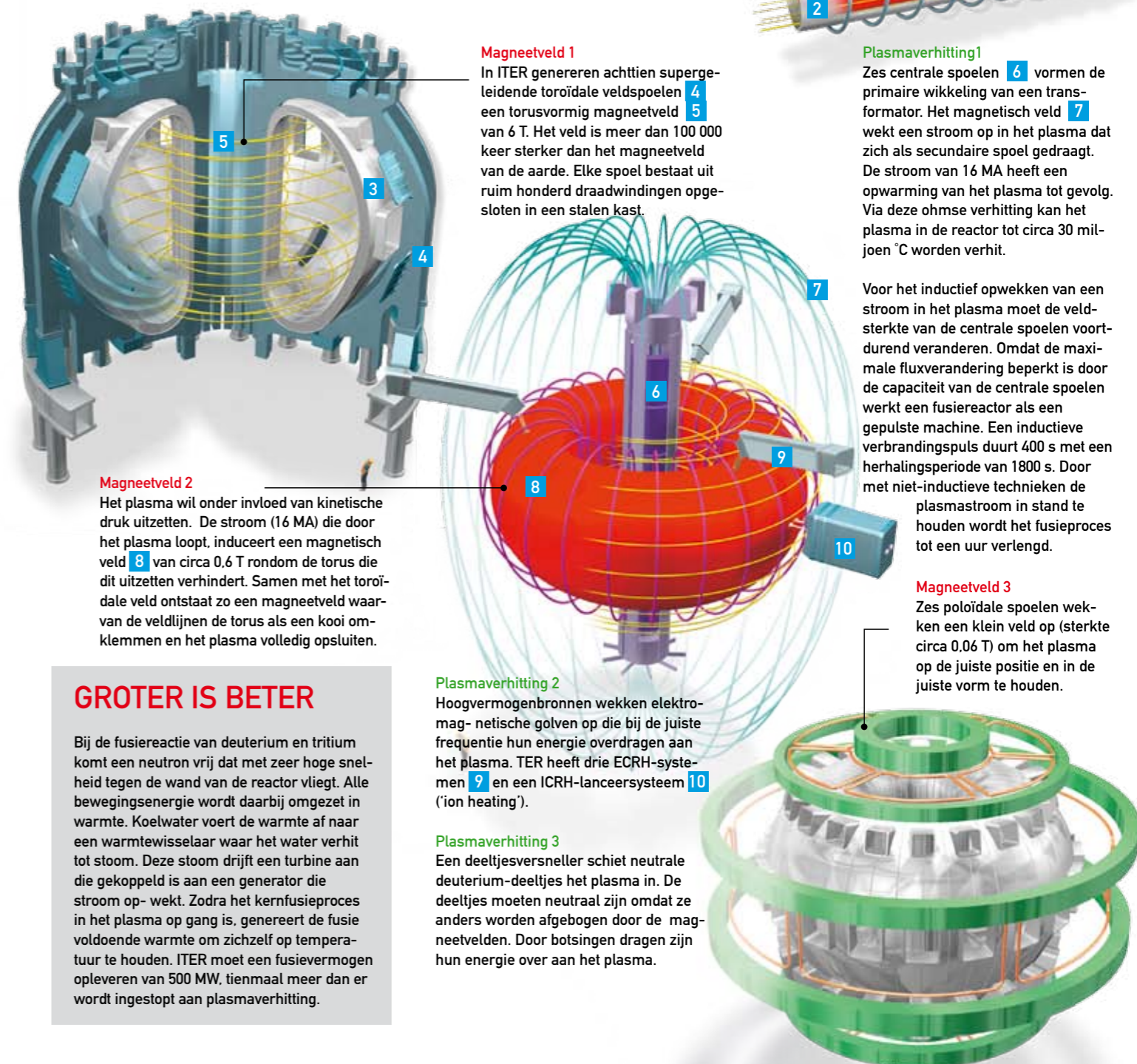
zin om verder te gaan voordat men voldoende heeft geleerd van het vorige experiment, en dat vraagt tijd. Ga je in de fysica van -10°C naar +10°C, dan kan er al veel veranderen, zoals water dat van vaste naar vloeibare toestand gaat. Maar ga je van 10.000 kelvin naar 100.000.000 kelvin (zoals dat in plasmafysica nodig was) dan stuit je op veel nieuwe dingen op fysisch gebied. Dat bemoeilijkt een snelle vooruitgang."

De grootste fusiereactor ter wereld, JET, staat nu in Engeland. Hij ging eind jaren tachtig in bedrijf. Deze reactor – net zoals ITER gebaseerd op een ringvormig vat (tokamak) waarin magneten het plasma op zijn plaats houden - heeft veel kennis opgeleverd. Maar fusie van deuterium en tritium heeft nauwelijks plaatsgevonden in JET. Bij die brandstofcombinatie kan tritium de wand van het vat radioactief maken en dat belemmert het fundamentele onderzoek. De natuurkundigen werken bij JET de afgelopen twintig jaar daarom vooral met waterstof – en deuteriumplasma's. In ITER moet wel fusie van deuterium en tritium op grote schaal plaatsvinden. JET heeft maximaal vierentwintig procent geleverd van het vermogen dat er werd ingestopt. Vijftientig megawatt aan ingevoerd vermogen leverde zestien megawatt fusie-vermogen op. In ITER zal het plasma tien keer meer vermogen leveren dan er wordt ingestopt: netto zo'n vijfhonderd megawatt. De meeste gangbare elektriciteitscentrales leveren 400 tot 2000 megawatt. ▶

Bij zeer hoge temperaturen vallen moleculen uiteen in kernen en elektronen. De geladen deeltjes in dit plasma bewegen alle kanten op. Als twee positief geladen kernen elkaar heel dicht naderen, worden zij door de kernkrachten naar elkaar getrokken en gaan ze fuseren. De twee kernen smelten samen tot nieuwe deeltjes die samen lichter zijn dan de uitgangskernen. De afname van de massa gaat gepaard met een grote bewegingsenergie van de fusieproducten. Op aarde is kernfusie mogelijk met isotopen van waterstof: deuterium en tritium. Om het extreem hete plasma van de wanden van een reactorvat te houden worden sterke magnetische velden gebruikt. De basis van deze techniek is het verschijnsel dat geladen deeltjes in een spiraalvormige baan de veldlijnen van een magneetveld 1 volgen.

Zo is een elektrische stroom door een spoel 2 om een buis voldoende om het plasma van de buiswand te houden. Door de buis in een torusvorm 3 te leggen worden de uiteinden van de buis geëlimineerd, zodat ook daar geen warmteverliezen optreden. Een torusvormige reactorvat heet een tokamak (Russisch voor magnetische toroïdale kamer).

Bij 150 miljoen °C is de elektrische weerstand van het dunwandige stalen reactorvat veel groter dan van het plasma: een opgewekte stroom (zie Plasmaverhitting 1) gaat door het plasma lopen. Bij verstoringen in het plasma daalt lokaal de plasmatemperatuur en daarmee de geleiding van het plasma. De stromen zoeken de weg van de minste elektrische weerstand en gaan door het reactorvat lopen. Als deze stromen lood- recht op het zeer sterke toroïdale veld staan, ontwikkelen zich grote lorentzkrachten (tot 80 MN) tussen het vat en de toroïdale spoelen. Om deze krachten op te vangen zijn de toroïdale spoelen stevig verankerd. Deze spoelen vormen het mechanische frame van de reactor. Het reactorvat en de andere spoelen steunen op de toroïdale spoelen.



Magneetveld 1

In ITER genereren achttien supergeleidende toroïdale veldspoelen 4 een torusvormig magneetveld 5 van 6 T. Het veld is meer dan 100 000 keer sterker dan het magneetveld van de aarde. Elke spoel bestaat uit ruim honderd draadwindingen opgesloten in een stalen kast.

Magneetveld 2

Het plasma wil onder invloed van kinetische druk uitzetten. De stroom (16 MA) die door het plasma loopt, induceert een magnetisch veld 8 van circa 0,6 T rondom de torus die dit uitzetten verhindert. Samen met het toroïdale veld ontstaat zo een magneetveld waarvan de veldlijnen de torus als een kooi omklemmen en het plasma volledig opsluiten.

GROTER IS BETER

Bij de fusiereactie van deuterium en tritium komt een neutron vrij dat met zeer hoge snelheid tegen de wand van de reactor vliegt. Alle bewegingsenergie wordt daarbij omgezet in warmte. Koelwater voert de warmte af naar een warmtewisselaar waar het water verhit tot stoom. Deze stoom drijft een turbine aan die gekoppeld is aan een generator die stroom opwekt. Zodra het kernfusieproces in het plasma op gang is, genereert de fusie voldoende warmte om zichzelf op temperatuur te houden. ITER moet een fusievermogen opleveren van 500 MW, tienmaal meer dan er wordt ingestopt aan plasmaverhitting.

Plasmaverhitting 2

Hoogvermogenbronnen wekken elektromagnetische golven op die bij de juiste frequentie hun energie overdragen aan het plasma. ITER heeft drie ECRH-systemen 9 en een ICRH-lanceersysteem 10 ('ion heating').

Plasmaverhitting 3

Een deeltjesversneller schiet neutrale deuterium-deeltjes het plasma in. De deeltjes moeten neutraal zijn omdat ze anders worden afgebogen door de magnetische velden. Door botsingen dragen zij hun energie over aan het plasma.

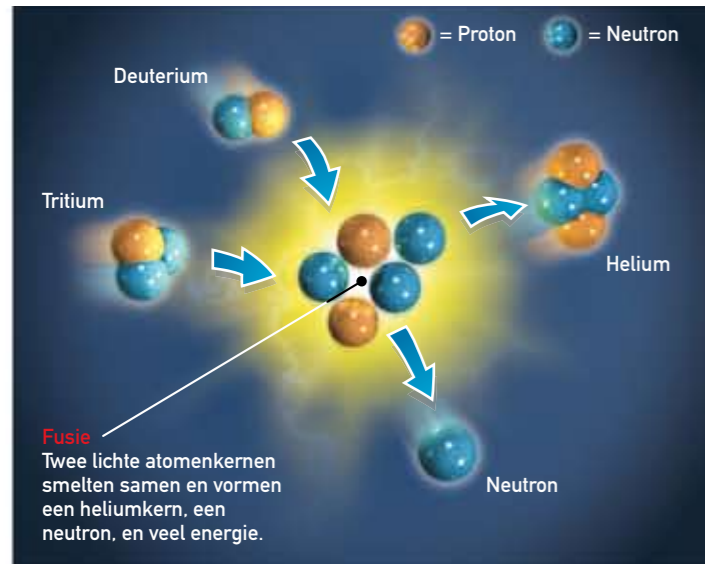
Plasmaverhitting 1

Zes centrale spoelen 6 vormen de primaire wikkeling van een transformator. Het magnetisch veld 7 wekt een stroom op in het plasma dat zich als secundaire spoel gedraagt. De stroom van 16 MA heeft een opwarming van het plasma tot gevolg. Via deze ohmse verhitting kan het plasma in de reactor tot circa 30 miljoen °C worden verhit.

Voor het inductief opwekken van een stroom in het plasma moet de veldsterkte van de centrale spoelen voortdurend veranderen. Omdat de maximale fluxverandering beperkt is door de capaciteit van de centrale spoelen werkt een fusiereactor als een gepulste machine. Een inductieve verbrandingspuls duurt 400 s met een herhalingsperiode van 1800 s. Door met niet-inductieve technieken de plasmastroom in stand te houden wordt het fusieproces tot een uur verlengd.

Magneetveld 3

Zes poloïdale spoelen wekken een klein veld op (sterkte circa 0,06 T) om het plasma op de juiste positie en in de juiste vorm te houden.



► ITER zal daarmee nog geen stroomopwekken met stoomturbines. Dat is weer de volgende stap. Het gaat er nu om te leren hoe een kernfusiecentrale lang achter elkaar energie kan leveren: welke bouwmaterialen heb je dan nodig. Weynants: "Met JET hebben we bewezen dat we de kachel kunnen aansteken. Met ITER moeten we gaan bewijzen dat de kachel kan blijven branden zonder dat ie kapot gaat. DEMO moet het daarna werkelijk doen en aantonen dat fusie-energie economisch verantwoord is."

Energiecrisis De verwachte tekorten aan fossiele brandstoffen en zorgen over de uitstoot van broeikasgassen spelen een rol bij de planning van het toekomstige onderzoek, legt Donné uit. Afhankelijkheid van het Midden-Oosten en Rusland brengt toenemende onzekerheid. Europa heeft nauwelijks eigen energievoorraden en de energiehonger van landen zoals China en India verergert dat alleen maar.

Donné: "We merken al decennia dat het fusiebudget is gekoppeld aan de olieprijs. In de jaren zeventig, na de oliecrisis van 1973, kwam ruim geld beschikbaar voor JET. In de jaren negentig was het budget minder." Sommige politici vroegen zich zelfs af of het niet voor de helft van het geld kon. "Politici denken in termen van tweemaal vier jaar, niet verder."

Donné is nu evenwel meer hoopvol: "Er is de laatste tijd sprake van een stroomversnelling, vroeger voorzagen men na DEMO nog een PROTO. Een fast track approach waarin parallel aan ITER materiaalonderzoek plaatsvindt, maakt in de volgende stap de combinatie DEMO en PROTO mogelijk. Daarmee verkorten we het traject naar kernfusie als volwaardige energiebron met tien tot vijftien jaar." Kan extra geld dit traject nog verder verkorten? Volgens Weynants maar in beperkte mate. Een verdubbeling of een vervijfvoudiging van het budget zal de termijn niet evenredig verkorten. Het duurt hoe dan ook tot 2016 voordat het eerste plasma in ITER kan worden opgewekt. De geplande bedrijfsduur van ITER is twintig jaar.

De fusiereactie levert, met als bron voor de grondstoffen slechts enkele liters water en een half pond lithiumhoudend gesteente, evenveel energie als duizend liter olie. Een fusiereactor van een gigawatt (1000 MW) produceert jaarlijks 250 kilogram onschadelijk heliumgas, waar een kolencentrale met hetzelfde vermogen tegen de tien miljard kilogram koolstofdioxide uitstoot. China plaatst voor de groeiende vraag naar energie maandelijks een nieuwe energiecentrale met zo'n vermogen.

De energieopbrengst van fusie is een veelvoud van wat chemische reacties aan energie opleveren. Zo resulteert de verbranding van twee koolstofmonoxiedemoleculen met zuurstof in een energie van tien elektronvolt. Daarentegen levert de reactie van twee zware waterstofkernen in een fusiereactor een miljoenmaal meer energie. De hoeveelheid benodigde brandstof is navenant minder. Deuterium en tritium reageren in het plasma tot een heliumkern en een neutron, en 17,6 mega-elektronvolt aan kinetische energie. Daarna reageert het neutron met lithium-6 in de reactorwand, waarbij weer tritium ontstaat en 4,78 mega-elektronvolt. Er is veel vermogen nodig om de juiste reactiecondities te bereiken.

In het centrum van de ITER-reactor – zeg maar het klokhuis – bevinden zich zes centrale spoelen van niobiumtin, Nb₃Sn. Als daardoor een veranderde stroom gaat lopen, ontstaat een magnetische flux, een veranderend magneetveld. Dat werkt op zijn beurt een stroom op in het plasma. Het is in feite een transformator waarin de primaire spoel zich buiten het vat bevindt en het plasma in het vat als secundaire spoel werkt: Een stroompuls in de primaire spoel induceert een secundaire stroom in het plasma. Door de ohmse weerstand verhit de stroom het plasma. Daarnaast wordt energie in het plasma gepompt via radiogolven, net zoals een magnetron een beker melk verwarmt. Is eenmaal een hoge temperatuur en de juiste druk bereikt, dan komt het kernfusieproces op gang. Dit is geen kettingreactie, zoals bij kernsplijting. Wel helpt de vrijkomende energie om het plasma in conditie te houden.

De levering van energie door het plasma in een experimentele tokamak gebeurt in pulsen omdat de stroom in de primaire

spoel immers niet eindeloos kan toe- en afnemen. Door de primaire spoel supergeleidend te maken door hem tot bijna het absolute nulpunt af te koelen, is de weerstand vrijwel afwezig waardoor de stroom heel lang kan toe- en afnemen. In huidige tokamaks is zo een pulsduur van enkele tientallen seconden al zeer geslaagd, in ITER zal het plasma in pulsen van meer dan tien minuten lang energie moeten opwekken.

Het plasma en de onderdelen van de reactor die met tritium in aanraking komen, zijn geïsoleerd van de omgeving. Daartoe dienen diverse isolatiezones, verontreiniging van het binnenste van de fusiereactor met stof moet zoveel mogelijk worden voorkomen. Allereerst is het vacuümvat dubbelwandig uitgevoerd. De cryostaat, die de magneten op extreem lage temperatuur houdt, is een tweede zone. Daaromheen bevinden zich drie meter dikke muren.

De thermische isolatie van het fusievat dient vooral om de warmte vast te houden. Waar in het plasma de temperatuur hoger is dan honderd miljoen kelvin, is langs de wand de temperatuur beduidend lager, hooguit circa 650°C. Dergelijke temperaturen kunnen onmogelijk de gebruikte materialen in de vatwand, cryostaat en betonnen wanden beschadigen. De fusiereacties moeten plaatsvinden bij een temperatuur van honderd miljoen tot tweehonderd miljoen kelvin. Er bestaan geen materialen op aarde die bestand zijn tegen zo'n hoge temperatuur. De enige manier om het plasma op te sluiten, is daarom in een sterk magneetveld. Het plasma bestaat immers uit volledig geïoniseerde deeltjes, die dankzij hun lading bewegen langs de veldlijnen van een magneetveld.

Waar in het plasma de hoogste temperatuur op aarde heerst, ►

Microgolven temmen plasma

De Upper Port Launcher zorgt voor de opwarming van het plasma met millimetergolven. Een soort magnetron, een gyrotron, wekt ver buiten de reactor een bundel elektromagnetische millimetergolven met een hoog vermogen. Via ronde golfpijpen bereiken de golven via een vaste spiegel een beweegbare spiegel. Een schuif- en draai beweging verandert de oriëntatie van de spiegel enkele graden, waardoor de richting van de weerkaatste bundel verandert en deze naar spiegels in het vacuümvat kan worden gestuurd. De beweegbare spiegels zijn afgescheiden van het ITER-vacuüm door een venster gemaakt van kunstmatig opgegroeid diamant. Dit diamantvenster kan goed warmte geleiden en is zeer sterk, terwijl de bundel golven bij passage nauwelijks aan intensiteit verliest. Ook het venster is watergekoeld. Doordat de spiegels en alle kwetsbare bewegende delen buiten het vacuümvat blijven, kunnen er geen deeltjes uit het plasma op de bewegende onderdelen neerslaan. Dat maakt het hele systeem zo betrouwbaarder.

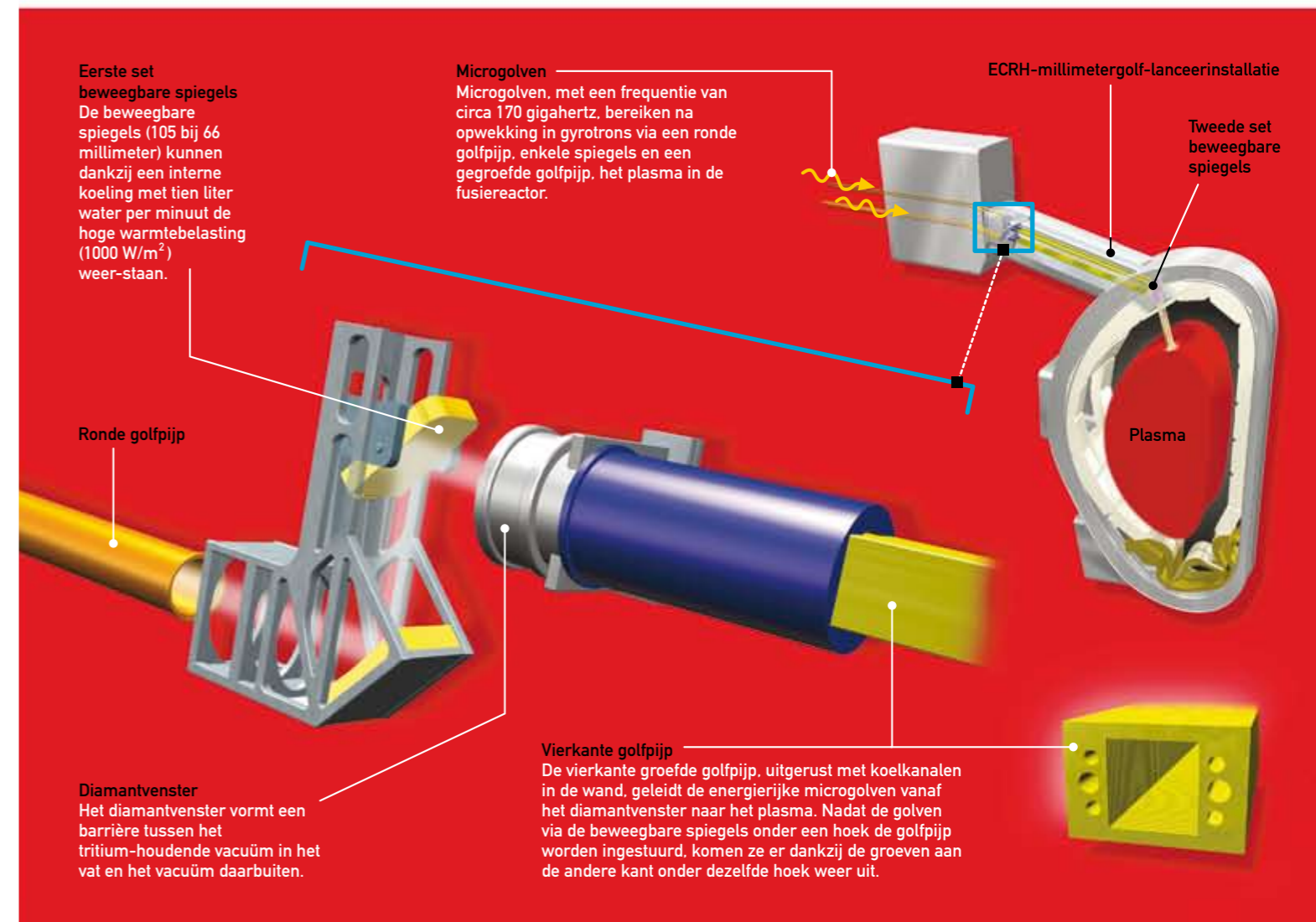
China

China – dat met de VS in 2003 toetrad tot de deelnemende landen – meldde onlangs dat het in het fusieproject EAST waterstofplasma heeft opgewekt, bij een stroom van 220 kiloampère.

Technisch haalde die prestatie het niet met wat is bereikt in Textor, in het Duitse Jülich, en in JET. In de fusiereactor Textor kan een stroom lopen van 250 kiloampère. Kernfusiefysici verwachten dat de Chinese onderzoekers de performance van EAST het komende jaar snel zullen opvoeren, zodat hun plasmastroom de prestaties bij Textor zal overtreffen. Bij JET is deze stroomsterkte zeven mega-ampère. In ITER zal de stroomsterkte vijftien mega-ampère bedragen.

België

Weynants leidt het fysisch fusie-onderzoek in België. Daarnaast is aan de Universiteit Libre, eveneens in Brussel, het theoretisch onderzoek geconcentreerd, terwijl het Studiecentrum voor Kernenergie in Mol, SCK-CEN, zich richt op de technologie. Mol levert geen rechtstreekse bijdrage, maar werkt wel via contracten in het kader van het European Fusion Development Agreement indirect aan de voorbereiding van ITER. Een speerpunt voor het Belgische fusie-onderzoek is de verhitting van plasma in het ionocyclotron domein, waarbij de Belgische fysici samenwerken met CEA in Cadarache, vlakbij de ITER-locatie, en UKAEA in Engeland. Deze techniek, Ion Cyclotron Resonance Heating, is inmiddels uitgeprobeerd in de Textor-tokamak in Jülich, en wordt nu in een acht-megawatt-uitvoering in JET in Culham getest. In ITER moet deze techniek straks via radiogolven van 45 tot 60 megahertz twintig megawatt aan vermogen aan het plasma toevoeren. Weynants: "Met het ICRH-systeem is het onze uitdaging om een verhittingsbron te maken die voldoende lang energie kan injecteren zonder dat de antenne problemen krijgt, en die lang kan werken onder de extreme belasting van warmte en neutronen." Weynants vindt het jammer dat de Belgische industrie moeilijk op gang is te brengen voor ITER, iets waar de politieke structuur in België mede debet aan is. "Al gauw dient men met vier of zelfs acht ministers te overleggen waar in Nederland twee minister volstaan. Daarnaast bestaat er in België geen organisatie zoals het Nederlandse TNO." Vooral nog zal de Belgische industrie vooral wachten op de call for tenders.



Bouwen in Cadarache

Waarschijnlijk begint medio 2007 de bouw van de grootste experimentele fusiereactor ter wereld (ITER) in het Zuidfranse Cadarache. De assemblage van alleen de tokamak vergt naar schatting al een miljoen mens-uren in vier jaar tijd.

Assemblagehal

De onderdelen van de fusiereactor worden vanuit de hele wereld, bijvoorbeeld Japan en Rusland, naar het Franse Cadarache vervoerd. De zware componenten (waaronder de negen segmenten van het vacuümvat) worden per schip afgeleverd in de haven in Fos-sur-Mer en met speciaal transport naar de assemblagehal aan de zuidzijde van het ITER-complex vervoerd.

Upending tool

De upending tool zet de aangevoerde zware segmenten overeind. Met behulp van een hulframe kan de hoofdkraan het 750-ton zware segment optillen en in de subassembly tool plaatsen.

Subassembly tool

In de subassembly tool volgt de assemblage van een van de negen sectoren van het vacuümvat, met ondermeer drie delen van het thermische schild en twee toroïdale spoelen. De diverse onderdelen worden aan elkaar gelast en gebout. Binnen het project zijn speciale las-technieken ontwikkeld om te zorgen voor een betrouwbare verbinding van de onderdelen. Terwijl de afmetingen van de onderdelen vele meters kunnen bedragen, zijn de marges minimaal, minder dan een millimeter.

Wachtrij

Er zijn twee subassembly tools zodat assemblage van een volgend segment kan plaatsvinden terwijl het voltooide segment gereed staat om in de reactorruimte geplaatst te worden.

Hijsvermogen

Als een sector van het reactorvat inclusief thermische schilden en twee toroïdale magneetspoelen gereed is, zijn de twee hoofdkranen samen nodig om de sector vanuit de assemblagehal in de reactorruimte in het tokamakgebouw te tillen.

Hot-cell-gebouw

Tokamakgebouw

In het tokamak-gebouw, een betonnen gebouw met drie meter dikke muren, vindt de assemblage plaats van het torusvormige reactorvat, de tokamak (Russisch voor magnetische toroïdale kamer). Het dubbelwandige vacuümvat met magneten staat in een stalen koelvat, de 3300 ton zware cryostaat. Magnetten en vacuümvat steunen op een geïsoleerde basis die is geïntegreerd in de cryostaat. Met eventuele aardbevingen is rekening gehouden.

Tritiumgebouw

Bij de fusiereactie komt als restproduct (onschadelijk) helium vrij. Divertors onder in het reactorvat voeren dit helium af. Samen met het helium worden ook deuterium- en tritiumdeeltjes weggepompt. In het tritiumgebouw worden de brandstoffen gescheiden van het helium en teruggevoerd naar de reactor voor hergebruik. Verder vindt hier de opslag van deuterium en lithium plaats. Na tien jaar testen worden de wandmodules in het reactorvat uitgebreid met lithiumreservoirs. De neutronen die dan tegen de wand botsen, zetten lithium om in tritium en helium. Het tritium wordt het plasma ingevoerd, het helium wordt afgevoerd. Alleen bij het opstarten en sluiten van de reactor moet tritium in of uit de reactor worden getransporteerd.

Spoelen eerst

Voordat de sectoren van het reactorvat geplaatst worden, zijn de lagere poloïdale spoelen in het cryostaat getild, zodat ze later onder aan de toroïdale spoel kunnen worden opgehangen.

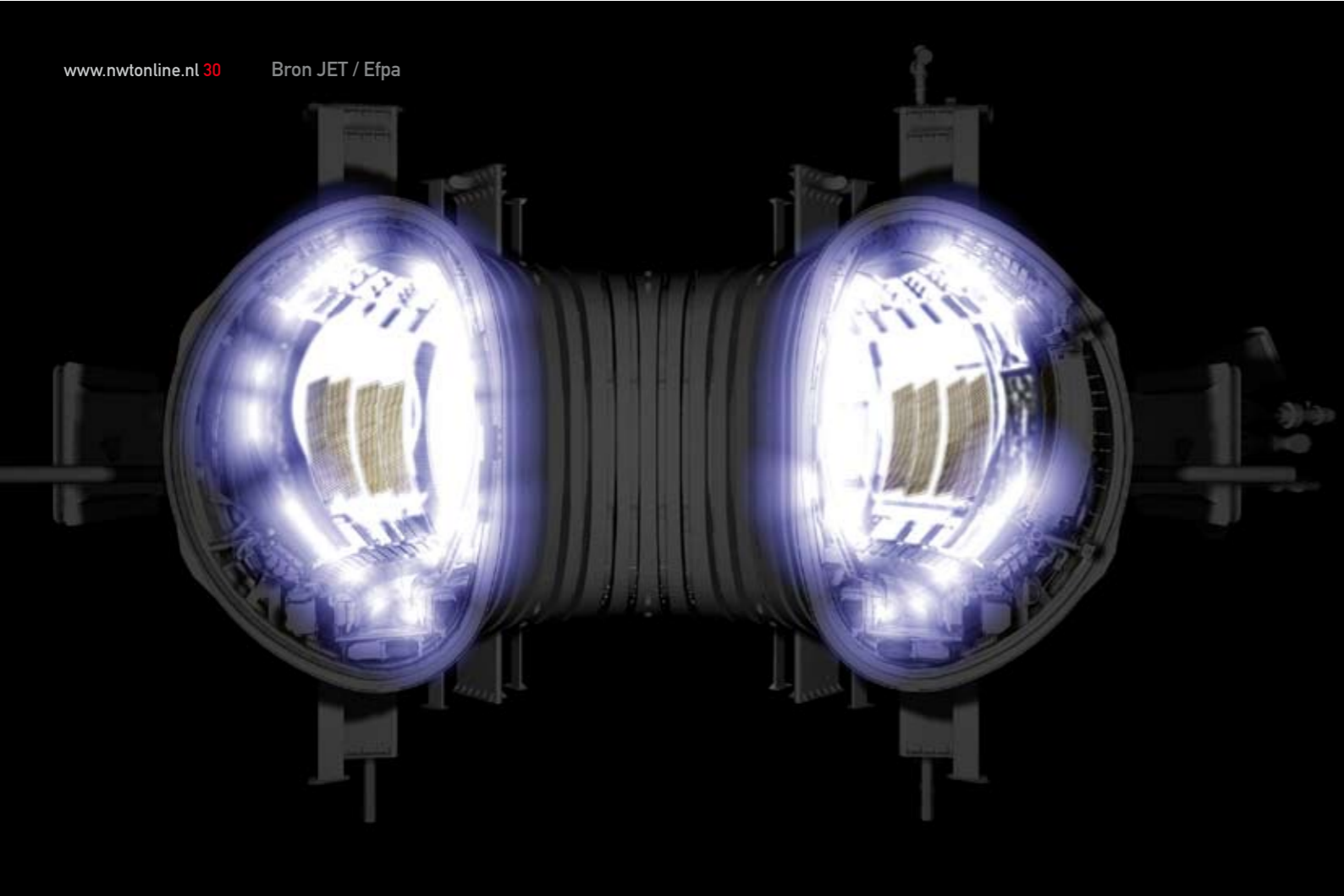
Thermisch schild

Een thermisch schild rondom het reactorvat, gekoeld tot temperatuur van 80K, vangt een groot deel van de warmte opgewekt in het reactorvat op, en beschermt zo de supergeleidende magneten rondom het vat.

Hot-cell-gebouw

Poort-onderdelen, wandmodules, divertor-onderdelen en andere componenten die in het vat moeten komen, bereiken het complex via het hotcell-gebouw in het noorden. Ze moeten uitermate schoon zijn bij montage. Als de fusiereactor operationeel is, voeren robots in de hot-cell onderhoudswerkzaamheden uit, bijvoorbeeld het vervangen van onderdelen in de divertor-cassettes en de millimetergolflanceerinstallaties. Het transport van een divertor-cassette naar de hot-cell vindt plaats met speciale containers zodat geen enkel contact kan optreden tussen de componenten in het radioactieve reactorvat en de buitenwereld. Tijdens de bouwfase assembleren de robots in de hotcell de wandmodules voor de binnenzijde van het reactorvat. De hittebestendige laag van de wandmodules bevat beryllium dat in stofvorm schadelijk is.

Assemblage door robots



De Joint European Torus in het Britse Culham is nu nog de grootste tokamak ter wereld. Experimenten die daar sinds 1983 zijn uitgevoerd, hebben geleid tot de ontwikkeling van nieuwe technieken en materialen die in ITER zullen worden opgenomen.

► vereisen de supergeleidende magneten die de geladen deeltjes in het plasma op hun plaats houden de laagst mogelijke temperatuur. Deze magneten zijn vooral opgebouwd uit niobiumlegeringen. Een achttiental ringvormige spoelen omhullen de ringvormige plasmakamer, en zijn van een niobiumtinlegering, Nb₃Sn. Die wekken een magneetveld op van zes tesla, ruim honderdduizendmaal de sterkte van het aardmagneetveld. Dat veld dwingt de geladen deeltjes in het plasma in hun ringvormige wolk. Daaromheen bevinden zich horizontaal gelegen ringvormige spoelen van niobiumtitan, de poloïdale spoelen. Die leveren een magneetveld van 0,06 tesla, en helpen met het op zijn plaats houden van het plasma. Deze combinatie van magnetevelden zorgt voor een stabiele ringvormige opsluiting van het plasma. Het geheel bevindt zich in de zogenaamde cryostaat, een met helium tot vlak boven het absolute vriespunt gekoelde ruimte voor de supergeleidende spoelen. De cryostaat heeft een hoogte van 24 meter en een doorsnede van 28 meter. Buiten de cryostaat komt volop apparatuur zoals pompen voor het onderhouden van het vacuüm, koelsystemen, voorzieningen voor verhitte van het plasma en een systeem voor de vervanging van onderdelen van de reactorwand. Daarnaast – het is een onderzoeksreactor – zullen wetenschappers allerlei apparatuur

installeren die de eigenschappen van het plasma en de vrijkomende deeltjes meet. ITER is de afgelopen twintig jaar ontworpen en volledig doorgerekend. Toch is lang niet alles even goed bekend, onder meer de effecten van schaalvergroting. Donné: "De neutronenstraling is straks vijf keer zo intens als bij JET. Daarmee moet je rekening houden. Veel meetapparatuur is kwetsbaar voor neutronenstraling. Lenzen en glasvezels kunnen snel hun optische eigenschappen verliezen en ondoorzichtig worden. Daarom spelen spiegels een belangrijke rol in het systeem. Ook daar is onderzoek aan nodig. Daarnaast maakt het plasma onvermijdelijk wel ergens contact met de wand, en onder de extreme omstandigheden kan daardoor materiaal van de wand weg eroderen en zich ergens anders weer afzetten, bijvoorbeeld op de spiegels." Als de wand daardoor oneffen wordt, dan is ook de warmteoverdracht aan de wand door de neutronenstraling niet meer overal hetzelfde. Daarom is er veel aandacht voor de calibratie van de metingen aan de reactorwand. Die metingen moeten immers plaatselijke aantasting van de wand zichtbaar maken. Een consortium van FOM met de Nuclear Research Group in Petten en TNO werkt samen aan de Nederlandse industrie aan de Nederlandse bijdrage, ITER-NL. Dat draait enerzijds om twee wetenschappelijke vragen, namelijk diag-

nostiek en een techniek voor verhitte van het plasma met radiofrequente golven. Een van de Nederlandse speerpunten, de Upper Port Launcher, brengt met microgolven als in een magnetron het plasma lokaal op een hogere temperatuur en verhoogt daardoor de stabiliteit van het plasma. De vaste gekromde spiegels van het Upper Port Launcher-systeem zijn gemonteerd in de wand van het vacuümvat en richten de microgolven op het plasma. De golfbundels hebben in het plasma een diameter van tien centimeter. Als het plasma de energierijke millimetergolven absorbeert, moeten daardoor instabiliteiten verdwijnen. Anderzijds is het doel van ITER-NL om de Nederlandse industrie zo optimaal mogelijk in te schakelen bij de fabricage van diverse componenten van de ITER-machine. Donné, wetenschappelijk-technisch projectleider, hoopt dat voldoende industriële partners kunnen aanhaken bij de studies, dat zal hun kansen geven als bij ITER de grote orders voor apparatuur de deur uitgaan.

Magnum-PSI Nederlandse fusiefysici werken in Nieuwegein daarnaast aan de Magnum-PSI, een ITER-divertor-simulator. De divertor is eigenlijk een tapgat onderin het vat waardoor afvalproducten worden afgevoerd. De simulator is een sterke plasmabron die een plasmakolom met een diameter van tien centimeter en

een lengte van anderhalve meter laat invallen op allerlei doelmaterialen. Zo kan worden bekeken of materialen goed genoeg zijn voor gebruik in de wand van het plasmavak. Prof dr Willem Jan Goedheer toont het huidige apparaat in Nieuwegein, Pilot-PSI. Achter een plasmabron zit een roestvrijstalen buis omgeven door sterke magneten. "Je hebt toch geen pacemaker?", vraagt hij voordat hij aanstalten maakt om de magneten aan te zetten. Het plasma achter de bron geeft een vaag lichtschijnsel, maar zodra Goedheer een knop indrukt en daarmee de magneten aanzet, verandert het in een rechte, intens oplichtende bundel, die uiteindelijk na een meter een oppervlak treft. Allerlei meetapparatuur rondom de opstelling kan de bundel en het getroffen plaatje analyseren. Aan de ontwikkeling van de opvolger van Pilot-PSI zijn de FOM-onderzoekers in Nieuwegein inmiddels begonnen. Goedheer hoopt dat halverwege 2009 het apparaat volledig operationeel is. Wouter Vijvers, 27 jaar, studeerde theoretische fysica aan de Universiteit van Amsterdam, maar wijdt zich nu vol enthousiasme aan de experimentele fysica in het FOM Instituut Rijnhuizen. Hij is promovendus bij prof dr Nick Lopes Cardoso. Met Magnum-PSI zullen de fysici een groter testoppervlak bombarderen met plasma dan in het huidige apparaat.

"De waterstofbundel moet in Magnum-PSI vijftientigmaal groter worden dan in Pilot-PSI, rond de tachtig vierkante centimeter. We kunnen al plasma maken dat net zo intens of nog intenser is dan wat er in ITER tegen de wand zal komen. De bundel in Pilot-PSI is nog te smal. Tijdens de interactie van plasma met de wand ontstaan er verbindingen die alle kanten opvliegen. De afstand die ze afleggen, de vrije weglengte, is zodanig dat ze het plasma uitvliegen voordat ze verdere reacties kunnen ondergaan. Naar die reacties zijn we echter zeer geïnteresseerd. Als vrijkomende verbindingen reageren met plasma, kunnen ze zich namelijk weer afzetten op de wand. In ITER moet zoveel mogelijk vrijkomend materiaal weer neerslaan, er moet een dynamisch evenwicht ontstaan, zodat de wand effectief in stand blijft. De erosie moet minimaal zijn." Het onderzoeken van de secundaire reacties van vrijkomend materiaal moet in Magnum-PSI lukken dankzij de dikkere plasmabundel. Het gaat bij ITER niet zozeer om het aantonen dat kernfusie kan, maar dat het rendabel kan, en duurzaamheid van de wand speelt daarbij een belangrijke factor: Vijvers: "De meeste wetenschappers zijn er wel van overtuigd dat ITER meer vermogen zal opleveren dan erin wordt gestopt."

Zal ITER fysici nog verrassen? Vijvers: "Misschien wel op het gebied van oppervlakken, van materialen. Dat is moeilijk voorspelbaar. Ik ben nog maar een broekie, maar in de wandelgangen bij congressen en een zomerschool merk je wel dat aan de haalbaarheid van de fusie nauwelijks wordt getwijfeld. De condities in ITER kennen we nog niet goed, die vormen de grote onbekende. In kernfusie-experimenten die al bestaan, in een gecontroleerde omgeving zoals in Textor, is het nodige geleerd. In ITER zal het in de orde van een jaar duren voordat de reactor weer opengaat, zodat men kan kijken wat er is gebeurd. Het voordeel van Magnum-PSI is straks dat we het direct kunnen observeren, onder omstandigheden die lokaal vergelijkbaar zijn met die van ITER. Gemakkelijke diagnostiek onder dezelfde condities als straks in ITER heersen."

TL-buis Een van de grote uitdagingen vormt de bestendigheid van het materiaal in de divertor, enkele platen onderin het vacuümvat. Daar moet het ontstane helium met andere verontreinigingen uit het plasma worden verwijderd. Onvermijdelijk heeft de afkoelende materie die daar de platen nadert nog steeds een hoge temperatuur. Bij de wisselwerking in de reactor tussen wand en plasma bij hoge temperatuur en deeltjesflux is sprake van sputtering en dat is goed bestudeerd. In de divertor daarentegen bereikt de materie het regime voor chemische reacties, en dat is een nog bijna maagdelijk onderzoeksgebied. Magnum-PSI kan dit

manco aan kennis aanvullen. De natuurkundigen hebben behoefte aan materialen die geschikt zijn om de platen te bekleden en lange tijd de extreme condities kunnen weerstaan. Enkele trucs moeten de directe warmtebelasting en het bombardement met elektronen en plasma-ionen verminderen. Anders zou de divertor in snel tempo verdwijnen, dankzij een warmtebelasting tienmaal zo hoog als die een spaceshuttle tijdens terugkeer in de dampkring ondervindt. Naast de juiste geometrie helpt daarbij bijvoorbeeld het inspuiten van neonatomen. Die zetten elektronenenergie om in licht zoals in de bekende TL-buis, en koelen daarmee het plasma lokaal af. Wolfram lijkt een geschikt materiaal voor de wand. Maar als dit verdampt, raakt het plasma vervuild en koelt het af. Deze metaalatomen zullen niet compleet geïoniseerd zijn want elektronen in de binnenste energieniveaus blijven achter. De plasma-energie dwingt die elektronen naar een hoger niveau, en als die elektronen terugvallen komt de energie vrij als straling.

Ook materialen waarin koolstof en silicium zijn verwerkt, kunnen verdampen en het plasma vervuilen. Koolstof kan reageren met het waterstof, moleculen vormen enzovoort. Tritium kan dezelfde reacties als waterstof aangaan en daardoor onderdeel gaan uitmaken van de wand. Dat is uiterst ongewenst. Goedheer: "De milieuvoorschriften staan maar een bepaalde hoeveelheid tritium in de reactor toe. Als dat in de wand is ingebouwd, kan er niet verder worden geëxperimenteerd."

Over vier jaar is Vijvers klaar met zijn promotie. Zal hij nog commerciële fusie tijdens zijn carrière meemaken? Hij durft het niet te zeggen. "We hebben natuurlijk het fasttracktraject, zelfs als de bouw aan DEMO begint terwijl ITER draait, is dat nog dertig jaar. Dat is een optimistisch traject. Er zijn nog diverse hobbels, naast de plasma-wandinteracties ook het stabiliseren van het plasma. Ik ben erg benieuwd. Een spannend moment is als ITER daadwerkelijk vijfhonderd megawatt zal produceren, en er meer vermogen uitkomt dan er ingaat. Dat is een lang traject, na waterstofplasma zal men deuteriumplasma testen in ITER, en daarna pas deuterium-tritium."

Dat ie gaat werken, daarvan zijn we overtuigd, zegt Donné. Dan is het wel de vraag hoe lang ITER kan draaien bij vol vermogen. Hoeveel onderhoud is nodig? Mogelijk dat na een jaar draaien twee of drie maanden nodig zijn voor het onderhoud zoals vervanging van de wanden. Dan moet het materiaal van de wand en in de divertor wel bestendig genoeg zijn tegen de extreme temperatuur en straling. Donné hoopt dat bij de volgende testreactor, DEMO, eens in de vijf jaar onderhoud nodig zal zijn. Weer een stap vooruit. ●

De ITER-reactor

1 Brandstofinjectie

Via injectiepunten in de wand (achter de warmteschilden) worden vaste waterstofkorrels in de plasmakern geïnjecteerd. Zonder brandstof vindt geen fusie plaats. De reactie in het reactorvat kan niet op hol slaan.

2 Plasmaverhitting

Microgolven (elektroncyclotronresonantieverhitting, 20 MW, ca. 170 gigahertz, en ioncyclotronresonantieverhitting, eveneens 20 MW, ca. 50 megahertz) zorgen voor verhitting van het plasma. Daarnaast wordt energie aangevoerd via geneutraliseerde tot een mega-elektronvolt versnelde deuterium-ionen, de zogenaamde neutral beam injection. Bij voldoende verhitting van het waterstofgasmengsel treedt fusie op.

3 Kernfusie

Bij het fusieproces komen neutronen vrij die tegen de wand van het reactorvat botsen. Door deze botsing wordt de wand van het reactorvat warm. Om een vermogen van 500 MW te genereren, wordt elke 100 seconde 0,1 gram tritium verbrand.

4 Plasma zuiveren

Geïoniseerde onzuiverheden in het plasma stromen langs de veldlijnen omlaag naar de divertor, waar ze met het ontstane helium uit het plasma worden verwijderd. Speciale materialen moeten ervoor zorgen dat verdampt wandmateriaal daar weer neerslaat op de wand, zodat die netto intact blijft. Omdat de divertor niet alleen helium maar ook deuterium- en tritiumdeeltjes wegpompt, wordt elke 100 seconden ruim 25 gram tritium het vat in- en uitgepompt. De brandstoffen worden gescheiden van het helium en hergebruikt.

5 Elektriciteit

In de wand van het vat lopen twee afzonderlijke koelleidingsystemen die de warmte in de wand afvoeren. Het aangevoerde koelwater heeft een temperatuur van 100°C en een druk van 1,1 megaPascal. Per seconde moet 980 kilogram water door de wanden stromen. In toekomstige reactoren zal het warme water gebruikt worden om bijvoorbeeld een stoomturbine aan te drijven. Bij ITER is dit nog niet het geval.

