

TEKST: JIM HEIRBAUT

Sneller bouwen, testen, leren en verbeteren

Kleiner is fijner

Kernfusie kan het ontbrekende puzzelstukje worden in de volgende fase van de energietransitie. Probleem is alleen dat deze vorm van schone energieopwekking lastig te realiseren is. Waar het megaproject ITER wordt geplaagd door tegenslag, zijn het nu juist de kleine startups die razendsnel doorgaan met innoveren.

Op het terrein van de grote kernfusiereactor ITER in het zuiden van Frankrijk is al enorm veel gebouwd. De oplevering is nabij, zo lijkt het. Maar het internationale samenwerkingsproject kampt al jaren met ernstige vertragingen. *Mistakes* die niet worden gehaald, onderdelen die niet goed op elkaar passen. Onlangs nog moest worden besloten dat de binnenwand niet meer van beryllium wordt gemaakt, maar van wolfram. Een ingrijpend besluit dat gevolgen heeft voor andere onderdelen. Ondertussen halen talloze startups die een fusiereactor willen bouwen, grote investeringen binnen. Tien miljoen hier, enkele tientallen daar. Eenje heeft zelfs twee miljard dollar opgehaald.

Investeerdere hebben duidelijk fiducia in de plannen van deze kernfusiestartups, waarvan er nu wereldwijd zo'n vijftig zijn. Overheden trouwen ook. Opvallend was de oproep tot meer internationale samenwerking van klimaatgezant John Kerry van de Verenigde Staten op de laatste klimaattop. De Amerikanen denken

weer een omhoog. De beer is nu echt los, dat is iets van de laatste paar jaar.

De startups pakken het heel anders aan dan het ITER-project. Ze willen snel een eerste reactor bouwen en van de ervaringen leren, om direct een volgende, betere versie te bouwen. Een apparaat zo groot, log en peperduur als ITER moet in één keer goed zijn. De Baar wijst erop dat ITER met startups vergelijkbaar, eigenlijk hetzelfde is als appels met peren vergelijken. ITER is een wetenschappelijk experiment om een brandend plasma te onderzoeken. Men kijkt naar verschillende methoden om het plasma te verhitten. Ook wil men de kwadeleken testen, een aanpak om in een dikke laag om de binnenwand heen de brandstof tritium te 'kweken' uit lithium. Dit leidt tot een enorm omvangrijk wetenschappelijk programma. Aan de andere zijde zitten de startups die zo snel mogelijk vooruit willen. Dat is voor die bedrijven een groot voordeel. Maar dat wil nog niet zeggen dat het een gelopen race is.

Het sterkste punt van de startups, zegt Lopes Cardozo, is dat ze profiteren van een snelle evolutie van hun apparaten. De ITER-actor is ontworpen onzeker dertig jaar mee te gaan als onderzoeksfaciliteit. Daar moet bijna alles kloppen en het apparaat moet lang meegaan. Misschien gaat ITER uiteindelijk werken, maar doordat de ontwikkeling zo enorm lang heeft geduurd, zal een volgende, betere versie veel te lang op zich laten wachten. Dat pakken die startups veel slimmer aan. Kleinere, eenvoudigere machines die hoogstverhaalbaar zijn niet meteen zullen voldoen, maar waarvan zoveel te leren is dat ze eenvoudig en snel kunnen worden verbeterd. De leercurve is veel steiler dan bij ITER, en dat is goed.

Deze aanpak doet denken aan de beginfase van ruimtevaartbedrijf SpaceX van Elon Musk. Het bouwde snel nieuwe raketten die de eerste paar keer vrijwel me-

Zo werkt kernfusie

Bij het smensmelten van twee waterstofkernen komt veel energie vrij. Gebeurt dat heel beheerst, dan is op basis van dit fusieprincipe een energiecentrale te bouwen. Althans, dat denken fusiewetenschappers en -ingenieurs; het is nog nooit gedaan. Voorwaarde is

dat een gas extreem heet wordt gemaakt, zodat in het gevormde plasma veel waterstofkernen met elkaar botsen en fuseren. De energie die hierbij vrijkomt, wordt geooast in de vorm van warmte, die direct wordt gebruikt of waarmee elektriciteit is te produceren.

teen na de lancering ontploffen. Maar van de gemeten data leerde SpaceX zoveel dat de volgende versie van de raket veel beter was. En dat nog een keer.

Kleine donutreactor

Van alle bedrijven in de kernfusie verwacht Lopes Cardozo het meeste van Commonwealth Fusion Systems uit de Verenigde Staten. Het heeft inmiddels twee miljard dollar aan investeringen achter zich, heeft veel mensen in dienst genomen en groeit nog snel. De technologie komt voort uit MIT. Rond 2016 zag hoogleraar Dennis White dat de overheidsprogramma's op het gebied van fusie te langzaam gingen, vertelt Lopes Cardozo. Hij dacht: wij zijn MIT, wij moeten dat beter en sneller kunnen. ▶



Luchtfoto van het ITER-terrein in september 2023. De fusiereactor lijkt bijna klaar, maar het project kampt met talloze vertragingen. FOTO: ITER/EJF, RICHE



Computerekening van de reactor SPARC die startup Commonwealth Fusion Systems ontwikkelde, een spin off van het MIT. ILLUSTRATIE: T. HEN-ERSON, CES/MIT-PFEC

Wokkeireactor

Er zijn ook bedrijven die niet met een tokamak werken als fusiereactor. Zij gebruiken bijvoorbeeld een stellarator, een exotisch ogende reactor in de vorm van een wokkel.

Het grootste voordeel daarvan is dat instabiliteiten in het

plasma minder makkelijk ontstaan dankzij de gekke vorm.

Het is goed bedacht, vindt Marco de Baar, maar je bent er nog niet. Het probleem is dat het ene probleem kwijt en het andere erin komt, namelijk een complexer ontwerp.

Zijn doel was om de eerste generatie commerciële fusiereactoren dertig jaar naar voren te halen.

Commonwealth werkt met een tokamak, een donutvorm met als ITER, maar dan vier keer kleiner. De tokamak heeft zich in verschillende landen al bewezen als onderzoeksreactor. Maar Commonwealth heeft een sterke troef in handen voor het opwekken van het magnetisch veld dat het plasma binnen zijn begrenzingen houdt: hogetemperatuursupergeleiders. Lopes Cardozo: 'Die moeten je "maar" te koelen tot 20 kelvin, wat eenvoudiger is dan koelen tot 4 kelvin. Deze supergeleiders krijgen bij 20 kelvin supergeoeide eigenschappen. Als ze de magneten van hun reactor SPARC aan de praat krijgen, dan gaat deze reactor werken.' Wel met een lager vermogen dan ITER, 150 megawatt om 500 megawatt, maar het kleinere formaat heeft ook voordelen. Zo is een kleinere tokamak sneller te bouwen. 'Het bedrijf verwacht hem in vier jaar te kunnen bouwen in plaats van de twintig jaar die het kost om ITER in elkaar te zetten. Als dat ontlastisch snel klinkt, moet je beseffen dat ITER's voorganger JET ook ooit in vier jaar is gebouwd.' Het Amerikaanse bedrijf ontwerpt zijn machine verder zo modulair mogelijk, zodat onderdelen geschikt zijn voor serieproductie. Volgens Lopes Cardozo denkt het bedrijf ook al na over het opzetten van een hele toeleveringsketen.

Samenpersen

Een heel andere aanpak die volgens Lopes Cardozo zeker kans maakt, is *inertial confinement fusion*. Daarbij worden fusieomstandigheden bereikt door een kleine hoeveelheid fusiebrandstof snel samen te persen en te verwarmen. Dit geeft een heel hoge druk, waardoor waterstofkernen fuseren. Dat samenpersen in een kleine ruimte kan op verschillende manieren, bijvoorbeeld mechanisch door een projectiel met hoge snelheid op een holte te schieten waar de fusiebrandstof in zit. Het Britse bedrijf First Light Fusion zit op deze route. 'Dat gebruikt hiervoor een *railgun*, een elektromagnetisch systeem. Maar ik geloof dat ze dat nog niet werkend hebben.'

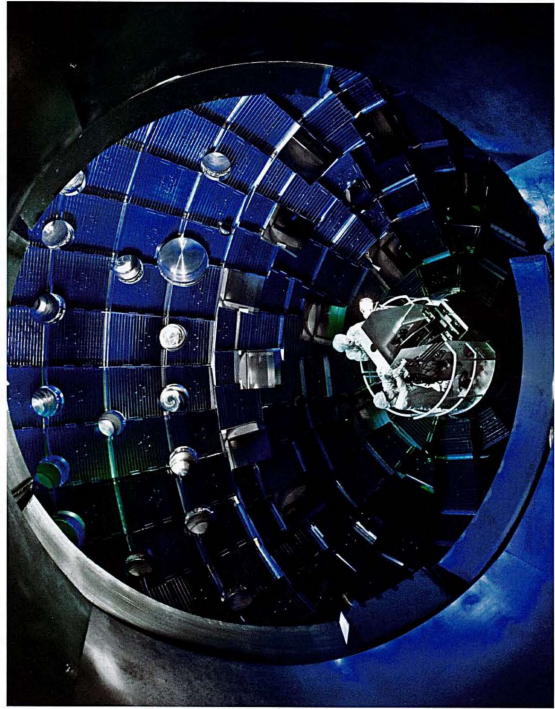
Andere onderzoekers denken dat *inertial confinement fusion* beter met lasers kan. Deze aanpak is ontwikkeld aan het Lawrence Livermore National Laboratory in de Verenigde Staten. Lopes Cardozo is er onlangs nog geweest. 'De laser staat in een gebouw van tien verdiepingen hoog en neemt in totaal een oppervlakte van drie voetbalvelden in. Hij kan maar een paar keer per dag schieten, zo lang moet hij telkens afkoelen.'

Ook hier zijn nog technologische uitdagingen genoeg. Zo moeten de laserbundels van alle kanten heel precies gelijkmatig het *target* beschieten, anders vliegt het weg. 'Toen de onderzoekers hier één keer in slaagden, kon je nog spreken van een geluksschot. Maar inmiddels hebben ze het meerdere keren gedaan, dat was een doorbraak. Ze kunnen dit nu reproduceren.'

Een toekomstige energiecentrale op basis van een tokamak draait op kernfusie die voor langere tijd plaatsvindt, in de orde van uren per sessie. Dat is een stabiel proces, heel anders dan bij *inertial confinement fusion*, waarbij kernfusie steeds maar ultrakort – enkele nanoseconden – plaatsvindt, maar dan vele malen achter elkaar. Het is een beetje te vergelijken met een

Technici aan het werk in de target-ruimte van de National Ignition Facility van het Lawrence Livermore National Laboratory, waar het onderzoek naar laserfusie begon.

FOTO: PUBLIEK DOMEIN



afhangelijk van welke startup de fusiereactor gaat winnen. Zo zit in Nederland het bedrijf StarWarden dat *heat pipes* ontwikkelt, structuren die extreem hoge warmtestromen kunnen afvoeren. In kernfusiereactoren heersen immers extreem hoge temperaturen die op geen enkele andere plek op aarde optreden. Heemskerk Innovative Technology heeft zich gespecialiseerd in het testen van en trainen met de robots die de ITER-reactor gaan onderhouden. Die opgedane kennis zou ook inzetbaar kunnen zijn bij een andere fusiereactor. Idem dito voor het in Eindhoven gevestigde Ignition Computing, dat door ITER is ingehuurd om het bewegende plasma te modelleren en te analyseren. Ook over Kyoto Fusionering uit Japan is Lopes Cardozo enthousiast. 'Dat heeft een paar sleuteltechnologieën in de vingers die zeker nodig zijn, los van welk concept reactor je wilt bouwen'. Bijvoorbeeld voor het verkrijgen van lithium dat nodig is voor een kwekdeken, waarin de fusiebrandstof tritium wordt gemaakt.

Ook China lanceerde vorig jaar een groot publiek-privaat project voor kernfusie, zegt De Baar, die sinds een jaar het Chinese kernfusieprogramma adviseert over plasma-diagnostiek, allerhande metingen aan een plasma. 'China is een publiek-privaat samenwerking gestart met enkele enorme bedrijven erin. En met ver-

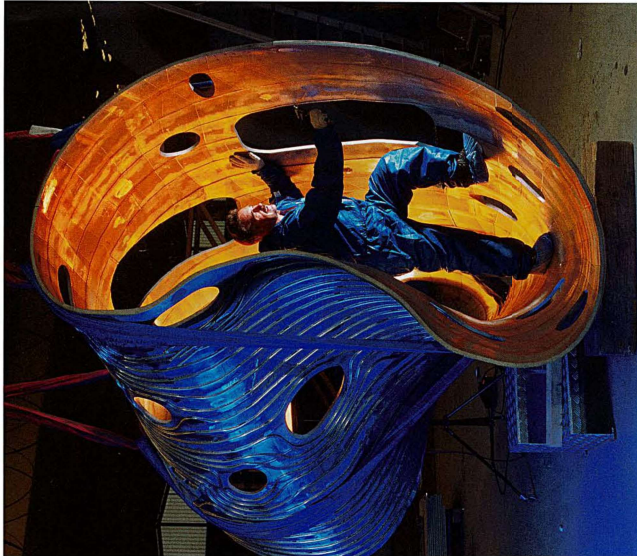
66
De vraag is altijd: hoe is dit te vertalen naar een reactor **77**

verbrandingsmotor die ook werkt met een hoop kortdurende explosies die na elkaar volgen, maar die toch een constant vermogen leveren. 'Dat het lukt om meerdere bolletjes na elkaar te beschieten, moet nog worden bewezen, zegt Lopes Cardozo. De Baar gelooft niet dat de aanpak met lasers uiteindelijk zal leiden tot een bruikbare energiecentrale. 'De vraag is hoe dit te vertalen is naar een reactor. Het punt is dat bij een tokamak de energie in de supergeleidende spoelen blijft zitten. Bij de lasertechniek moet je de energie er telkens weer inpompen, want na elke slag ben je dit weer kwijt.'

Europa, Japan en China

Het zijn er niet zoveel als in de Verenigde Staten, maar ook Europa heeft startups op het gebied van kernfusie. Neem Gauss Fusion in Duitsland. Dat gaat niet zelf een reactor bedenken, maar 'bestaat uit een paar grote industriële partijen die de handen ineen hebben geslagen en zeggen: wie een goed idee heeft voor een reactor, kom naar ons, dan gaan wij dit voor je bouwen. Daarbij werken ze al samen met nationale labs in Duitsland die verstand hebben van de werking van een reactor, aldus Lopes Cardozo.

Ook zijn er Europese bedrijven die aan een onderdeel van de toekomstige energiecentrale werken, on-

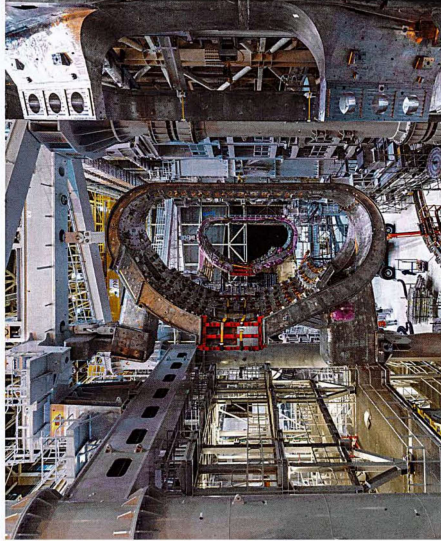


Segment van het plasmavat voor de Wendelstein 7-X stellarator tijdens de productie. FOTO: MAX-PLANCK-INSTITUUT FÜR PLASMAPHYSIK/WOLFGANG FILSER

Leren van ITER

Met alle problemen die ITER-ingenieurs tegenkomen naast de vele startups die grote investeringen ophalen en snel stappen maken, wordt het geen tijd om met ITER te stoppen? Dat is een logische vraag, vindt Nick Lopes Cardozo. 'De Europese Commissie laat nu ook door externe consultants onderzoeken of doorgaan met ITER nog zinvol is. Maar we hebben enorm veel geleerd van het ontwikkelen van ITER en we blijven nog steeds bijleren.' Met de kennis die dit megaproject heeft opgeleverd kun-

nen in ieder geval ook andere kernfusieonderzoekers en -ondernemers hun voordeel doen. 'Wat we hebben geleerd van het fusieprogramma, en van ITER nog gaan leren, is publiek gefinancierde kennis', zegt De Baar van DIFFER. 'Die kennis is, in de vorm van publicaties, voor iedereen beschikbaar. Maar ik zie nu al zaken rommelig verlopen, bijvoorbeeld met open source-softwarepakketten waarop de industrie in één keer kan voortbouwen en daar dan toch weer een claim op wil leggen.'



Een doorkijk bij de bouw van ITER, in januari 2023. Je zien zijn twee segmenten van het te bouwen vacuümvat die elk 440 ton wegen en tijdelijk zijn opgehangen wachtend op verdere montage. De ITER-plasmareactor wordt samen-gesteld uit negen van deze sectoren.
FOTO: ITER

bazing zag ik dat er een tijdje later een tweede Chinees consortium opstond, ook weer met grote partijen erin.' Voor China is kernfusie een strategische technologie, zegt Lopes Cardozo. En niet alleen vanwege de enorme energiehonger van het land, maar ook vanwege het feit dat China een belangrijke rol wil spelen op het gebied van de materialen voor in de fusiereactoren.

Metamorfose

De wereld van de kernfusie is in de afgelopen jaren flink veranderd. Toen de eerste kernfusie-startups zich tien jaar terug aandielden, werden ze koeltjes ontvangen door de ingenieurs en plasmafysici van de grote overheidsprojecten, herinnert Lopes Cardozo zich. Maar dat is allang niet meer zo. 'Nu proberen overheden samen te werken met de startups. Ze hebben gezien dat sommige van die bedrijven supercompetent zijn. Zo'n Commonwealth Fusion Systems stond er in het begin helemaal alleen voor; later kreeg het steun van de Bill Gates-achtige investeerders. Nu klopt de Amerikaanse overheid bij hen aan voor samenwerking.'

In mei gaat Lopes Cardozo met pensioen, maar het veld overziedt, heeft hij er alle vertrouwen in dat het gaat lukken. 'Dankzij de wedergeboorte van kernfusie zullen een of twee bedrijven over vijf tot tien jaar een werkende demonstrator hebben. Vanuit hun eerste fusiereactor zullen zij een route vinden om tot een commerciële energiecentrale te komen en dan kunnen ingenieurs en product developers aan de slag. Het vertrouwen van overheden en investeerders is dan nog verder toegenomen.'

Volgens De Baar ligt de bal nu bij Japan en Europa. 'Ik ben ervan overtuigd dat we nu de versnelling zien die er voor zorgt dat commerciële kernfusie er komt.' Wanneer precies, dat is de *million dollar question*, maar De Baar wil zich best aan een voorspelling wagen: 'Tussen 2040 en 2050 zal er een eerste commerciële reactor zijn. Dat is al een stap verder dan een testreactor. Maar anderszids geldt: één reactor is geen reactor. Vervolgens moet een industrie worden ingericht die duizenden reactoren kan bouwen. Dat wordt nog een uitdaging, want een industrie die dat kan, bestaat nu niet.'

Vraag naar kernfusie-ingenieurs

De snelle groei van de fusie-industrie zoals Marco de Baar en Nick Lopes Cardozo die zien ontstaan, vraagt om meer ingenieurs met verstand van kernfusietechnologie. Die opleiding is nog niet op veel plekken in Europa te volgen, zegt Nick Lopes Cardozo, die aan de TU Eindhoven de master *science and technology of nuclear fusion* leidt, de enige in Nederland. 'We hebben nu een instroom van dertig studenten per jaar, maar dat moeten er zeker twee keer zoveel worden om straks aan de vraag naar fusie-ingenieurs te kunnen voldoen.'