

EEN ZON OP AARDE

*De hardnekkige droom
van energie uit kernfusie*

L.J. Reinders

© L.J. Reinders 2026

Titel: Een zon op Aarde

Auteur: L.J. Reinders

Uitgeverij U2pi, Den Haag, www.uitgeveriju2pi.nl

Druk: Jouwboekdrukkerij.nl

ISBN 978 94 9343 796 8

NUR 961

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande, schriftelijke toestemming van de auteur.

Voorwoord

Kernfusie is het proces dat de sterren, waaronder onze eigen zon, van energie voorziet. Zodra men begin jaren twintig van de vorige eeuw deze stellaire processen begon te begrijpen, begon men ook te dromen over het benutten van hun ongelooflijke kracht — zowel voor het welzijn als voor de vernietiging van de mensheid. De nachtmerrieachtige helft van die droom werd al snel werkelijkheid. Met de ontwikkeling van de waterstofbom kreeg de mens wapens in handen met een angstaanjagende vernietigingskracht, die de aarde en alles wat erop leeft in enkele uren — of nog sneller — zou kunnen verwoesten. Op de vervulling van het idyllische deel — een onuitputtelijke en schone energiebron die de mensheid gaat redden van de verschrikkingen van klimaatverandering en vervuiling — zitten we nog steeds te wachten. Zal het een fantasie blijven of is er een reële kans dat het laatste deel van deze droom nog in de eenentwintigste eeuw uitkomt?

Die belofte van overvloedige energie was er al vanaf het begin en is altijd de grote rechtvaardiging voor fusieonderzoek gebleven. Lange tijd ging zij gepaard met fundamenteel onderzoek, gedreven door nieuwsgierigheid naar plasma's, sterren en de grenzen van de materie. Vandaag is van die dubbele motivatie weinig meer zichtbaar. Kernfusie verschijnt vrijwel uitsluitend in één gedaante — die van een toekomstige energiebron. Het fusieonderzoek richt zich vrijwel volledig op de productie van (hopelijk) goedkope, maar in ieder geval onuitputtelijke energie zonder CO₂-uitstoot, om klimaatverandering tegen te gaan en welk ander voordeel voor de mensheid men er verder nog aan wil verbinden. De enige benodigde grondstof is gewoon water! Dat is tenminste het verhaal dat keer op keer wordt herhaald. Zelfs puur wetenschappelijke artikelen beginnen in de inleiding vaak met gezwam over kernfusie en de geweldige vooruitzichten die de mensheid te wachten staan als het proces beheerst zou kunnen worden.

Wetenschappers bedrijven geen wetenschap — althans, dat hoop ik — met als doel goedkope of welke andere vorm van energie aan de samenleving te verkopen, of om hun activiteiten aan te prijzen met dit alledaags resultaat als doel. De grote kracht van wetenschap is altijd geweest dat het bedreven kon worden om de wetenschap zelf, zonder de belofte van enig ‘nut’ op de korte of lange termijn. Wetenschappers doen aan wetenschap om iets van de natuur te begrijpen en dat zou voldoende moeten zijn om er geld voor vrij te maken, zolang hun projectvoorstellen aan duidelijke normen voldoen. Meer was nooit nodig en meer zou ook niet nodig hoeven te zijn. Bij het bestuderen van kernfusieprocessen hopen wetenschappers bijvoorbeeld te begrijpen hoe een plasma zich gedraagt, hoe de fusieprocessen in de sterren werken en of we die hier op aarde kunnen kopiëren — niet om stroom op het net te krijgen, maar om deze processen te begrijpen.

Deze wetenschappelijke houding is in het huidige fusieonderzoek vrijwel volledig verloren gegaan. Energie opwekken door middel van kernfusie is de enige drijfveer geworden. Daarbij rapporteren de media alleen de successen van recordtemperaturen en opsluitingstijden, die worden gepresenteerd met ronkende koppen als “Chinese ‘kunstmatige zon’ vestigt wereldrecord met 100 seconden stabiel hoogwaardig plasma”, terwijl de mislukkingen worden genegeerd. Wanneer je alleen de artikelen over kernfusie in de algemene pers leest, lijkt het een aaneenschakeling van doorbraken, terwijl de werkelijke situatie — die voor het publiek verborgen blijft — hoogstens uit kleine stapjes vooruit en vooral veel mislukkingen bestaat, want ondanks al die doorbraken is er nog nooit een apparaat geconstrueerd dat ook maar één watt aan bruikbare energie uit kernfusie heeft opgeleverd.

Ondanks deze schijnbaar hopeloze situatie blijven de wetenschappers en ingenieurs die zich met kernfusie bezighouden, onverminderd optimistisch. Die vasthoudendheid heeft iets intrigerends. In zijn boek *What Mad Pursuit* beschrijft Sir Francis Crick — medeontdekker van de structuur van het DNA — hoe merkwaardig de geesteshouding kan zijn van wetenschappers die zich toeleggen

op wat hij ‘hopeloze’ onderwerpen noemt. Hoewel Crick niet aangeeft welk onderzoek hij precies op het oog heeft, is zijn observatie treffend van toepassing op de zoektocht naar energieproductie uit kernfusie:

Het is interessant om te zien hoe wetenschappers die zich bezighouden met ‘hopeloze’ onderwerpen een merkwaardig soort optimisme behouden. In tegenstelling tot wat men zou verwachten, worden zij gedreven door een onstuitbaar geloof in hun werk. Wie dat geloof verliest, vertrekt. Alleen de echte optimisten blijven over. Zo ontstaat het wonderlijke verschijnsel dat juist op terreinen waar de beloning groot is, maar de kans op succes gering, de betrokkenen altijd opvallend optimistisch blijken te zijn. En dat terwijl, hoewel er ogenschijnlijk van alles gebeurt, zij nooit werkelijk dichterbij hun doel lijken te komen.¹

Dit citaat raakt de kern van de zoektocht naar energie uit kernfusie. De wetenschappers en ingenieurs blijven stevast optimistisch. De kans op succes mag dan gering zijn, de mogelijke beloning is zo immens dat men blijft volharden. En er staat inderdaad veel op het spel — of in elk geval leeft men in de overtuiging dat dat zo is. Dit boek is geschreven voor wie niet langer genoeg neemt met dat optimisme, maar behoefte heeft aan de feiten achter het geloof. Energie uit kernfusie is een volstrekt utilitaire onderneming geworden, een technisch probleem. In principe is daar natuurlijk niets mis mee, maar in dit geval is die verschuiving ingezet voordat de wetenschappelijke fase was voltooid. Het onderliggende natuurkundige begrip — met name van plasma's onder extreme omstandigheden in een kernfusiereactor — is nog steeds beperkt. Ergens in het begin van de jaren zeventig verschoof de intentie fundamenteel, toen ingenieurs de leiding namen en een kernfusiereactor wilden bouwen — een apparaat om energie mee op te wekken — terwijl de

1 Francis Crick, *What Mad Pursuit* (Penguin Books, 1988), p. 51, vertaling van de auteur.

fundamentele fysica nog lang niet voldoende begrepen werd. Sindsdien is dat doel met een hardnekkigheid nagestreefd die grenst aan fanatisme, wat heeft geleid tot steeds grotere reactorontwerpen, met als voorlopig hoogtepunt het ITER-monster dat in Zuid-Frankrijk in aanbouw is.

Gaandeweg worden ook nieuwe argumenten verzonnen. Werd kernfusie eerst aangeprezen als een middel om onuitputtelijke, goedkope energie te leveren, nu wordt het gepresenteerd als dé oplossing om klimaatverandering tegen te gaan. Er zal binnenkort weer iets nieuws verzonnen moeten worden, want het is zonneklaar dat energieproductie uit kernfusie, als het er al ooit van komt, veel te laat zal zijn om aan die strijd bij te dragen. Energie uit kernfusie zal in ieder geval niet in deze eeuw realiteit worden.

Aan de andere kant is er in de afgelopen zeventig jaar veel onderzoek verricht — vaak prachtig onderzoek, innovatief en vindingrijk met ook vaak nuttige spin-offs — dat een plek verdient tussen de wetenschappelijke prestaties van de mensheid. Het is niet gering om een geïoniseerd gas van honderden miljoenen graden op te sluiten in een ingewikkelde configuratie van magnetische velden en het enige tijd vast te houden. Om dit te gebruiken als een apparaat voor energieopwekking is echter duidelijk (nog) een brug te ver.

Wetenschap, en zeker kernfusie, verslindt enorme bedragen aan publiek — en tegenwoordig ook privaat — geld. Tegelijkertijd worden in verband met kernfusie al zeventig jaar grootse beloftes herhaald, terwijl de onderliggende aannames zelden werkelijk kritisch worden getoetst. Het publiek mag verwachten dat duidelijk wordt gemaakt wat er met deze middelen gebeurt en waarop die beloftes zijn gebaseerd.

Toen ik een jaar of zes geleden voor het eerst over kernfusie begon te schrijven, kwam het besef voor mij als een schok, dat de keizer geen kleren aan had en dat er nauwelijks iemand was opgestaan, bijvoorbeeld in de algemene pers, om daar op te wijzen. Het grote publiek heeft recht op inzicht in wat er is en wat er wordt gedaan op het gebied van kernfusie, en heeft recht op een antwoord op de vraag of de worst die hen wordt voorgehouden wel eetbaar is.

Er zijn weinig pogingen gedaan om de kernfusiematerie toegankelijk te maken voor een algemeen publiek, en de pogingen die zijn gedaan, zijn er tot nu toe zeker niet in geslaagd om van kernfusie een bekend begrip te maken. Integendeel, het grote publiek weet nauwelijks waar men het over heeft als over kernfusie wordt gesproken. Dit boek is uitdrukkelijk bedoeld voor een algemeen publiek. Er is geen speciale technische of natuurkundige opleiding vereist om het te begrijpen. Een algemene ontwikkeling en de bereidheid om de hersens te gebruiken zouden voldoende moeten zijn. Sommige termen, zoals tokamak, stellarator en divertor, zijn wellicht onbekend en zullen in het begin wat vreemd klinken, maar zullen worden uitgelegd en de lezer moet zich er niet door laten afschrikken. De principes erachter zijn niet zo moeilijk te begrijpen. Natuurkundige formules worden vermeden, afgezien van enkele voor de hand liggende, zoals Einsteins massa-energievergelijking $E = mc^2$.

Uit het bovenstaande zal duidelijk zijn dat dit boek niet optimistisch is over de vooruitzichten voor energie uit fusie. Elektriciteitsproductie uit kernfusie zal naar alle waarschijnlijkheid zo duur en zo complex zijn dat het zeer moeilijk — of zelfs helemaal niet — economisch rendabel gemaakt kan worden. Het zal geen commercieel concurrerende energiebron zijn en zeker ook geen schone. En, zoals in dit boek duidelijk wordt gemaakt, het zal beslist te laat komen om te helpen klimaatverandering te voorkomen.

In de hoofdstukken die volgen zal ik stap voor stap uiteenzetten hoe kernfusie werkt, wat ermee is bereikt en welke fundamentele obstakels nog altijd bestaan.

Alvorens daarmee te beginnen wil ik hier graag mijn dank uitspreken aan professor Frans van Lunteren (Universiteit Leiden), die mij de afgelopen tien jaar de gelegenheid heeft geboden om als gasonderzoeker aan de universiteit verbonden te zijn. Zonder die ondersteuning was het schrijven van dit en mijn eerdere boeken aanzienlijk moeilijker geweest.

Professor Brian Martin (University College London) ben ik dankbaar voor het lezen en becommentariëren van verschillende hoofdstukken van de Engelse versie van dit boek.

Ten slotte wil ik dr. Misha Gryaznevich (Tokamak Energy / Dante Fusion) bedanken voor de vele inspirerende gesprekken over kernfusie — in het bijzonder over de sferische tokamak — en voor zijn waardevolle commentaar op hoofdstuk 9 van dit boek.

L.J. Reinders
mei 2026

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1: De basis – waarom kernfusie ertoe doet (en wat het is)	23
1. De honger naar energie en de fusiedroom	23
2. Atomen, energie en sterren – de natuurlijke thuisbasis van fusie	30
Hoofdstuk 2: De uitdaging – voorwaarden voor kernfusie	37
1. Plasma – een superhete soep van geladen deeltjes	37
2. Wat valt er te fuseren?	39
3. Extreem hoge temperatuur – het smeden van plasma	43
4. Voldoende dichtheid – de tweede voorwaarde	46
5. Voldoende opsluitingstijd – de derde voorwaarde	47
6. Het drievoudige product – de wetenschappelijke maatstaf	49
7. Break-even, ontsteking en netto-energieopbrengst	52
8. De omvang van de uitdaging	54
9. Afsluiting	55
Hoofdstuk 3: Fusie versus splijting – het verhaal van twee nucleaire werelden	57
1. Kernsplijting – het splijten van atoomkernen	57
2. Kernfusie – het samenvoegen van atoomkernen	64
3. Een rechtstreekse vergelijking – kernfusie versus kernsplijting	70
4. Conclusie – verschillende paden, beide vol uitdagingen	71
Hoofdstuk 4: De wortels van de droom – vroege fusiepogingen en opkomst van de tokamak	75
1. Het ondenkbare bedenken – van sterren tot laboratoria (vóór 1950)	75
2. De dageraad van het experimenteren – de eerste	77

pogingen tot opsluiting (jaren vijftig)	
3. Het 'plasmaprobleem' en de crisis van het midden van de jaren zestig	84
4. De Sovjetdoorbraak – de triomf van de tokamak (late jaren zestig)	85
5. De blijvende erfenis – een voortijdige koerswijziging?	89
Hoofdstuk 5: Ode aan de tokamak – ontwerp en werking	93
1. Binnenin het vacuümvat – de machine gereedmaken voor een puls	94
2. Het plasma verhitten – materie tot het uiterste drijven	99
3. Het plasma in bedwang houden – de kunst van evenwicht bewaren	102
4. Een puls in realtime en een beeld van de machine als geheel	107
- De puls stap voor stap	108
- De machine als geheel	111
5. De weerbarstige werkelijkheid	114
6. Een laatste blik op de machine	120
Intermezzo: Tritiumkweek – de achilleshiel van D–T-fusie	123
1. De tritiumbrandstofcyclus	124
2. Neutronenvermenigvuldiging en materiaalkeuzes	127
3. Voorraadopbouw, verval en de harde materiaaleisen	128
4. De bredere conclusie	129
Hoofdstuk 6: Het tijdperk van de reuzen – de stormloop van de tokamak en de weg naar D–T-fusie	131
1. De aftocht van alternatieve benaderingen	131
2. De proliferatie van tokamaks van de jaren zeventig tot vandaag	132
- MIT en het Alcator-programma – compact,	133

maar extreem krachtig	
- Princeton en de PLT – het bereiken van fusierelevante temperaturen	133
- Doublet III en de ontdekking van de D-vorm	134
- De Sovjet-Unie – T-10 en schaalwetten	134
- Europa – snelle omschakeling en diversiteit	135
- Japan, China en andere landen – een wereldwijde groeigolf	135
- Een wereldwijde les – indrukwekkende successen, maar ook een steeds duidelijker signaal van zorg	136
3. De H-modusdoorbraak bij ASDEX en ASDEX-Upgrade	137
4. Het tijdperk van de ‘dinosaurussen’ en de eerste aanzet tot D–T-fusie	139
- TFTR – het eerste reuzenproject	140
- JET – Europa’s reusachtige gezamenlijke onderneming	142
- JT-60 – een Japanse reus zonder tritium	145
5. De weg geplaveid voor ITER	147
Hoofdstuk 7: ITER – ambitie, vertragingen, en aanhoudende twijfels	151
1. Ontstaansgeschiedenis en oorspronkelijke ambities – een post-dinosaurusvisie	151
2. De ‘Toren van Babel’ – internationale samenwerking en vroege hindernissen	153
3. De saga van de locatiekeuze – geopolitiek en moeizaam bevochten compromissen	158
4. De bouw gaat van start – optimisme botst met de technische realiteit	160
5. Escalerende complexiteit en verlies aan vertrouwen	162
- Technische en integratieproblemen	162
- Bestuurlijke fragmentatie en managementfalen	164
- Politieke sturing, herplanning en erosie van vertrouwen	166
6. De recente crisis en verschuivende horizonnen	168

– toenemende twijfels	
7. ITER's blijvende erfenis en hardnekkige vragen	171
– een monument van ambitie of van hoogmoed?	

Hoofdstuk 8: Het oog op China – wedden op meerdere paarden **177**

1. China's inspanningen op het gebied van tokamak-fusieonderzoek	178
2. Het smeden van de 'kunstmatige zon' – Chinese innovaties op het gebied van tokamaks	180
3. De brug naar commerciële energie – de China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR)	182
4. Buiten de grenzen – China's betrokkenheid bij het ITER-project	185
5. De Hefei Fusion Declaration – China's strategische zet	186
6. Conclusie – een nog verre horizon, een nog onbewezen belofte	189

Hoofdstuk 9: Sferische tokamaks en andere compacte concepten – een nieuwe vorm voor fusie **191**

1. Compacte belofte, geconcentreerde uitdagingen	192
– De 'geboorde appel' – waarom vorm ertoe doet	192
– Meer vermogen per eenheid volume – hoge β en magnetische efficiëntie	193
– Stabiliteit en zelforganisatie – waarom sferische tokamaks rustigere plasma's kunnen hebben	195
– De bootstrapstroom – op weg naar langdurige en quasi-continue werking	197
– Conclusie – compacte vormen, grote verwachtingen, maar geen eenvoudige weg	199
2. Van visie naar experiment – de vroege sferische tokamaks	202
3. Aan de andere kant van de oceaan – NSTX en de realiteit van reactorbouw	204
4. De opmars van de private sector – nieuwe	206

spelers, nieuw tempo	
- Tokamak Energy – sferische tokamak en HTS-magneten	207
- Commonwealth Fusion Systems – compacte kracht zonder sferische vorm	209
- Wereldwijde verbreding – China, Japan en nieuwe initiatieven	212
- Veel routes, één belofte	212
5. STEP – de gewaagde Britse sprong naar een fusiecentrale	212
- Realiteitszin geboden – technische en organisatorische barrières	214
- Ambitie, urgentie en zelfoverschatting	215
6. Vooruitblik – belofte, volharding en praktische grenzen	217
Hoofdstuk 10: Inertial Confinement Fusion – de zoektocht naar ontsteking	221
1. Het alternatieve pad – de principes van ICF	221
2. Vroege ideeën en de opkomst van krachtige lasers	224
3. Belangrijkste faciliteiten en experimentele programma's (het pre-NIF-tijdperk)	226
4. De National Ignition Facility – een monumentale onderneming	229
5. De doorbraak – wetenschappelijke ontsteking bij NIF	231
6. Wat ontsteking betekent – opbrengst, beperkingen en implicaties	234
7. Van ontsteking naar energiecentrale – de resterende hindernissen	236
8. Een laatste woord	240
Hoofdstuk 11: Het startupecosysteem – een race om de zon opnieuw te ontsteken	241
1. De verborgen strijd in het plasma – waarom fusie niet alleen om hitte draait	241

- Het nieuwe fusielandschap – startups en goudkoorts	241
- Ambitie en werkelijkheid – Helion Energy en TAE Technologies	242
- Andere routes – mechanica, elektriciteit en brute eenvoud	251
2. Inertiële opsluiting – surfen op de schokgolven van NIF's ontsteking	255
3. De terugkeer van de stellarator	260
4. Wendelstein 7-X – een monument van optimalisatie	262
5. De startups – het commercialiseren van de stellaratordroom	266
6. De menselijke factor	271
7. Tot slot – een laatste woord van nuchterheid	273
Hoofdstuk 12: Fusie-energie in 2100? Een kritische beschouwing van belofte en uitvoerbaarheid.	275
1. Van doorbraak naar blauwdruk	275
2. Wanneer de fysica stopt en de werkelijkheid begint	277
3. De opschalingsuitdaging	280
4. Afval, regulering en publiek vertrouwen	284
- Geen energie zonder samenleving	284
- Afval – minder gevaarlijk, maar niet verwaarloosbaar	285
- Regulering – voorzorg versus risico	286
- Legitimiteit en locatiekeuze	289
- Geen wondermiddel	291
5. Economie, tijdsdruk en de rol van kernfusie	292
6. Conclusie	294
Hoofdstuk 13: Samenvatting en conclusie.	297
Realiteitscheck – hindernissen en de weg vooruit	
1. Vroege dromen en koude realiteit	298
- Geheimhouding en de opkomst van de tokamak	298
- Grotere machines, beperkte vooruitgang	299

- Fusievermogen versus netto-energie	300
- Neutronenschade en materiaalproblemen	300
- Tritium – een onderschat probleem	302
- Tussenbalans na zeventig jaar	302
- Slotwoord	304
2. De ITER-saga en de aanhoudende technische worsteling	304
- Vertragingen, kosten en twijfel	305
- Een monster van techniek	305
- Brandstofcyclus – het blijvende struikelblok	307
3. De verandering van het fusielandschap	307
4. De toekomst van kernfusie – dromen, realiteit en geleerde lessen	310
5. De onzichtbare hindernissen – fusie moet niet alleen worden uitgevonden, maar ook gebouwd kunnen worden	314
6. Conclusie	316
Literatuur	319
Index	323

Acroniemen en afkortingen

ARC	Affordable, Robust, Compact
ASDEX	Axially Symmetric Divertor Experiment
ASIPP	Institute of Plasma Physics in Hefei
BEST	Burning Plasma Experimental Superconducting Tokamak
CANDU	Canada Deuterium Uranium
CCFE	Culham Centre for Fusion Energy
CDX	Current Drive Experiment
CFETR	China Fusion Engineering Test Reactor
CFC	Carbon Fibre Composite
CFS	Commonwealth Fusion Systems
CRAFT	Comprehensive Research Facility for Fusion Technology
DEMO	demonstratiereactor
DTE	deuterium-tritiumexperiment
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
EBR	Experimental Breeder Reactor
ECCD	electron cyclotron current drive
ELM	edge-localized mode
F4E	Fusion for Energy
FAST	Fusion by Advanced Superconducting Tokamak
FLARE	Fusion via Low-power Assembly and Rapid Excitation
FOAK	First of a Kind
FPP	Fusion Pilot Plant
FRC	Field-Reversed Configuration
HDC	High-Density Carbon
HELIAS	Helical-Axis Advanced Stellarator
HTS	hoge-temperatuursupergeleider
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICF	inertial confinement fusion/fusie met inertiële opsluiting
IPP	Max Planck Institute for Plasma Physics
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor

JET	Joint European Torus
JT-60	Japan Torus-60
JT-60SA	Japan Torus-60 Super Advanced
KDP	Potassium Dihydrogen Phosphate
KSTAR	Korea Superconducting Tokamak Advanced Research
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
LMJ	Laser Mégajoule
LTS	lage-temperatuursupergeleider
MAST	Mega Ampere Spherical Tokamak
MAT	Management Assessment Team
MCF	magnetic confinement fusion/fusie met magnetische opsluiting
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NBCD	neutral beam current drive
NBI	Neutral Beam Injection/neutrale bundelinjectie
NIF	National Ignition Facility
NSTX	National Spherical Torus Experiment
PLT	Princeton Large Torus
PPPL	Princeton Plasma Physics Laboratory
PWR	Pressure Water Reactor/drukwaterreactor
RF	radio frequency
REBCO	Rare-earth barium copper oxide
SIFFER	Sino-French Fusion Energy Center
SMC	Stellarator Model Coil
SMR	Small Modular Reactor
SPAC	Special Purpose Acquisition Company
SPARC	Soonest Possible ARC
ST	Spherical tokamak/sferische tokamak
START	Small Tight Aspect Ratio Tokamak
STEP	Spherical Tokamak for Energy Production
SUNIST	Sichuan University National Spherical Torus
TBM	test blanket module
TBR	Tritium breeding ratio/tritiumkweekratio
TF	toroidal field/toroïdaal veld
TFTR	Tokamak Fusion Test Reactor
TVA	Tennessee Valley Authority

UKAEA United Kingdom Atomic Energy Authority
W7X Wendelstein 7-X
WEST Wolfram (Tungsten) Environment in Steady-state Tokamak
ZETA Zero Energy Thermonuclear Assembly

Eenheden

eV	elektronvolt (1.6×10^{-19} joule)
GW	gigawatt (1 miljard (10^9) watt)
keV	kilo-elektronvolt
MA	mega-ampère
MeV	mega-elektronvolt (1 miljoen elektronvolt)
MJ	megajoules
MW	megawatt (1 miljoen watt; 10^6 joule/seconde)
TW	terawatt (1 miljard kilowatt)
TWh	terawattuur (1 miljard (10^{12}) kilowattuur)

1

De basis – waarom kernfusie ertoe doet (en wat het is)

Onze moderne wereld — een mozaïek van wereldwijde toeleveringsketens, digitale netwerken en uitdijende steden — kan niet zonder energie: immense, steeds groeiende hoeveelheden energie. Voorlopig putten we die nog uit het verleden van onze planeet, door de resten van oude levensvormen te verbranden — een weg die ons onvermijdelijk naar een klimaatcrisis en geopolitieke onrust voert. Maar al meer dan zeventig jaar wordt het idee van kernfusie — het op aarde nabootsen van het proces dat de zon van energie voorziet — naar voren geschoven als de ultieme belofte van een onuitputtelijke bron van schone energie. Als we dat eenmaal kunnen, zal alles toch nog goedkomen, is het aantrekkelijke idee. In dit hoofdstuk verkennen we de opmerkelijk eenvoudige, maar diepgaande wetenschap erachter en het grote ‘als’ dat deze utopische droom scheidt van de weerbarstige werkelijkheid.

1. De honger naar energie en de fusiedroom

Energie maakt de moderne wereld mogelijk. Telkens als we het licht aan- of uitdoen, een byte aan data versturen, in de auto stappen of het vliegtuig nemen, dragen we bij aan de kolossale, steeds sneller groeiende vraag naar energie. Die onverzadigbare honger bestaat niet alleen in ontwikkelde landen, maar over de hele wereld en zal blijven toenemen naarmate de wereldbevolking tegen het midden van deze eeuw tot bijna 10 miljard zal zijn aangegroeid. Ontwikkelingslanden streven daarbij terecht naar een verhoging van de levensstandaard van hun bevolking, om miljoenen mensen uit de armoede te tillen en hen te laten deelnemen aan de energie-intensieve wereldeconomie. De uitdaging om voor iedereen een duurzame, betrouwbare, betaalbare en rechtvaardige energievoorziening te realiseren, is wellicht de meest bepalende — en de meest intimiderende — opgave van de eenentwintigste eeuw. Die uitdaging

raakt alles, van geopolitieke stabiliteit tot menselijk welzijn.

Al meer dan een eeuw wordt het grootste deel van onze energiebehoefte gedekt door fossiele brandstoffen: steenkool, aardolie en aardgas. De moderne beschaving — haar infrastructuur en industrie — is onlosmakelijk verbonden met deze oude, koolstofrijke afzettingen. De uitzonderlijke energiedichtheid ervan en het gemak waarmee ze konden worden gewonnen en vervoerd, hebben meerdere industriële revoluties aangejaagd, ongeken­de technologische vooruitgang mogelijk gemaakt en overal ter wereld economische groei gestimuleerd. Fossiele brandstoffen zijn de onmisbare motor geweest van de vooruitgang die de wereld zoals wij die kennen heeft gevormd.

Maar deze vooruitgang, hoe weldadig en prettig die ook is voor de mens, eist een steeds hogere en onmiskenbare prijs en legt een steeds zwaardere, schier ondraaglijke last op onze planeet en op de geopolitieke stabiliteit van de wereld. Het meest ingrijpende en urgente gevolg van het voortdurende verbruik van fossiele brandstoffen is de zich versnellende klimaatcrisis. Het verbranden van deze brandstoffen brengt enorme hoeveelheden broeikasgassen in de atmosfeer, met name kooldioxide (CO₂), en warmt de aarde op. In de loop van de decennia hopen deze gassen zich op en vormen samen een soort deken die over onze planeet hangt en warmte vasthoudt. De wetenschappelijke consensus is helder en grimmig. De meetbare en steeds sneller toenemende opwarming van de aarde is in overweldigende mate het gevolg van menselijk handelen en leidt tot fundamentele veranderingen in wereldwijde klimaatpatronen.

De gevolgen zijn nu al merkbaar, met frequentere en intensere hittegolven, verwoestende overstromingen, langdurige periodes van droogte, catastrofale bosbranden en een gestaag stijgende zeespiegel. Naast deze directe effecten zijn verraderlijke, meer indirecte mechanismen aan het werk, zoals het ontdooien van de permafrost. Daarbij komen nog krachtigere broeikasgassen vrij — signalen van een complexe en mogelijk steeds verder escalerende crisis.

Het afbouwen van onze afhankelijkheid van fossiele brandstoffen is allang niet meer alleen noodzakelijk vanuit ecologisch oogpunt,

maar een absolute, existentiële voorwaarde voor de leefbaarheid en stabiliteit van onze planeet op de lange termijn. Deze noodzakelijke energietransitie moet met grote vooruitziendheid worden uitgevoerd om te voorkomen dat miljarden mensen in energiearmoede vervallen of dat de economische groei stagneert die samenlevingen nodig hebben om zich te handhaven en tot bloei te komen. Naast de zich ontvouwende ecologische ramp brengt onze diepge wortelde afhankelijkheid van fossiele brandstoffen ook grote geopolitieke kwetsbaarheden en grondstoffentekorten met zich mee. De afhankelijkheid van specifieke, vaak politiek instabiele regio's voor de wereldwijde energievoorziening leidt tot sterke prijsschommelingen, verstoringen van toeleveringsketens en spanningen tussen staten — soms zelfs tot openlijke conflicten. De geschiedenis van de twintigste en eenentwintigste eeuw kent talloze voorbeelden waarbij de toegang tot olie, gas of steenkool de buitenlandse politiek heeft bepaald, allianties in het leven heeft geroepen en oorlogen heeft ontketend. Deze afhankelijkheid van geografisch geconcentreerde energiebronnen die vaak in politiek gevoelige regio's gelegen zijn, ondermijnt de wereldwijde stabiliteit en de energieonafhankelijkheid van vele landen.

Daarnaast is het op lange termijn volstrekt onhoudbaar om op zo'n gigantische schaal de oeroude, in fossiele brandstoffen opgeslagen energie van de zon te blijven verbranden. Deze over miljoenen jaren gevormde voorraden worden in het huidige tempo in slechts enkele eeuwen opgebruikt. Ook los van de wereldwijde effecten zijn de lokale milieugevolgen van de verbranding van fossiele brandstoffen ernstig. Stedelijke gebieden gaan gebukt onder een alomtegenwoordige smog, een cocktail van stikstofoxiden en schadelijk fijnstof, die wijdverbreide ademhalings- en hart- en vaatziekten veroorzaken en dagelijks een directe impact op miljoenen levens hebben. De noodzaak van een nieuwe, schone en overvloedige energiebron is overduidelijk.

Tegen de achtergrond van deze steeds urgenter wordende milieuschade, geopolitieke problemen en aan grondstoffen gerelateerde crises is de mensheid wanhopig op zoek naar werkelijk schone, overvloedige en veilige energiebronnen — energie die onze beschaving

kan blijven voeden zonder het ecologisch evenwicht of de politieke stabiliteit van de planeet in gevaar te brengen. Al meer dan zeventig jaar koestert een toegewijde en onverminderd optimistische groep wetenschappers en ingenieurs een bijzonder verleidelijke, haast mythische droom: energie uit kernfusie. Die droom — vaak aangeprezen als de ‘heilige graal’ van de energievoorziening — biedt zicht op een vrijwel onuitputtelijke en schone energiebron door de reacties na te bootsen die de zon en de sterren van energie voorzien. In wezen zou daarmee die kosmische en verondersteld weldadige energiebron binnen handbereik van de mens worden gebracht. De aantrekkingskracht is immens, bijna utopisch, omdat zij het beeld oproept van een toekomst van ongekende energiezekerheid en tegelijkertijd harmonie met de natuur.

Kernfusie is in wezen het tegenovergestelde van kernsplijting — het proces dat in de huidige kerncentrales plaatsvindt, waarbij zware atoomkernen worden gespleten. Fusie daarentegen berust op het samensmelten van twee zeer lichte atoomkernen — de minuscule, compacte centra van atomen — tot één grotere kern. Ondanks de enorme uitdagingen en herhaalde teleurstellingen blijft de aantrekkingskracht van fusie bestaan, dankzij één onweerlegbare en diepzinnige waarheid over materie en energie — een waarheid die voor het eerst door Albert Einstein werd geformuleerd in de beroemdste vergelijking uit de natuurkunde: $E = mc^2$. Die ogenschijnlijk eenvoudige vergelijking beschrijft het geheim dat een minuscuul atoom zo’n ontzagwekkende hoeveelheid energie kan vrijmaken.

In de kern zegt Einsteins formule dat massa (m) en energie (E) geen afzonderlijke grootheden zijn, maar twee verschijningsvormen van één en hetzelfde fenomeen. Ze zijn aan elkaar gekoppeld door de factor c^2 — de snelheid van het licht in het kwadraat — een onvoorstelbaar groot getal, aangezien licht zich met ongeveer 300 miljoen meter per seconde voortbeweegt.

In de praktijk betekent dit dat zelfs een minuscule hoeveelheid massa, wanneer die volledig in energie zou worden omgezet, een verbijsterende hoeveelheid energie oplevert. Ter illustratie, een handvol zand, volledig in energie omgezet, zou theoretisch genoeg zijn om een kleine stad een jaar lang van stroom te voorzien en één

enkel suikerklontje zou een grote stad een dag kunnen verlichten. De hoeveelheid energie die in zelfs de kleinste hoeveelheden materie ligt opgesloten, gaat vrijwel elk menselijk voorstellingsvermogen te boven.

In het kernfusieproces wordt dit op indrukwekkende wijze zichtbaar. Wanneer twee zeer lichte atoomkernen — zoals de vormen van waterstof die we later zullen bespreken — onder extreme omstandigheden worden samengeperst tot één zwaardere kern, gebeurt er iets wonderlijks. De massa van die nieuwgevormde kern blijkt namelijk net iets kleiner te zijn dan de gezamenlijke massa van de twee oorspronkelijke kernen, die nu zijn samengesmolten. Dat kleine, ogenschijnlijk 'ontbrekende' beetje massa is echter niet verdwenen, maar is direct omgezet in energie — voornamelijk in de vorm van bewegingsenergie (*kinetische energie*) van de in de fusie gevormde deeltjes, energie die we willen opvangen als warmte en uiteindelijk omzetten in elektriciteit. Dit verschil tussen de massa van een atoomkern en de som van de massa's van de deeltjes waaruit de kern is opgebouwd of samengesmolten, noemen natuurkundigen het massadefect. Dit minieme verschil in massa wordt omgezet in energie en is een direct gevolg van de bindingsenergie die atoomkernen bijeenhoudt; de vrijgekomen energie is het verschil tussen de bindingsenergie vóór en na de fusie.

Het is deze omzetting van massa in energie — met deze verbijsterende energiedichtheid — die de sterren in het heelal doet branden. Het idee om dit proces op aarde na te bootsen voedt de niet-aflattende zoektocht naar het verwezenlijken van energieproductie uit kernfusie. Slechts een paar gram fusiebrandstof zou, als de reactie eenmaal succesvol op gang is gebracht, theoretisch evenveel energie kunnen leveren als duizenden tonnen steenkool of honderden vaten olie, zonder dat daarbij broeikasgassen vrijkomen. Dit duizelingwekkende potentieel verklaart waarom — ondanks decennia van tegenslagen, kolossale investeringen en steeds duidelijkere aanwijzingen voor de enorme moeilijkheden om deze technologie waar te maken — de belofte van kernfusie wetenschappers blijft fascineren en wereldwijd aanzienlijke investeringen aantrekt. De prijs — als die ooit binnen bereik komt — zou de wereld kunnen veranderen en

een tijdperk inluiden van ongekennde energie-overvloed, geopolitieke stabiliteit en herstel van het milieu. Maar dat 'als' is geen kleine kloof; het is een afgrond. De uitdagingen zijn immens.

De theoretische voordelen van kernfusie zijn, zoals vaak wordt benadrukt, buitengewoon overtuigend — bijna utopisch. Ten eerste is de brandstof in principe onuitputtelijk en overal beschikbaar. Een van de belangrijkste brandstoffen voor kernfusie, deuterium, is een isotoop — een zware vorm — van waterstof, die gemakkelijk uit gewoon water kan worden gewonnen. De hoeveelheid deuterium in de oceanen van de aarde is zo enorm dat zij de menselijke beschaving theoretisch miljoenen jaren van energie kan voorzien. Energieschaarste zou daarmee tot het verleden behoren.

Een tweede voordeel is dat kernfusie maar weinig langlevend radioactief afval produceert. In tegenstelling tot kernsplijting, waarbij de kernen van zware atomen worden gesplitst en hoogradioactief afval ontstaat dat tienduizenden tot honderdduizenden jaren gevaarlijk blijft — en dus een complexe, dure en omstreden geologische opslag vereist — zijn de directe bijproducten van fusie over het algemeen stabiel of kortlevend. Het belangrijkste product van de meest toegepaste fusiereactie is helium, een inert en niet-radioactief gas. Wel zullen, als het ooit lukt een werkende kernfusiereactor te bouwen, de structurele componenten van zo'n installatie na verloop van tijd radioactief worden door het continue bombardement met de neutrale deeltjes — de neutronen — die ook bij de fusie vrijkomen. Maar die zogeheten 'geïnduceerde' radioactiviteit is veel minder problematisch. Ze is doorgaans kortlevend en vervalt binnen enkele tientallen jaren tot hooguit een eeuw in plaats van millennia tot veilige niveaus. Deze belofte van relatief 'schoon' afval — dat mogelijk binnen enkele generaties kan worden gerecycled — vormt een belangrijk onderdeel van de aantrekkingskracht van kernfusie en zou, vergeleken met kernsplijting, het afvalverwerkingsprobleem drastisch vereenvoudigen.

Ten derde wordt kernfusie vaak gepresenteerd als een van nature veilige energiebron. Anders dan bij kernsplijting is er bij fusie geen sprake van een kettingreactie die op hol kan slaan. In een splijtingsreactor moet de reactie voortdurend actief worden gereguleerd om

oververhitting en een mogelijke ‘*meltdown*’ (kernsmelting) te voorkomen. Bij kernfusie ligt dat fundamenteel anders. Het fusieproces kan alleen plaatsvinden wanneer voldaan is aan uiterst precieze voorwaarden wat betreft temperatuur, dichtheid en opsluiting — voorwaarden die we in hoofdstuk 2 zullen bespreken. Zodra niet meer precies aan een van deze condities wordt voldaan — wanneer de brandstoftoevoer wordt onderbroken of de opsluiting van het extreem hete gas (het plasma) zelfs maar heel even wordt verstoord — valt de reactie onmiddellijk stil. Het plasma koelt daarbij binnen milliseconden af en valt uiteen.

Deze ingebouwde *passieve veiligheid* betekent dat er geen risico bestaat op een op hol slaande reactie, er geen gevaar is voor een *meltdown* en dat de scenario’s die tot de historische ongevallen in splijtingsreactoren hebben geleid hier eenvoudigweg niet kunnen optreden.

Maar de werkelijkheid die achter deze stralende belofte schuilgaat, is helaas veel weerbarstiger. Het is niet alleen een immense uitdaging om op aarde een ‘mini-zon’ te creëren, maar een probleem gebleken dat al decennialang tegen het onhaalbare aanschuurt en waarvan de praktische realisatie in deze eeuw op zijn minst hoogst onwaarschijnlijk lijkt. Ondanks talloze aankondigingen van doorbraken en optimistische persberichten is het kernprobleem in essentie steeds hetzelfde gebleven. De omstandigheden waaronder fusie moet plaatsvinden zijn zo extreem, dat het onder controle brengen ervan buitengewoon moeilijk blijkt. De moeilijkheden reiken veel verder dan het enkel laten samensmelten van twee atoomkernen; het betreft ook andere fundamentele obstakels die voorstanders vaak proberen te bagatelliseren of weg te wuiven.

Daarbij komt nog dat sommige van de aantrekkelijke claims rond fusie slechts gedeeltelijk waar zijn of berusten op aannames die in de praktijk nog moeten worden waargemaakt. Het idee van een onuitputtelijke brandstofvoorraad wordt bijvoorbeeld vrijwel altijd gepresenteerd zonder erbij te vermelden dat een van de noodzakelijke brandstoffen, tritium — ook een zware vorm van waterstof — in de natuur nauwelijks voorkomt en bovendien radioactief is. Het moet in de reactor zelf worden ‘gekweekt’ — een proces dat tech-

nisch en materiaalkundig nog lang niet is opgelost. Erger nog, waar in feite niet eens een mogelijk afdoende oplossing voor is geformuleerd.

En hoewel het waar is dat fusie geen langlevend radioactief afval produceert zoals splijting, betekent dit niet dat een fusiereactor afvalvrij zou zijn. Integendeel, zoals hiervoor al is vermeld, de hoog-energetische neutronen die bij fusie vrijkomen maken het reactor-materiaal na verloop van tijd zelf radioactief. Het is waar dat dat afval geen tienduizenden jaren gevaarlijk blijft, maar wel tientallen tot honderd — en gedurende die tijd moet het veilig worden opgeslagen, beheerd en uiteindelijk vervangen. Dat vormt een aanzienlijke praktische, logistieke en economische last, die in al te enthousiaste beschrijvingen vaak wordt onderschat of gewoon niet wordt genoemd.

Met andere woorden, het ideaalbeeld van fusie als de volmaakte schone en eindeloze energiebron bestaat alleen in de verbeelding. De werkelijkheid is technisch zeer gecompliceerd en aanzienlijk hardnekkiger dan de belofte doet vermoeden.

Dit boek onderzoekt de wetenschap, de historische context en de technische en materiaalkundige obstakels die het fusieonderzoek al decennialang parten spelen en de vooruitgang ervan vaak tot een frustrerend langzaam tempo vertragen. We zullen de wijdverbreide en soms misleidende of al te optimistische verwachtingen ontrafelen, om tot een realistische en nuchtere beoordeling te komen van de vraag of deze verleidelijke energiebron ooit werkelijk de stap kan maken van een complexe, experimentele opstelling naar grootschalige energieopwekking. We bespreken daarbij zowel de wetenschappelijke doorbraken als de blijvende, fundamentele uitdagingen.

2. Atomen, energie en sterren – de natuurlijke thuisbasis van fusie

Om de immense uitdaging van kernfusie te begrijpen, moeten we eerst het zeer kleine onder de loep nemen: de fundamentele bouwstenen van alles om ons heen. Onze reis begint op het niveau van het atoom, een domein dat wordt beheerst door krachten en principes die ver afstaan van onze dagelijkse ervaring.

Elke stof, of het nu de lucht is die we inademen, het water dat we drinken of de vaste grond onder onze voeten, is opgebouwd uit kleine deeltjes die we atomen noemen. Een atoom wordt vaak voorgesteld als een soort miniatuurzonnestelsel, met elektronen die om een kern heen cirkelen. De kern in het centrum is een extreem compacte en dichte concentratie van materie. De elektronen zijn veel kleinere, negatief geladen deeltjes die zich met enorme snelheden rond de kern bewegen en door de elektromagnetische kracht eraan gebonden blijven.

Die kern zelf bestaat uit twee soorten deeltjes: protonen en neutronen. Protonen hebben een positieve elektrische lading. In een neutraal atoom is het aantal protonen gelijk aan het aantal elektronen, zodat het geheel elektrisch neutraal is. Het aantal protonen (of elektronen) bepaalt de identiteit van een atoom — welk *element* het is. Eén proton betekent waterstof; zes protonen betekent koolstof; acht protonen zuurstof; enzovoort. Neutronen daarentegen hebben geen elektrische lading; ze zijn neutraal. Hun voornaamste functie in de kern is massa toevoegen en, belangrijker nog, bijdragen aan de krachten die de kern bijeenhouden. Ze veranderen de identiteit van het element niet, maar zijn van cruciaal belang voor de stabiliteit van de kern.

Waterstof heeft altijd precies één proton. Maar wat gebeurt er als zich in diezelfde kern behalve het proton ook nog één of twee neutronen bevinden? Daarmee komen we bij een belangrijk begrip: *isotopen*. Isotopen zijn verschillende varianten van hetzelfde element. Ze hebben altijd hetzelfde aantal protonen in de kern — en behouden daardoor dezelfde chemische eigenschappen — maar verschillen in het aantal neutronen. Voor het kernfusieverhaal zijn de isotopen van waterstof van doorslaggevend belang.

De meest voorkomende vorm van waterstof noemen we eenvoudigweg waterstof (H). De kern bestaat uit één proton, zonder neutronen. Het is uniek onder de elementen omdat de kern uit één enkel deeltje bestaat. Daarnaast is er deuterium (D), vaak ‘zwaar waterstof’ genoemd. Deuterium heeft een kern met één proton en één neutron. Het is een stabiele isotoop — dus niet radioactief — en komt van nature in geringe hoeveelheden voor in gewoon water.

Ongeveer één op de 6.500 waterstofatomen in zeewater is deuterium en komt daarin voor als D_2O in plaats van gewoon water, H_2O . Dat lijkt weinig, maar gezien de omvang van de wereldzeeën betekent dit in de praktijk een vrijwel onuitputtelijke voorraad. De derde belangrijke isotoop is tritium (T), ofwel ‘superzwaar waterstof’. De kern van tritium bestaat uit één proton en twee neutronen. Tritium is radioactief, dat wil zeggen het is instabiel en vervalt na verloop van tijd in helium. Daarbij zendt het een laag-energetisch geladen deeltje uit — een zogenoemd bètadeeltje — dat in feite niets anders is dan een elektron². De ware aard van elektronen werd nog niet volledig begrepen toen dit type straling voor het eerst werd geïdentificeerd, waardoor de term bètadeeltje is blijven hangen.

Tritium heeft een halfwaardetijd van ongeveer 12,3 jaar, hetgeen betekent dat na die periode de helft van een hoeveelheid tritium is vervallen. Door die radioactiviteit en relatief korte halfwaardetijd komt tritium in de natuur vrijwel niet voor. Zoals eerder vermeld moet tritium daarom in de reactor zelf worden gekweekt — een van de grootste en potentieel onoverkomelijke obstakels voor praktische kernfusie.

Maar hiermee zijn we er nog niet. Want als de kern van een atoom uit één of meer positief geladen protonen bestaat, rijst vanzelfsprekend de vraag waarom zo’n kern niet direct uiteenvalt. Gelijke ladingen stoten elkaar immers af en protonen in een atoomkern doen dat ook. Die afstoting is het gevolg van de elektromagnetische kracht — de kracht die we kennen van elektriciteit, magnetisme en de chemische bindingen die atomen tot moleculen binden. Hoe dichter protonen bij elkaar komen, hoe sterker deze afstotende kracht wordt. Dit vormt een enorme energiedrempel, bekend als de Coulomb-barrière, die moet worden overwonnen voordat kernen überhaupt de kans krijgen om dicht genoeg bij elkaar te komen om te versmelten.

Daartegenover staat echter een andere, veel sterkere kracht, die de sterke kernkracht genoemd wordt. Dit is de sterkste kracht die we in de natuur kennen, maar ze werkt slechts op uiterst kleine

² Wellicht is het goed op te merken dat dit elektron uit de kern van het atoom komt (door het verval van een neutron in een proton). Het heeft niets te maken met de elektronenwolk rondom de atoomkern.

afstanden — kleiner dan de afmetingen van de kern zelf, in de orde van een femtometer (10^{-15} meter oftewel één duizend miljardste millimeter). Zodra protonen en neutronen dicht genoeg bij elkaar komen, bindt de sterke kracht de kerndeeltjes en overwint zij de elektromagnetische afstoting volledig. Hierbij spelen neutronen een cruciale rol. Hoewel neutronen geen elektrische lading hebben en dus niet bijdragen aan de afstotende elektromagnetische kracht, dragen zij wel bij aan de sterke kernkracht. Je zou kunnen zeggen dat ze fungeren als een soort nucleaire lijm. Voor elke atoomkern met meer dan één proton zijn neutronen onmisbaar voor stabiliteit. Zonder neutronen zouden twee of meer protonen elkaar onmiddellijk afstoten en uit elkaar drijven. Daarom bestaan er geen stabiele kernen die alleen uit protonen bestaan. Alleen waterstof, met slechts één proton in de kern, vormt hierop een uitzondering. Via de sterke kernkracht leveren neutronen extra aantrekkingskracht in de atoomkern, waardoor protonen ondanks hun onderlinge elektrische afstoting toch samen met de neutronen een stabiele kern kunnen vormen. Via de sterke kernkracht versterken neutronen de binding in de atoomkern, waardoor protonen dicht genoeg bij elkaar kunnen komen om samen een stabiele kern te vormen ondanks hun elektrische afstoting.

Het is net als bij twee sterke magneten met gelijke polen die naar elkaar toe worden geduwd, waarbij ze elkaar krachtig afstoten. Als het op de een of andere manier zou lukken ze net dicht genoeg bij elkaar te brengen en daardoor een veel sterkere kracht zou gaan werken, dan klikt alles in één keer vast. De uitdaging bij kernfusie is precies dat: de kernen over de Coulomb-barrière heen helpen zodat de sterke kernkracht het kan overnemen.

De energie die bij kernfusie (en kernspijting) vrijkomt hangt samen met subtiele veranderingen in de bindingsenergie van de atoomkern — de energie die protonen en neutronen bijeenhoudt. Wanneer twee lichte kernen versmelten tot één zwaardere kern, blijkt die nieuwe kern doorgaans hechter gebonden te zijn dan de oorspronkelijke kernen. Het verschil in bindingsenergie correspondeert, zoals we eerder zagen, met een klein massadefect, dat volgens $E = mc^2$ wordt omgezet in energie. Het essentiële inzicht is dat voor lich-

te elementen (lichter dan ijzer) de bindingsenergie per kerndeeltje toeneemt wanneer zij samensmelten. Fusie levert dan energie op. Voor zware elementen (zwaarder dan ijzer) neemt de bindingsenergie per kerndeeltje juist toe wanneer zij worden gesplitst. Splitsing levert dan energie op. Met andere woorden, fusie *bouwt op* naar grotere stabiliteit; splitsing *breekt af* naar grotere stabiliteit. Precies om die reden spelen de lichtste elementen in het heelal — en met name de isotopen van waterstof — een hoofdrol in het streven naar energie uit kernfusie.

Het meest indrukwekkende voorbeeld van kernfusie vinden we in onze eigen kosmische achtertuin: de zon — en elke ster aan de nachtelijke hemel. Zoals alle sterren is de zon een gigantische, natuurlijke fusiecentrale, die onafgebroken lichte elementen omzet in zwaardere en daarbij enorme hoeveelheden energie uitstraalt. Die energie voorziet onze planeet van licht en warmte en maakt het leven op aarde mogelijk.

Het succes van de zon wordt door voorstanders van kernfusie vaak aangehaald als bewijs dat fusie ‘werkt’. Maar die analogie is misleidend, omdat het fusieproces in de zon fundamenteel verschilt van wat wij op aarde proberen te realiseren. In de kern van de zon heersen extreme omstandigheden, met een temperatuur van ongeveer 15 miljoen graden Celsius en een enorme druk, veroorzaakt door de eigen massa. Die zwaartekracht perst waterstofkernen zo dicht op elkaar dat zij, ondanks hun elektrische afstoting, toch kunnen versmelten. De zon fuseert daarbij vooral gewone waterstof, via een traag meerstapsproces, de proton-protonketen. Dat proces levert alleen zoveel energie op omdat de zon enorm groot is en miljarden jaren door zwaartekracht stabiel bij elkaar is gehouden.

De zon brandt dus niet omdat fusie daar ‘gemakkelijk’ is, maar omdat zij tijd en massa in overvloed heeft. Op aarde hebben we die zwaartekracht niet. Daarom moeten we een andere strategie volgen en onze fusiebrandstof verhitten tot temperaturen van 100 tot 200 miljoen graden Celsius, zo’n tien keer zo hoog als de temperatuur in het centrum van de zon, zodat de atoomkernen snel genoeg bewegen om de Coulomb-barrière te kunnen doorbreken. Daarom richt fusieonderzoek op aarde zich vooral op de fusie van

deuterium en tritium (D–T), de twee isotopen van waterstof die we hierboven hebben besproken. Van alle bekende fusiereacties vereist deze reactie de laagste ontbrandingstemperatuur — hoewel die nog steeds extreem hoog is.

De slogan “We bouwen een mini-zon op aarde” klinkt meeslepend, maar wekt een verkeerd beeld. In werkelijkheid proberen we iets veel moeilijkers te doen dan wat in de zon vanzelf gebeurt — omdat we de zwaartekracht missen die de zon gratis bezit. Waar de zon een trage, gelijkmatige verbranding uitvoert onder enorme druk, proberen wij een veel hetere, uiterst ijle gasfase — een plasma van deuterium en tritium — bijeen te houden in een bijna volmaakt vacuüm, zonder ook maar iets te raken. Zodra het plasma ook maar even contact maakt met materie, koelt het onmiddellijk af en stopt de fusie. Daar komt bij dat deze fusie berust op een brandstof — tritium — die zeldzaam, radioactief en uiterst moeilijk in voldoende hoeveelheden te produceren is.

Wie de vergelijking zorgvuldig bekijkt, ziet hoe fundamenteel verschillend — en hoe veel uitdagender — de aardse zoektocht naar fusie is, vergeleken met het proces dat in de zon en de andere sterren vanzelf optreedt. We proberen iets te realiseren waarvoor de natuur zelf geen automatische route heeft voorzien en we moeten daarbij de grenzen van fysica, materiaalkunde en techniek tot aan de rand van het haalbare verleggen.

