



Vijftig jaar
plasmafysica
bij FOM-Rijnhuizen

1959 | 2009

Hittebarrière

ANOUCK VROUWE

Rijnhuizen

Hittebarrière

Vijftig jaar plasmafysica bij FOM-Rijnhuizen



ANOUCK VROUWE

Voorwoord

Toen FOM-Rijnhuizen werd gesticht, gebeurde de fysica in de stad. De veelal universitaire laboratoria stonden op prominente plaatsen in het centrum van steden: het voormalige Kamerlingh Onnes laboratorium in Leiden en de laboratoria van Van der Waals en Zeeman in Amsterdam zijn markante voorbeelden. In de jaren zestig begon de opmerkelijke groei van de universiteiten en van de natuurkundelaboratoria. In de steden ontbrak de ruimte en de trek naar buiten begon. In die tijd zocht de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) naar een locatie voor het Instituut voor Plasmafysica. In Utrecht was geen plaats meer en de nieuwe locatie van de Universiteit van Utrecht, de Uithof, was toen nog niet bekend. Het werd Jutphaas, dat later opgeslokt zou worden door de groeigemeente Nieuwegein.

De beginnende uittocht van de bètastudies luidde ook de oprichting van instituten in voor het doen van gericht onderzoek. Instituten deden wat te groot, te complex en te langdurig leek voor een universiteit; focus en massa *avant la lettre*. De instituten waren autonoom binnen een koepelorganisatie, maar hadden altijd bindingen met universiteiten. De eerste generatie directeuren (net als de eerste generatie promovendi) was voor onbepaalde tijd benoemd. Een groeiende pluriformiteit in de koepel FOM en in de maatschappij maakte het besturen van de instituten lastiger, omdat de invloed van 'buiten' sterk toenam.

In 2009 werkt de Stichting FOM aan Subatomaire fysica, Nanofysica/technologie, Gecondenseerde materie & optische fysica, Fysica van levensprocessen, Fusiefysica en Fenomenologische fysica. Van deze onderwerpen zijn alleen 'nano' en 'leven' nieuw in de portfolio. Verder is er een sterke continuïteit van wat natuurkunde is en beoefent. De financiering van de natuurkunde is echter ingrijpend veranderd. Vroeger was het in de meeste gevallen een min of meer continue stroom, voor degenen, die zich in de gemeenschap van FOM een plaats hadden veroverd. Nu zijn er FOM-programma's en projecten uit de projectruimte. Losse kleine brokken, die iedere keer met grote inspanning van velen veroverd moeten worden. De lange adem heeft het moeilijk in de strijd tegen steeds veranderende modes van de dag.

Rijnhuizen is meer dan fusie alleen, maar fusie is wel de focus van het instituut. Het merendeel van dit boek is daaraan gewijd. Het uiteindelijke doel is ambitieus: *Let us build a sun on Earth*. Het duurt lang, want het is heel moeilijk. Als fusie eenmaal werkt, is het energieprobleem opgelost. De vooruitgang bij fusie is sneller geweest dan die in de halfgeleider-industrie, vaak aangehaald om het enorme tempo waarin computerchips verbeterd worden. Dit boek geeft aan hoe lang de weg was: relevante plasmadichtheden werden vroeger gemeten in microseconden, nu in seconden en in de toekomst willen we naar jaren. We zijn ver, op een logaritmische schaal over de helft. Toch is fusie werk waarvoor een lange adem nodig is. Dat vereist continuïteit in ondersteuning, voortdurende waakzaamheid over het wetenschappelijk/technisch niveau, en een open oog voor het toepassen van de nieuwste technologie en verse fysica om de droom van fusie te realiseren.

Het is moeilijk om je te onttrekken aan de betovering van fusie: het is het laatste vuur dat de mensheid nog niet beheerst. Hopelijk worden fusiefysici niet net als Prometheus aan een rots geketend!



Rijnhuizen mag zich gelukkig prijzen met een boeiende mengeling van wetenschap, geavanceerde instrumentatie, atomistisch denken en veel vacuüm als verbindend element. Deze mix maakt Rijnhuizen uniek: big en small science, wetenschap met internationale infrastructures en open access, wetenschap met internationaal bepaalde focus, wetenschap voor eigen excellentie, wetenschap in nauwe samenwerking met de industrie.

Dit boek heeft fusie als rode draad, maar net zoveel impact hebben het huidige werk met de vrije elektronenlaser Felix en het unieke werk aan de optiek van de volgende generatie waferscanners, die mede de passie voor fusie hebben gevoed. Nieuwe paden inslaan is de aard van levende wetenschap en Rijnhuizen is al vijftig jaar een levend wezen. Een unieke cultuur in een fantastisch park met een betoverend doel. Ik wens u evenveel plezier bij het lezen daarover, als de Rijnhuizenaren in vijftig jaar hebben beleefd gedurende hun tijd aan het instituut.

Aart Kleyn
Directeur FOM-Rijnhuizen ■

1959 | 2009

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1	
<i>Gloeïende materie</i>	6
Hoofdstuk 2	
<i>Fusie in het licht</i>	14
Hoofdstuk 3	
<i>Te kort en te koud</i>	24
Hoofdstuk 4	
<i>Het type Tokamak</i>	36
Hoofdstuk 5	
<i>Metten is zweten</i>	54
Hoofdstuk 6	
<i>De olie voorbij</i>	64
Hoofdstuk 7	
<i>Gebundelde krachten</i>	74
Hoofdstuk 8	
<i>Verbreiding</i>	86
Hoofdstuk 9	
<i>De lange weg naar ITER</i>	98
Hoofdstuk 10	
<i>Je moet het onderzoeken</i>	108

Hoofdstuk 1

Gloeiende materie

Plasma, het:

- 1 het vloeibare, kleurloze bestanddeel van bloed
- 2 aggregatietoestand: een (gedeeltelijk) geïoniseerd gas, waarin de ionen en elektronen los van elkaar bewegen.

In 1971 zocht het FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen een technicus. Rijnhuizen was een van de drie onderzoeksinstituten van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM). Paul Smeets solliciteerde op de baan. „Ik had geen idee wat plasmafysica was, ik dacht dat het over bloed ging. Maar bij mijn sollicitatie was wel duidelijk dat het werk niets met bloedplasma's te maken had. Ik kreeg wat folders mee over kernfusie.” Want dat was waar Rijnhuizen onderzoek naar deed: kernfusie – het samensmelten van lichte atoomkernen tot zwaardere. Bij dit proces komt veel energie vrij. Fusie gebeurt niet spontaan bij kamertemperatuur. Het komt alleen onder extreme omstandigheden op gang. In een heet plasma bijvoorbeeld. En dan geen opgewarmd bloedplasma, maar een plasma zoals natuurkundigen het kennen – een geïoniseerd gas. Ondanks zijn verwarring werd Smeets aangenomen: het was het begin van zijn lange, succesvolle carrière bij FOM-Rijnhuizen.

Smeets' vergissing was te begrijpen: nog steeds zullen veel mensen bij het woord plasma eerder aan bloedplasma denken dan aan geïoniseerde gassen. Het was de Amerikaanse chemicus en latere Nobelprijswinnaar Irving Langmuir die in 1927 voor het eerst het woord 'plasma' gebruikte voor een gasmengsel van ionen en elektronen. De manier waarop ionen en elektronen werden meegevoerd in het geïoniseerde gas deed hem denken aan een bloedplasma, dat rode en witte bloedcellen vervoert.

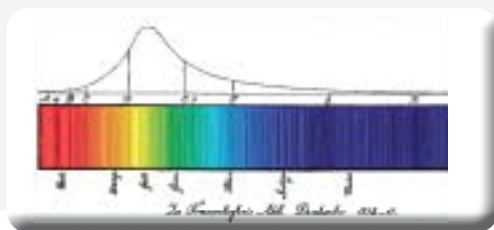
Ook de academici die in die tijd bij Rijnhuizen solliciteerden, wisten vaak niets van plasmafysica. Fysicus Noud Oomens, later instituutsmanger, begon hetzelfde jaar als Smeets op Rijn-

1671: Bij een experiment van de chemicus Robert Boyle komt een brandbaar gas vrij. Pas een eeuw later blijkt dat het hier om waterstof ging.

1850: Litho van kasteel Rijnhuizen van Isaac Cornelis Elink Sterk



1814: De Duitser Joseph von Fraunhofer ontdekt honderden donkere lijnen in het zonnespectrum.



In 1859 begrijpen Gustav Kirchhoff en Robert Bunsen dat dit absorptielijnen zijn. De lijnen verraden de chemische samenstelling van de zon. In het spectrum wordt een nieuw element ontdekt: helium, vernoemd naar de Griekse zonnegod Helios.

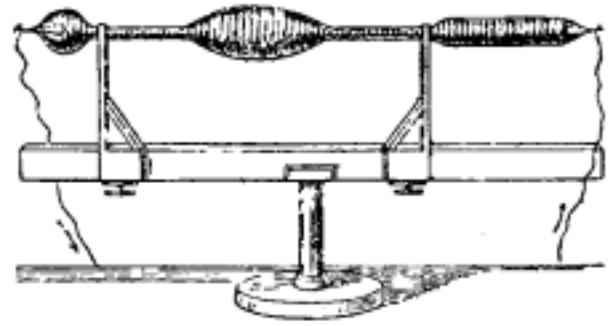


huizen. Hij haalde voor zijn sollicitatiegesprek een boekje over plasmafysica uit de universiteitsbibliotheek, omdat hij daar in zijn colleges niets over had geleerd. Het vakgebied was nog niet doorgedrongen in het curriculum van de universiteiten.

Toch was het onderzoek naar plasma's niet helemaal nieuw. De mensheid was altijd al gefascineerd door plasma's in de natuur – het vuur, de bliksem, het poollicht. De basis van de plasmafysica werd halverwege de negentiende eeuw gelegd. De Duitse natuurkundige Heinrich Geißler leerde van zijn vader glasblazen en gebruikte deze vaardigheid om gasontladingsbuisen te maken. Wanneer Geißler in de grotendeels leeggepompte buizen een elektrische ontlading op gang bracht, straalden ze een zachte gloed uit. De Britse wetenschapper Sir William Crookes verbeterde het ontwerp. Hij maakte een langwerpige glazen buis met een anode aan de ene en een kathode aan de andere kant. In deze buis van Crookes ontstaat een groen schijnsel wanneer er een groot spanningsverschil over de uiteinden wordt gezet. Maar het was uiteindelijk Sir Joseph Thomson, die ontrafelde waar deze 'gloeiende materie' uit bestond. Hij concludeerde dat er hier naast licht ook geladen deeltjes in het spel moesten zijn, die reageerden op elektrische velden. Thomson leidde in 1896 op basis van een reeks experimenten het bestaan van een klein, licht deeltje af, met een negatieve lading. Het elektron was ontdekt.

Geisslerbuis

Sir Joseph Thomson,
ontdekker van
het elektron



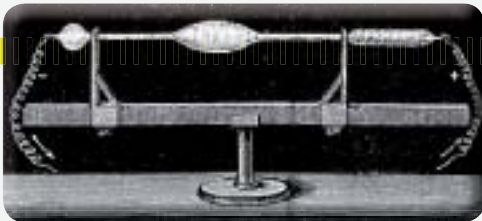
Rurka Geisslera.



1883: De Britse wetenschapper William Crookes wordt lid van de Royal Society. Crookes deed onderzoek naar elektrische ontladingen in gassen bij lage druk. Hiervoor gebruikte hij een lange vacuümbuis met aan de uiteinden een anode en kathode: een Buis van Crookes.



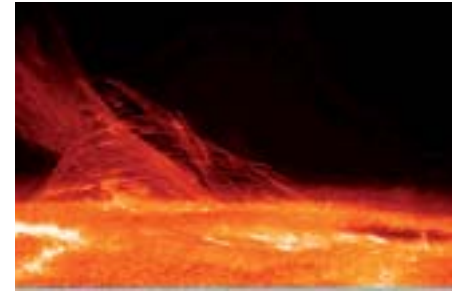
1857



1857: De Duitse fysicus Heinrich Geißler experimenteert met gasontladingsbuisen. De buizen

zenden helder licht uit, waarbij de kleur afhangt van het gas in de buis. De naar hem genoemde geisslerbuisen worden razend populair: ze zijn al snel in allerlei kleuren en exotische vormen te krijgen.

1883



De zon stoot een wolk
heet plasma uit:
een zonnevlam.

Fusie is de energiebron
van de sterren

Toen duidelijk was geworden dat plasma uit ionen en elektronen bestond, kregen wetenschappers meer grip op deze 'vierde toestand' van materie. In 1959 was het vakgebied al volwassen genoeg om te zijn opgesplitst in verschillende richtingen. Astrofysici bestudeerden de plasma's in het heelal. Dichter bij de aarde was er het onderzoek naar de ionosfeer, de geïoniseerde

laag rond de aarde. En er werd fusie-onderzoek gedaan: militair onderzoek naar de waterstofbom en onderzoek aan *gecontroleerde fusie*, waarbij de onderzoekers de vrijgekomen energie wilden gebruiken om stroom op te wekken. Fusie was destijds nog een tamelijk jonge ontdekking. Een ontdekking die een einde had gemaakt aan een hoog oplopend

1896: Sir Joseph Thomson ontdekt dat er in geïoniseerd gas negatief geladen deeltjes zitten, die hij *corpuscule* noemt. Later kreeg dit deeltje de naam elektron. Thomson krijgt in 1906 de Nobelprijs voor de Natuurkunde.



1896

1901



12 DECEMBER 1901: Marconi stuurt een radiosignaal over de Atlantische Oceaan. Dat dit mogelijk is, toont het bestaan van de ionosfeer aan. Deze atmosfeerlaag van geïoniseerd gas reflecteert radiosignalen, waardoor ze grote afstanden kunnen overbruggen.



Gloeiend waterstofplasma in een glazen torus

wetenschappelijk debat, dat rond 1900 was losgebarsten. Het was in die tijd een raadsel op welke brandstof de zon liep. Of natuurkundigen nou kolen of een andere brandstof kozen, hun berekeningen lieten steeds zien dat de zon er niet lang op kon branden. Dat betekende dat de zon relatief jong zou moeten zijn; twintig, vijftig, hooguit honderd miljoen jaar. Maar dat idee strookte weer niet met de vermoedelijke leeftijd van de aarde: geologen dachten dat de aarde veel ouder was dan dat. Het vraagstuk werd een twistappell in het debat over de evolutietheorie.

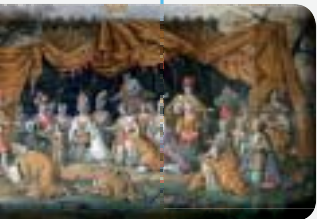
Het duurde tot de jaren twintig voor de oplossing voor het raadsel van de zonnebrandstof in zicht kwam. De latere Nobelprijswinnaar Francis Aston ontdekte dankzij zeer nauwkeurige experimenten dat waterstofatomen in verhouding iets zwaarder zijn dan andere elementen. De Engelse astrofysicus Edmund Eddington zag de betekenis van deze metingen in. Hij speculeerde

dat kernfusie de energiebron van de zon zou kunnen zijn: wanneer waterstof fuseert tot het zwaardere helium, blijft er wat massa over die via Einsteins $E=mc^2$ in energie wordt omgezet. Daarmee zou ook

het leeftijdsprobleem van de zon zijn opgelost: voor fusie was veel minder brandstof nodig dan voor chemische verbranding. Eddington fantaseerde zelfs al voorzichtig over het idee om kernenergie op aarde in te zetten. 'Soms dromen we dat de mensheid op een dag zal leren hoe je deze energie kunt bevrijden en gebruiken', zo schrijft hij in het blad *The Observatory* in oktober 1920.

Maar kernfusie is niet Eddingtons enige speculatie over de energiebron van de zon; hij denkt ook aan annihilatie, een proces waarbij twee deeltjes elkaar uitvlakken en energie vrijkomt. Het zijn uiteindelijk de Duitsers Carl Friedrich von Weizsäcker en Hans Bethe die tegen het eind van de jaren dertig de kernprocessen in sterren exact beschrijven. Zij bewijzen dat kernfusie

1919: De Alexanderzaal van kasteel Rijnhuizen in 1919.



1919

1927: De Amerikaanse chemicus Irving Langmuir gebruikt het woord 'plasma' voor een gasmengsel van ionen en elektronen.

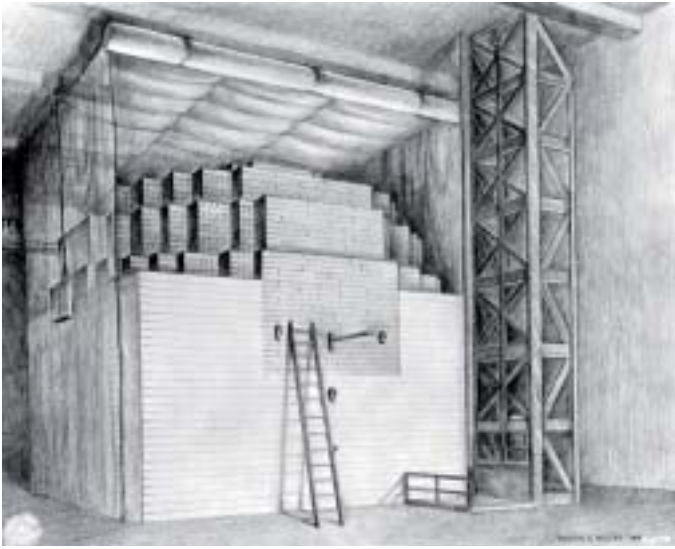


1927

1920: De scheikundige Francis Aston toont aan dat waterstofatomen relatief zwaar zijn ten opzichte van andere elementen. De astrofysicus Sir Edmund Eddington beseft dat dit kan betekenen dat op de zon waterstof tot helium fuseert, waarbij de restmassa via Einsteins $E=mc^2$ in energie wordt omgezet.

1920





Kernreactor Chicago Pile-1: op 2 december 1942 wekken fysicus Enrico Fermi en zijn team de eerste zichzelf in stand houdende kernreactie op.

inderdaad de energiebron van de zon is. In dezelfde tijd wordt ook kernsplijting ontdekt. Bij dit proces breekt een zware atoomkern in brokstukken, die samen wat lichter zijn dan de kern voorheen was. Ook hier wordt massa in energie omgezet. De mensheid leert daarna snel hoe zij kernenergie kan bevrijden en gebruiken. Tijdens de Tweede Wereldoorlog ervaart de wereld de woeste kracht van kernsplijting, als er atoombommen op Hiroshima en Nagasaki vallen. Binnen een paar jaar leren wetenschappers die kracht te beteugelen: in 1951 branden er op de Universiteit van Chicago vier 150 watt-

Ivy Mike, de eerste waterstofbom



gloeilampen op de stroom van de eerste proefcentrale en in 1954 wordt in Obninsk in de Sovjet-Unie de eerste kerncentrale aangesloten op het elektriciteitsnet. De verwachting is dat fusie dezelfde weg zal gaan. Eerst de bom – de waterstofbom – en dan de beheerste reactie in een fusiecentrale. In 1952 testen de Verenigde Staten Ivy Mike, de eerste waterstofbom. Hij wordt op de Marshalleilanden in de Stille Oceaan tot ontploffing gebracht. De explosie veroorzaakt een paddenstoelwolk van zeven kilometer hoogte. De bom bestaat uit twee trappen: een splijtingsreactie levert de energie om de fusiereactie op gang te brengen. Ivy Mike veroorzaakt een grote krater en vloedgolven. De trillingen van de ontploffing laten duizenden kilometers verderop de naalden van de seismografen uitslaan. De radioactieve fall out besmet de eilanden in de buurt. Met Ivy Mike is de kracht van fusie bewezen. De kunst is nu – net als bij splijting – die kracht te beteugelen, zodat de energie ook voor het opwekken van stroom kan worden ingezet. Er lopen onderzoeksprogramma's in de Verenigde Staten, Groot-

1938: Natuur- en sterrenkundige Hans Bethe beschrijft de fusieprocessen in sterren.



1938: In de vs worden de eerste experimenten gedaan met het opsplitsen van plasma met magneetvelden.

1934

1938

1934: In het laboratorium van Ernest Rutherford wordt voor het eerst tritium gemaakt.

Fusie: pure zonne-energie

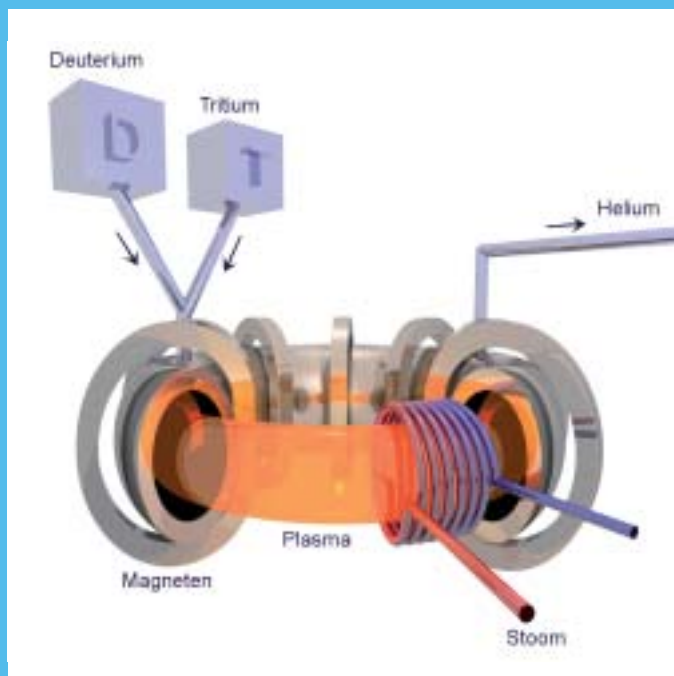
Een zon op aarde – het is de koosnaam die fysici hun fusiereactoren graag geven. Op de zon fuseren waterstofkernen tot helium. Bij dat proces verdwijnt massa en ontstaat energie, volgens Einsteins formule $E=mc^2$. Maar fusie komt niet spontaan op gang. Atoomkernen zijn positief geladen en stoten elkaar af. Normaal gesproken komen ze daardoor niet dicht genoeg bij elkaar in de buurt om te fuseren. Door de hoge temperatuur en grote druk van de zon lukt het daar wel. Want hoe heter het is, hoe sneller de atoomkernen bewegen en hoe groter de kans dat ze bij een botsing dicht genoeg bij elkaar komen om te fuseren.

De fusiereactoren die hier op aarde worden gebouwd, werken volgens hetzelfde principe: lichte kernen versmelten er tot zwaardere. Maar de vergelijking met de zon gaat niet helemaal op. De zon brandt namelijk op een laag pitje: de temperatuur wordt er 'maar' 15 miljoen graden, net genoeg voor fusie. Voor een fusiereactor is 15 miljoen graden echter te weinig; de hoge druk van de zware zon wordt hier niet gehaald. Om daarvoor te compenseren moeten de fysici het vuurtje op aarde hoger opstoken, tot een temperatuur van 150 miljoen graden.

Daarnaast gebruiken zij een andere fusie-reactie dan de meest voorkomende fusie-reactie op de zon. In plaats van twee waterstofkernen fuseren zij tritium- en deuteriumkernen, de twee zwaardere isotopen van waterstof. Die fusie-reactie is het makkelijkst op gang te brengen. De eindproducten zijn helium, neutronen en veel energie.

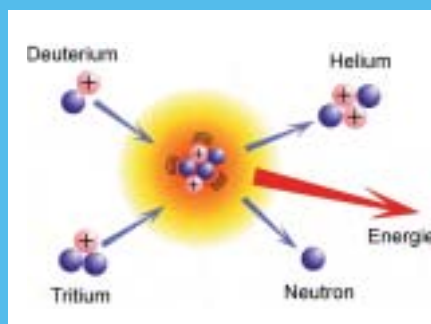
De brandstoffen voor fusie zijn ruim voorradig. Deuterium is uit water te halen: één liter water bevat 33 milligram deuterium. Het radioactieve tritium vervalst snel en komt daardoor van nature niet op aarde voor. Maar het kan eenvoudig worden geproduceerd door het metaal lithium te beschieten met neutronen. Lithium splitst dan in helium en tritium.

Bij een kernreactie komt veel meer energie vrij dan bij een chemische reactie. Daardoor heeft een fusiereactor maar



weinig brandstof nodig. Een elektriciteitscentrale van 1000 megawatt verstoekt per jaar ruim 2,5 miljoen ton steenkool. Een fusiereactor met datzelfde vermogen heeft in een jaar slechts 250 kilo deuterium en tritium nodig. Een ander voordeel is dat de fusie-reactie geen CO_2 oplevert. Anders dan bij een kerncentrale zijn er voor een fusiecentrale geen radioactieve grondstoffen nodig. Maar het proces levert wel radioactief materiaal op. Bij de fusie-reactie komen hoogenergetische neutronen vrij, die de wand van de reactor licht radioactief maken. Dit heeft tot gevolg dat het onderhoudswerk aan de reactor met robots moet gebeuren. Na gebruik moet de wand nog minstens een halve eeuw worden opgeslagen.

In de jaren vijftig werd gedacht dat kernfusie een onuitputtelijke en goedkope energiebron zou zijn. De kranten schreven dat fusie ervoor ging zorgen dat energie zo goed als gratis werd. Dat was veel te optimistisch. De brandstof voor fusie is inderdaad goedkoop en ruim voorradig, maar de reactor zelf zal dat niet zijn. Om een heet plasma op te sluiten is complexe – en dus dure – technologie nodig. Een fusiecentrale zal miljarden kosten. Schattingen wijzen erop dat de kosten van fusie-energie uiteindelijk vergelijkbaar zullen zijn met de productiekosten van andere duurzame energiebronnen. De energieprijzen zal de komende eeuw vermoedelijk flink stijgen, waardoor duurzame energie rendabel wordt. ■



FUSIEREACTIE

deuterium + tritium →
helium + neutron +
energie (17,6 MeV)



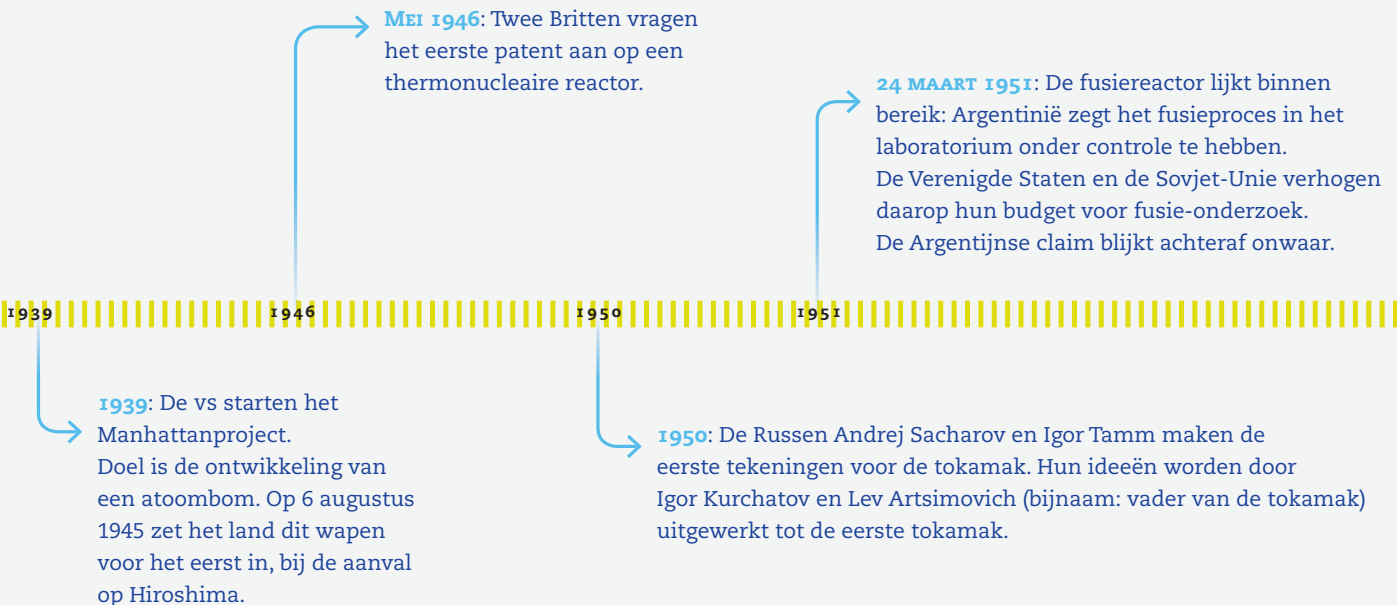
Lente in het
park van kasteel
Rijnhuizen

Britannië en de Sovjet-Unie. De Amerikaanse fysicus Richard Post werkt voor het Lawrence Livermore National Laboratory aan gecontroleerde fusie. Hij schrijft in 1956 een artikel over de fusiereactor: 'De technische problemen die nog wachten lijken erg groot. Sommige natuurkundigen zullen ze onoplosbaar noemen'. De Verenigde Staten, Groot-Brittannië en de Sovjet-Unie wer-

ken onafhankelijk van elkaar in het geheim aan fusie. Geen van drieën slagen ze erin de technische problemen binnen een paar jaar te kraken. Dan gooien ze het onderzoek open, zodat andere landen in kunnen stappen. Ook Nederland opent in 1959 een eigen instituut voor plasma-onderzoek, FOM-Rijnhuizen.

Het is nu een halve eeuw later. Veel van de technische problemen, die voor onoplosbaar werden gehouden, zijn opgelost. De komst van computers en nieuwe technologie als de laser maakte veel van deze problemen behapbaar. Maar er doken ook nieuwe problemen op, die niemand in de jaren vijftig voorzag. Er waren moeizame jaren, waarin fusie geen stap verder leek te komen. Halverwege de jaren tachtig werd het onderzoek op Rijnhuizen breder van opzet, zodat het plasma-instituut ook een toekomst zou hebben als fusie een

stille dood zou sterven. Inmiddels heeft de bouw van de internationale fusiereactor ITER het vakgebied weer vaart gegeven. Niets is makkelijk, in fusie. Het plasma is grillig, de apparatuur complex en duur. Iedere stap vooruit wordt zwaar bevochten. Maar zolang de vraag naar energie hard stijgt, zal de wereld deze krachtige energiebron niet links laten liggen. ■



't Huis Rijnhuizen te Jutphaas



Weinig natuurkundelaboratoria hebben een speciaal e-mailadres voor vragen over de tuin en het maken van trouwfoto's. Er zijn er dan ook maar weinig die op een mooi landgoed zitten met een charmant, zeventiende-eeuws kasteel en een prachtige tuin. Rond 1200 was Rijnhuizen nog slechts een houten vesting. Twee eeuwen later werden er twee versterkte woningen gebouwd. De gebouwen zijn een paar keer beschadigd en zelfs verwoest. Het kasteel kreeg zijn huidige vorm in 1640. Het kasteel was in de vijftiende en zestiende eeuw in bezit van het geslacht Van Rijn. Daar komt ook de naam Rijnhuizen vandaan. Het landgoed werd in 1536 een ridderhofstad, de Utrechtse benaming voor een huis of kasteel van iemand van adel. Wie een ridderhofstad bezat, mocht deelnemen aan de ridderschap, een bestduursorgaan van de provincie. Op een oude tekening van het park uit 1780 is te zien dat Rijnhuizen destijds een barokke tuin had. „Die stijl kwam uit Frankrijk, met een vierkante vlakver-



deling en rechte lanen”, vertelt hovenier Jules Klees. Hij onderhield het landgoed van 1976 tot 2007. „De barokstijl was duur, met al die hagen, marmeren beelden en metselwerk. Je had er veel onderhoud aan.” Halverwege de negentiende eeuw is

het park omgetoverd tot een tuin in de meer natuurlijke landschapsstijl, die in het glooiende Engeland populair was. „Met veel mooie bomen. Een tuin in landschapsstijl verpaupert niet zo snel als een baroktuin wanneer het economisch een tijdje tegenzit. Die bomen groeien wel door”, vertelt Klees. Op het terrein stond ook een boomgaard en een klein geriefbos, voor het bouw- en stookhout van het kasteel.

Aan de buitenkant van het kasteel is sinds 1640 weinig veranderd. Rond 1700 werden de fundamenten gelegd voor twee hoek-torens, maar die zijn nooit gebouwd. De indeling en inrichting van het kasteel zijn wél regelmatig vernieuwd. Zo is de Alexanderzaal waarschijnlijk in de 18e eeuw ingericht in de huidige stijl. De wanden van de zaal zijn bekleed met beschilderd doek. Daarop zijn de veldslagen en overwinningen van Alexander de Grote te zien, waaronder de slag bij Gaugamela (331 v. Chr.) waarin hij het grote Perzische leger verslaat. Op een van de wanden is Alexanders triomftocht in Babylon te zien. De wandtapijten van de Franse hofschilder Charles le Brun (1619 - 1690) hebben als voorbeeld voor het doek gediend. In de Tuinkamer aan de voorzijde van het kasteel zat begin jaren zestig de tekenkamer van het instituut. Toen deze ruimte in 1971 werd opgeknapt, kwamen er achter de oude wandbedekking schilderijen uit het begin van de negentiende eeuw tevoorschijn. De wandschilderingen bleken geïnspireerd op de wandschilderingen in kasteel Heemstede onder Houten. Die zijn wellicht gemaakt naar het modellenboek van de Franse architect Daniel Marot, die in de zeventiende eeuw in Nederland werkte. De schilderijen in de Tuinkamer zijn gerestaureerd. De



Tuinkamer en de Alexanderzaal doen nu dienst bij officiële ontvangsten en vergaderingen. In de gewelfde kelder van het instituut zat een tijdlang de kantine. Omdat het kasteel veel te klein was voor het instituut, is meteen na de aankoop met de bouw van nieuwe laboratoriumhallen begonnen. Hal B was in juni 1960 klaar, daarna volgden hal A (eind 1960), C (1964), D (1966) en E (1973). De gebouwen zijn zo gebouwd, dat ze van buiten het terrein zoveel mogelijk aan het zicht zijn onttrokken. De zichtlijnen naar het kasteeltje zijn juist open gehouden. ■

Hoofdstuk 2

Fusie in het licht

Tijdens de tweede Atoms for Peace-conferentie in Genève, in september 1958, legden de Verenigde Staten, de Sovjet-Unie en Groot-Brittannië hun kaarten open op tafel. De landen hadden jarenlang in het geheim fusie-onderzoek gedaan. De belangrijkste reden voor die geheimzinnigheid was dat er bij fusie neutronen

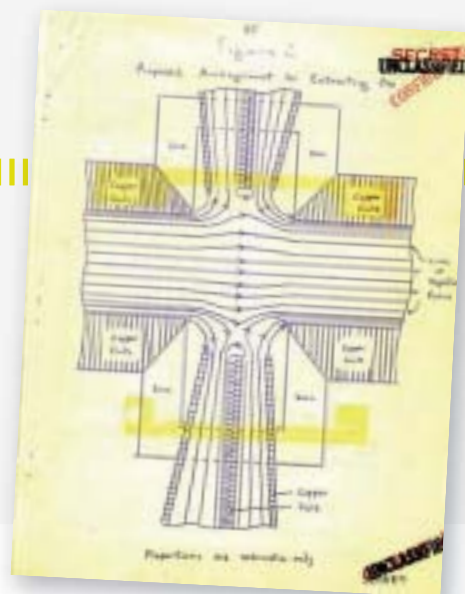


1 NOVEMBER 1952:
De Amerikanen testen de eerste waterstofbom, Ivy Mike.



1952

1952: De Amerikaanse astrofysicus Lyman Spitzer ontwerpt de stellarator. Stella is Latijn voor ster; fusie is immers de energiebron van de sterren.





vrijkomen. Goede neutronenbronnen waren schaars, begin jaren vijftig. En ze waren gewild, omdat neutronen essentieel zijn in de productie van plutonium, de grondstof voor kernwapens, en het starten van een splijtingsreactie. Bovendien wilde geen van de landen de ander wijzer maken dan hij al is in de race om goedkope energie. Maar in deze periode van geheimhouding had geen van de landen een fusiereactor weten te ontwikkelen.

Om atoomkernen te versmelten zijn hoge temperaturen nodig. De fusie-onderzoekers verhitten plasma's om die temperaturen te bereiken, maar het bleek moeilijk om hete plasma's op te sluiten: ze waren instabiel en lieten zich niet zomaar vangen. De fusiegrootmachten ontdekten in de loop van de jaren vijftig dat het nog jaren zou duren voor ze een fusiereactor konden bouwen. Bovendien kwamen er andere neutronenbronnen beschikbaar, waardoor ook die reden tot classificatie verviel. Daarom besloten de fusielanden grote delen van het onderzoek vrij te geven, in de hoop door internationale samenwerking verder te komen dan alleen. Op de conferentie in Genève is Nederland met een delegatie van 44 mensen goed vertegenwoordigd. Een van hen is fysicus

Kees Braams. Hij is op dat moment wetenschappelijk leider van Werkgroep TN v, een van de vijf werkgroepen van de nieuwe FOM-werkgemeenschap 'Onderzoek thermonucleaire reacties'. Het FOM-bestuur heeft in 1957 namelijk besloten dat Nederland moet aanhaken bij het internationale fusie-onderzoek. Dit op advies van een studiegroep, die in april 1957 concludeert dat 'fusie van lichte atoomkernen de wereld een onvoorstelbare hoeveelheid

De tekenkamer in een van de houten keten, begin jaren zestig



12 AUGUSTUS 1953: De test met de eerste Russische waterstofbom is succesvol.



8 DECEMBER 1953: De Amerikaanse president Dwight Eisenhower houdt zijn toespraak 'Atoms for Peace' bij de Verenigde Naties. Eisenhower pleit voor het vreedzaam gebruik van atoomenergie.

1953

energie kan leveren'. Zij vindt het noodzakelijk om deze nieuwe energiebron tot ontwikkeling te brengen. 'Het is van uitermate groot belang, nu reeds ruime middelen ter beschikking te stellen om in ons land onderzoek op dit gebied op gang te brengen', zo staat in het FOM-jaarverslag. Nederland wil meedoen aan deze nieuwe wetenschappelijke ontwikkeling. Erbij zijn, wanneer fusie-energie geooft kan worden. En de studiegroep verwacht dat de geheimhouding van het fusie-onderzoek niet meer lang zal duren: 'Indien in de Verenigde Staten, Engeland of Rusland de geheimhouding wordt opgeheven, moeten wij over mensen beschikken, die op het betrokken gebied thuis zijn'.

Nog geen vier maanden later, augustus 1957, heeft FOM de nieuwe werkgemeenschap opgericht. Die bestaat uit vijf werkgroepen: een theoriegroep (TN I), twee groepen plasmafysica (TN II en III), een groep boogontladingen (TN IV) en de werkgroep kernreacties (TN V) van Braams. De werkgemeenschap moet experimenteel en theoretisch onderzoek doen naar thermonucleaire reacties en samenwerking opstarten met buitenlandse instellingen. Nederlandse fysici en technici moeten vertrouwd worden met het fusie-onderzoek, zo stelt het FOM-jaarverslag van 1957.



Directeur Braams op de bouwplaats

Toen Braams werd aangesteld als werkgroep leider was hij 32 jaar oud en net een jaar daarvoor gepromoveerd. Op kernfysisch onderzoek, cum laude, en met de nodige buitenlandervaring – een deel van zijn promotieonderzoek voerde hij uit op MIT. Braams mocht dan jong zijn, FOM zag zijn talenten: een goed fysicus, een eerlijke, sportieve man en een charmant en overtuigend spreker. De juiste man voor de baan.

Braams reist vanaf 1957 heel Europa door om kennis te verza-

SEPTEMBER 1955: De Nederlandse delegatie voor de eerste internationale conferentie over het vreedzaam gebruik van atoomenergie van de Verenigde Naties in Genève.



1955



1956

25 APRIL 1956: De Sovjet-kernfysicus Igor Kurchatov geeft in Engeland tot ieders verbazing een openhartige lezing over het geheime Russische fusieprogramma.



melen en mensen te leren kennen. Alleen al in 1958 bezoekt hij behalve de Atoms for Peace-conferentie in Genève twee Engelse fusielaboratoria, verblijft hij twee maanden op CERN om onderzoek te doen, bezoekt hij twee weken een Italiaanse zomerschool over plasmafysica en schuift hij twee keer aan bij de informele CERN-Euratom 'Study group on fusion problems'. Zijn medewerkers gaan mee, of gaan zelf op reis.

FOM had in 1957 dan wel een werkgemeenschap opgericht, maar het Nederlandse fusie-onderzoek had nog geen thuishaven. De

onderzoekers zaten verspreid over de FOM-laboratoria, het Fysisch Laboratorium der Rijksuniversiteit Utrecht aan de Bijlhouwerstraat en de Utrechtse Pegus-energiecentrale. Tot FOM tegen een prachtig landgoed aanliep. Op 31 juli 1958 kocht FOM het landgoed Rijnhuizen in Jutphaas, een dorp bij Utrecht dat in 1971 fuseerde met Vreeswijk en uitgroeide tot Nieuwegein. Hier kwam het FOM-Instituut voor Plasmafysica, met Braams als directeur. In deze baan bepaalde hij tot zijn pensioen, in 1987, de koers van het Nederlandse fusie-onderzoek.

Het landgoed Rijnhuizen omvatte zes hectare grond met daarop een kasteel uit 1640, twee koetshuizen, een grote tuin en een stukje bos, dat de vroegere bewoners voorzag van stook- en bouwhout. De Minister voor Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen stelde het aankoopbedrag van 369.023 gulden beschikbaar.

Het kasteel moet eerst worden opgeknapt. Drie fysici, een technisch assistent, een instrumentmaker en een secretaresse van werkgroep TN v verhuizen daarom naar houten keten, die op het terrein zijn opgetrokken. Het kernfusie-onderzoek in Nederland moet letterlijk van de grond af worden opgebouwd.

Braams is het eerste jaar vooral bezig met de nieuwe onderzoekslijnen en het



5 JUNI 1956: FOM organiseert een bespreking over de 'wenselijkheid en mogelijkheden in ons land onderzoek te verrichten op het gebied van de samensmelting van lichte atoomkernen'. Er wordt een studiecmissie 'thermonucleaire reacties' opgericht.

1957

25 MAART 1957: Verdrag van Rome: de stichting van de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie (Euratom) en de Europese Economische Gemeenschap (EEG).

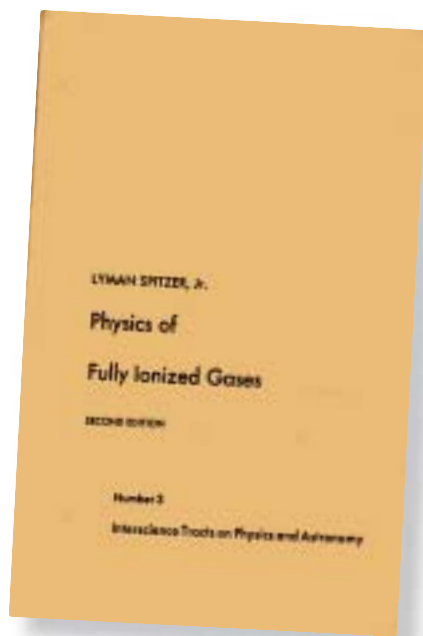


aantrekken van fysici en technici voor het nieuwe instituut. Iedereen die op Rijnhuizen is aangenomen, herinnert zich de eerste stappen op het prachtige terrein. Fysicus Hans de Kluiver begon zijn carrière bij het instituut in 1960. „Dat bruggetje, dat statige hek en dan het kasteeltje – toen ik aankwam voor mijn sollicitatiegesprek heb ik eerst nog maar eens gekeken of ik wel goed zat.”

De Kluiver werd aangenomen als groepsleider. Het instituut was toen nog vol in opbouw. De medewerkers waren allemaal beginners op het gebied van de plasmafysica, vertelt De Kluiver: „Er waren alleen wat mensen die aan boogontladingen hadden gewerkt, in Utrecht. Er was één boekje, daar kreeg je een exemplaar van in je handen gedrukt wanneer je op het instituut kwam werken.

Daar begonnen we mee, in die barakken. Lezen. Braams wist wat meer, die had de tweede Atoms for Peace-conferentie bezocht en hij was in Amerika geweest.”

De titel van dat boek was *Physics of Fully Ionized Gases*. Lyman Spitzer schreef het moeilijk leesbare standaardwerk in 1956. De Amerikaan had een aanstelling als hoogleraar astrofysica aan Princeton University. Zijn oorspronkelijke onderzoeksveld was plasma in de ruimte. In 1951 werd Spitzer leider van het fusie-onderzoek in Princetons laboratorium voor plasmafysica, dat



in die tijd achter de codenaam 'project Matterhorn' schuilging. Hij bedacht de stellarator: een achtvormig apparaat dat met zijn vorm aansloot bij de bochten, waarin het plasma zich het liefste wrong. In zijn boek gaf Spitzer uitleg over de rol van elektronen in het plasma en het effect van botsingen. Hij schreef het als astrofysicus – over het geheime fusie-onderzoek mocht hij in 1956 nog niet schrijven. Spitzers interesse voor fusie op aarde was aangewakkerd door het persbericht dat Argentinië in 1951 verspreidde. Daarin stond dat er op 16 januari op het eiland Huemul thermonucleaire reacties waren uitgevoerd onder gecontroleerde omstandigheden. De eerste fusiereactor leek binnen handbereik – Argentinië hoefde de experimenten alleen

nog op te schalen. De Verenigde Staten wilden niet achterblijven en verhoogden acuut het budget voor fusie-onderzoek. Ook andere landen, zoals Groot-Brittannië en de Sovjet-Unie, gingen verbeten aan de slag om een fusiereactor te ontwerpen.

Het persbericht bleek klinkklare onzin. De oplichter was de Duitse fysicus Ronald Richter. Hij beloofde Juan Domingo Perón in 1948 dat hij op korte termijn een kernfusiereactor voor hem kon bouwen. De Argentijnse president liet zich graag verleiden door de belofte van goedkope energie. Hij gaf Richter miljoenen dollars

1957

17 APRIL 1957: De FOM-studiecommissie 'thermonucleaire reacties' schrijft dat Nederland moet aansluiten bij het internationale fusie-onderzoek.

29 JULI 1957: De oprichting van het Internationaal Atoomenergie Agentschap (IAEA) van de Verenigde Naties.





en een geheim laboratorium op het eiland Huemul. Tegenwoordig zijn de ruïnes van het complex een attractie voor toeristen. De experimenten werden in 1952 gestopt, toen bleek dat Richter zijn onderzoeksresultaten – zacht gezegd – wat te optimistisch had gepresenteerd. Van gecontroleerde fusie-energie was geen sprake. Lang zou dat echter niet duren, was de verwachting; bij kernsplijting was het immers ook razendsnel gelukt om een reactor te

Sovjet-geleerde Igor Kurchatov (met baard) houdt in 1956 een openhartige lezing over het Russische fusie-onderzoek in Engeland.

bouwen. Maar een gloeiendheet plasma liet zich in een laboratorium nauwelijks in bedwang houden, zo bleek. Het doofde veel sneller uit dan de theorie voorspelde. Om fusie in een plasma te bereiken, moet het worden verhit tot temperaturen waar geen materiaal tegen bestand is. De oplossing is om het gas in een magneetveld te laten zweven: de geladen deeltjes van het plasma volgen de magneetlijnen, die zo zijn aangelegd dat ze de wanden niet raken. Maar het plasma laat zich niet zomaar opsluiten; zodra het de kans krijgt, wringt het zich razendsnel uit de magneetvelden, die het in bedwang hadden moeten houden.

Het is de Sovjet-Unie die in 1956 besluit de deur op een kier te zetten en een deel van het onderzoek vrij te geven. Wanneer partijleider Nikita Chroesjtsjov in april dat jaar Engeland bezoekt, reist kernfysicus Igor Kurchatov met hem mee. Tot stomme verbazing van de Engelse wetenschappers geeft hij bij het Atomic Energy Research Establishment in Harwell, in het hol van de leeuw, een openhartige lezing met de titel 'Over de mogelijkheden om thermonucleaire reacties op te wekken in gasontladingen'.

JANUARI 1958: De fusiereactor lijkt binnen handbereik.

John Cockroft zegt er voor 90 procent zeker van te zijn dat er in de Engelse machine ZETA fusie optreedt. Achteraf blijkt dat het plasma hiervoor toch niet heet genoeg was.



1958

26 AUGUSTUS 1957: FOM richt de werkgemeenschap 'onderzoek thermonucleaire reacties' op. Die bestaat uit vijf werkgroepen: een theoriegroep, twee plasmagroepen, een groep voor boogontladingen en een groep voor kernreacties. Die laatste staat onder leiding van fysicus Kees Braams.

[UIT DAGBLAD 'HET CENTRUM', 28 FEBRUARI 1959,
HANS FRIEDEMAN]

Naast het smeedijzeren hek aan het begin van de oprijlaan is een bordje aangebracht waarop staat: FOM-Instituut voor Plasmafysica. Wanneer men het landgoed betreedt, wijzen tegen de bomen gespijkerde bordjes verder de weg. Men komt ten slotte terecht bij een drietal groene houten barakken. 'Instituut' klinkt wat groots voor deze bouwsels. Maar ze zijn symbolisch voor het pionierswerk dat hier verricht wordt. ■



Lyman Spitzer geeft uitleg over zijn concept voor een fusiereactor, de stellarator.

Na de Russische openingszet geven ook Engeland en de Verenigde Staten voorzichtig wat geheimen bloot. In 1957 lekt er informatie over het geheime ZETA-project van de Engelsen naar de pers. Kort daarop verschijnen er in vakblad *Nature* de eerste artikelen over het Britse en Amerikaanse fusie-onderzoek. Het Amerikaanse weekblad *Time* schrijft optimistisch dat 'de wetenschap een grote stap heeft gezet in de richting van een tijdperk waarin de

oceanen van de aarde als brandstof worden gebruikt'. Ook de Nederlandse kranten berichten over het onderzoek naar kernfusie.

Een jaar later, in 1958, komen 5000 wetenschappers uit 67 landen, 900 correspondenten en 3651 politici en mensen uit het bedrijfsleven naar de tweede Atoms for Peace-conferentie. Sommige wetenschappers kamperen al weken van tevoren in Genève. Bij de conferentie is namelijk ook een tentoonstelling: complete fusie-opstellingen worden verscheept en in Genève weer opgebouwd. Er komt een schat aan informatie vrij, wat de stemming licht euforisch maakt. Maar de presentaties geven eigenlijk geen grond voor al te veel optimisme. Alle landen kampen met dezelfde problemen: onbeheersbare instabiliteiten, waardoor het

31 JULI 1958: FOM koopt landgoed Rijnhuizen.



1958



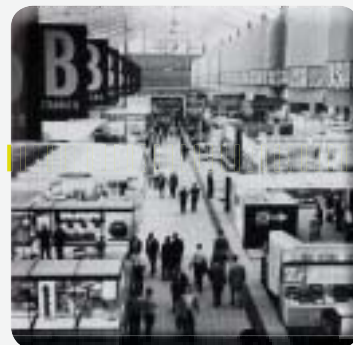
De officiële opening van Rijnhuizen: minister Cals slaat de 68e paal.

Nederland heeft dus genoeg tijd om de achterstand op de 'echte' fusielanden in te halen. Zodra het landgoed in Jutphaas is gekocht, vult de bibliotheek van het nieuwe instituut Rijnhuizen zich in hoog tempo met publicaties. Het FOM-jaarverslag van 1958 vermeldt dat er 'talrijke fotokopieën worden rondgezonden van tijdschriftartikelen

over thermonucleaire reacties en plasmafysica'. Omdat de bestaande gebouwen op Rijnhuizen te klein zijn voor het nieuwe instituut, wordt er meteen na aankoop van het terrein begonnen met de bouw van twee nieuwe laboratoriumhallen. Op 16 november 1959 opent minister Cals van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen officieel het 'FOM-Instituut voor Plasmafysica', door het slaan van de 68e paal van de nieuwe experimenteerhal. Anderhalf jaar later, in juni 1960, kunnen de fysici erin. ■

plasma veel korter opgesloten blijft dan voor energiewinning noodzakelijk is. De grootste opbrengst van de conferentie was dat de onderzoeksresultaten voor het eerst op internationale schaal worden besproken, aldus de grondlegger van het Russisch fusie-onderzoek, Lev Artsimovich. Hij schrijft in zijn conferentieverslag dat dit belangrijker is dan 'de afzonderlijke onderzoeken, die ons tot nu toe niet veel dichterbij ons doel hebben gebracht'.

SEPTEMBER 1958: De vs, Groot-Brittannië en de Sovjet-Unie declassificeren een groot deel van hun fusie-onderzoek tijdens de tweede Atoms for Peace-conferentie. Op de tentoonstelling van de conferentie zijn veel experimenten te zien. Onder de 5000 deelnemers zijn ook 44 Nederlandse afgevaardigden.



22 AUGUSTUS 1958: De Amerikaanse president Dwight Eisenhower kondigt een moratorium aan op kernproeven en vraagt de Sovjet-Unie datzelfde te doen. Voor het zover is, doen beide landen nog snel een serie tests.

Kees Braams: nestor van de Nederlandse fusie

„Op een dag klopten er twee mastenmakers aan bij ons vakantiehuis in Heeg. Die hadden gehoord dat mijn man zelf de masten voor zijn boot Caprice had gemaakt. Na afloop zeiden ze, meneer, als u werk zoekt, komt u maar bij ons.” Lieke Braams haalt herinneringen op aan haar man, Kees Braams, oud-directeur van Rijnhuizen. Hij bouwde niet alleen de masten voor de tweemaster, maar het hele schip. Veertien jaar was hij ermee bezig. „Vooraf had hij twee kano's gebouwd, als proef, om te zien of hij het leuk vond. Daarna begon hij aan de boot. Hij heeft hem ook helemaal zelf ontworpen.” De Caprice werd in 1982 te water gelaten. Als Braams geen fysicus was geworden, had hij dus botenbouwer kunnen zijn. Of tuinman – ook tuinbaas Helsdingen liet

zich op een dag ontvallen dat hij Braams best als knecht zou willen hebben. Een opmerking waar Braams zeer vereerd mee was. Hij was verzet op de tuin van Rijnhuizen en bemoeide zich met ieder detail. Hij importeerde bijzondere boomsoorten, zoals sequoia's, die inmiddels huizenhoog zijn geworden.

Maar Braams was geen botenbouwer of tuinman, hij was fysicus. Ook dat deed hij niet slecht. Hij deed in 1952 zijn doctoraal-examen in wis- en natuurkunde. Datzelfde jaar verscheen in vakblad *Nature* zijn publicatie over de tippetop – een paddestoelvormige tol, die tijdens het tolleren van zijn hoed op zijn steeltje draait. Het typeert Braams dat hij juist over dit onderwerp publiceerde: wanneer hem in het dagelijks leven iets opviel, rustte hij niet voor hij begreep welke principes erachter schuil gaan.



Dankzij een beurs van uitgeverij Elsevier, dat in 1951 de Amerikaanse markt op gaat, kan Braams twee jaar kernfysisch onderzoek doen bij MIT, het Massachusetts Institute of Technology. Hij zet zijn onderzoek in Utrecht voort en promoveert cum laude.

Vrij snel daarna krijgt hij de leiding over de werkgroep kernreacties van FOM, een van de vijf werkgroepen op het gebied van thermonucleaire reacties. Als in 1958 het FOM-Instituut voor Plasmafysica wordt opgericht, wordt Braams er directeur. FOM koopt voor het instituut het landgoed Rijnhuizen. Hoewel hij het terrein 'bruikbaar' vindt, is het niet de eerste keus van Braams. Zijn voorkeur gaat uit naar de aankoop van een stuk grond in de Johanapolder, naast het nieuwe terrein van de

Rijksuniversiteit Utrecht. Rijnhuizen mag dan een mooi, representatief terrein zijn, het is ver van de universiteit. 'Daardoor zal het minder makkelijk zijn om hoogleraren en studenten van de Universiteit bij het FOM-project te betrekken. Vooral de ongeorganiseerde, incidentele contacten, waardoor een klein researchcentrum kan profiteren van een groot, worden door de afstand wel bemoeilijkt', zo schrijft Braams in een brief aan professor Brinkman, de voorzitter van de FOM-commissie voor de werkgemeenschap. Zijn tegenargumenten waren terecht, het instituut ligt erg geïsoleerd. Van tijd tot tijd laait de discussie op of het niet naar een universiteitsterrein zou moeten verhuizen. Er is gedacht aan het verplaatsen van het instituut naar de Universiteit Utrecht of de Technische Universiteit Eindhoven - universiteiten waar Rijnhuizen een goede band mee heeft. Maar de complexiteit van de verhuizing weerhoudt iedere directeur ervan te verkassen.

Braams liep graag met zijn medewerkers door het park, pratend over nieuw onderzoek uit Groot-Brittannië of de Sovjet-Unie. Zijn andere vorm van overleg was 'koffie Braams', ook wel 'Kees koffie' genoemd. Eén keer per week zat hij met de fysici om de tafel om hun onderzoek te bespreken. Technicus Wim Kooijman: „Dat namen ze heel serieus, ze waren zelfs wat angstig, want Braams had veel gezag. Hij stelde goede vragen, kon mensen triggeren. Dan kwamen ze vrolijk terug, we gaan dit eens proberen.”

Braams werd al snel gevraagd voor talloze internationale commissies. Hij gaf richting aan het Europese fusie-onderzoek, aldus de oud-beheerder van Rijnhuizen, Johan Hovestrijdt. Daarbij had Braams als voordeel dat Nederland een relatief kleine speler was in Europa, waardoor hij de neutrale voorzitter kon zijn. Hovestrijdt: „Ja, hij had de wind mee, omdat hij niet Engels, niet Frans en niet Duits was. Maar het was ook zijn eigen verdienste, hij kon het ook goed.”

„Hij was een motor, zorgde dat dingen gebeurden. Zijn belang-

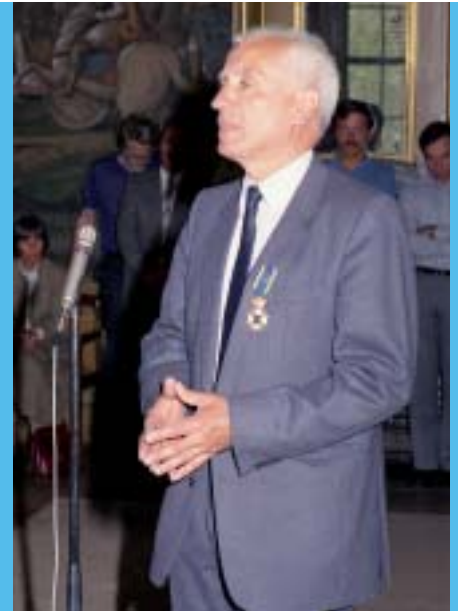




rijkste taak was het voorzitten van de wetenschappelijke raad van JET”, aldus fysicus Chris Schüller. Braams maakte zich vanaf het begin sterk voor de bouw van de Europese tokamak JET. Hij was ervan overtuigd dat Europese en internationale samenwerking de enige manier was om grote stappen te maken in het fusie-onderzoek. „Braams was een echte Europeaan – hij had een helder beeld wat er in Europees verband moest gebeuren”, aldus fysicus Niek Lopes Cardozo. Naast zijn inzet voor JET was Braams ook actief voor de IFRC, de International Fusion Research Council.

Toen de fantastische resultaten van de Russische tokamak in 1968 bekend werden, pleitte Braams voor de bouw van een grote, Europese tokamak. Maar binnen Rijnhuizen liet hij ruimte voor andere onderzoekslijnen, zoals de schroefpinch. Te veel, achteraf gezien – het onderzoek van Rijnhuizen verwijderde zich van de hoofdlijn van het fusie-onderzoek, de tokamak. Braams ging in 1987 met vervroegd pensioen; hij was het niet eens met de beslissing van FOM om naast fusie ook ander onderzoek op Rijnhuizen te gaan doen. De voorzitter van het uitvoerend bestuur van FOM, Hendrik de Waard, droeg hem bij zijn afscheid voor een koninklijke onderscheiding voor. Braams werd drie maanden na zijn vervroegd pensioen benoemd tot Ridder in de Orde van de Nederlandse Leeuw.

De nestor van de Nederlandse fusie, zoals hij in krantenberichten wordt genoemd, neemt echter nog geen afscheid van het vak. Hij houdt een kamer op het instituut, waar hij drie dagen per week aan een boek werkt over de geschiedenis van het fusie-onderzoek. *Nuclear Fusion – Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research*, het



boek van Braams en plasmafysicus Peter Stott, verschijnt in 2002, een klein jaar voordat Braams overlijdt. In de hal van het instituut wordt ter nagedachtenis een plaquette van Braams onthuld. De werknemers van Rijnhuizen die aan fusie werken, passeren iedere dag zijn aansporing: *Let us make a sun on earth.* ■

HERINNERING AAN KEES BRAAMS

Fragment uit ‘Achter de barricaden. Herfstdagboek’ van Jan Terlouw

Donderdag 7 oktober 2005

(...) Voor mij persoonlijk is hij van grote betekenis geweest. Hij heeft echt invloed op me gehad. Het komt geregeld voor dat ik denk, deze gedachte heeft bij me postgevat, deze opvatting heb ik, doordat ik Kees Braams heb leren kennen. Zijn denkwijze was door en door integer, niets kon hem ertoe bewegen onzuiver te denken. De waarheid was voor hem heilig, in ieder geval in zijn wetenschappelijk denken, en daarin heb ik hem het meest bezig gezien.

„Van hem heb ik geleerd dat je altijd wisselgeld moet inbouwen bij een onderhandeling”, vertelt instituutmanager Noud Oomens. „Op de begroting voor een nieuw gebouw zette hij altijd een tweede dienstauto. Die ging er dan na lang debatteren vanaf en de rest ging er moeiteloos doorheen.” Ook Braams vrouw kent deze klassieke truc van hem, maar herinnert zich ander wisselgeld: „Hij zette altijd een tennisbaan op de begroting.”

Electrotechnicus Albert Hugenholtz: „Toen ik kwam solliciteren hing Kees Braams over de leuning van de brug, bij het kasteel. Een jonge kerel. Ik dacht: Dat is zeker de tuinman. Maar toen ik binnen moest komen, was me wel duidelijk dat hij de directeur was.”

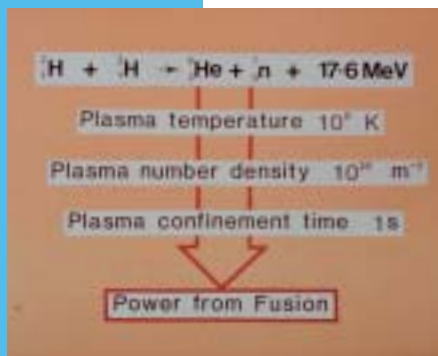
Hoofdstuk 3

Te kort en te koud

Hij wist het treffend te verwoorden, in februari 1959. Hans Friedeman, verslaggever van dagblad 'Het Centrum', bracht een bezoek aan het nieuw opgerichte FOM-Instituut voor Plasmafysica. Hij liet zich daar uitleggen wat er zo ingewikkeld is aan het op gang brengen van een fusiereactie. Hierover schreef hij:

Om waterstofkernen op grote schaal en in een doorgaand proces met elkaar te laten samensmelten moet eerst een barrière worden

overwonnen. De 'hittebarrière'. Er is minstens een temperatuur van 40 miljoen graden Celsius nodig om het kernfusieproces in stand te houden. In de gehele wereld zijn fysici begonnen de hittebarrière te bestormen. De hoeveelheid problemen waar zij mee moeten worstelen is bijna ontmoedigend.



De hittebarrière die de fysici bestormen, heet in vaktaal het Lawsoncriterium. De ingenieur John Lawson stelde in 1955 de spelregels voor een fusiereactor op. Om een fusiereactor energetisch rendabel te maken, moet het plasma heet zijn, dicht genoeg zijn en voor langere tijd stabiel blijven. Lawson berekende dat niet alleen de plasmatemperatuur hoger dan 55 miljoen graden moet zijn, maar dat tegelijk ook de dichtheid en de levensduur van het plasma aan bepaalde eisen moeten voldoen. Zijn artikel hierover werd in 1957 gepubliceerd, toen het fusie-onderzoek openbaar werd.

1 NOVEMBER 1958: Er worden houten barakken geplaatst op Rijnhuizen: het begin van het FOM-Instituut voor Plasmafysica.



MAART 1959: Begin restauratie kasteel Rijnhuizen.





De bestorming van de hittebarrière van Lawson duurt inmiddels een halve eeuw. Er zijn grote stappen gezet: met de Europese fusiereactor JET kwamen de fysici in de buurt. Zij verwachten in de nieuwe kernfusiereactor ITER, die nu in Frankrijk wordt gebouwd, voorbij het Lawsoncritrium te komen.

Op de eerste Atoms for Peace-conferentie van de Verenigde Naties in 1955 waagt voorzitter Homi Bhabha zich aan een voorspelling. „Er wachten ons grote technische moeilijkheden, maar vergeet niet dat het nog geen vijftien jaar geleden is dat atoomenergie vrijkwam in een stapel van blokken uranium en grafiet, gebouwd door Fermi. Ik durf de bewering aan dat er binnen twintig jaar een methode gevonden zal worden om fusie-energie op een gecontroleerde manier vrij te laten komen. Als dat lukt zal het energien probleem van de wereld voor altijd opgelost zijn, omdat de brandstof zo overvloedig is als zwaar water in de oceaan.”

*Voorzitter Bhabha
(wijzend) op de
eerste Atoms for
Peace-conferentie
in 1955*

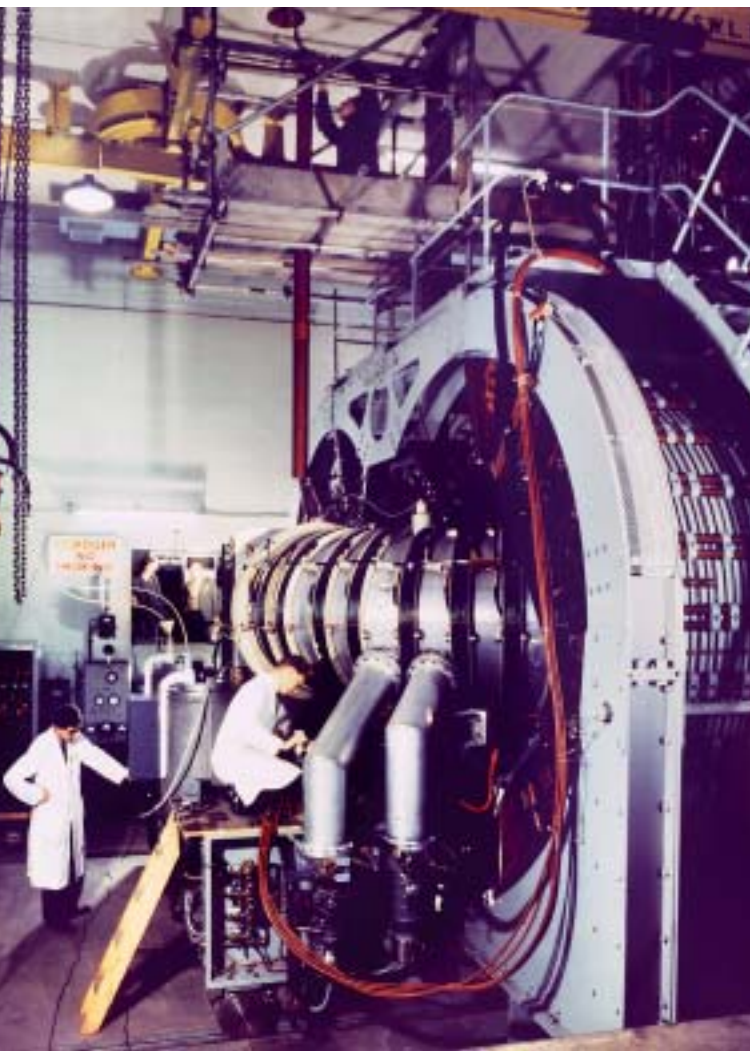


Een paar jaar later lijkt Bhabha gelijk te krijgen. Er lekken hoopgevende geruchten over het Engelse fusieprogramma naar de pers. Fysicus Hans de Kluiver doet in die tijd promotieonderzoek in Amsterdam: „Ik herinner me de krantenberichten uit 1957, 1958. Opgewonden artikelen, op de voorpagina, over het Engelse ZETA-experiment. De toon was optimistisch. Binnen een paar maanden zou er een ontwerp voor een fusiereactor liggen. Fantastisch. Het

12 OKTOBER 1959: Start bouw hoofdgebouw A en experimenteerhal B.



1 JUNI 1959: FOM benoemt fysicus Kees Braams tot directeur van het FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen.



Het Zero Energy Thermal Apparatus van onderzoekscentrum Harwell



Pinches op Rijnhuizen, begin jaren zestig



was een van de redenen, waarom ik in 1960 bij FOM-Rijnhuizen solliciteerde.”

Het ZETA-experiment van het nucleair onderzoekscentrum Harwell was een grote torus: drie meter breed, één meter hoog. Het doel van het experiment bleek uit de naam: Zero Energy Thermal Apparatus – een fusiereactor die net zoveel energie zou leveren als erin ging. Het plasma werd met een sterk magnetveld kortstondig samengedrukt. Door dit zogeheten pinchen haalde



16 NOVEMBER 1959: Officiële opening van het FOM-Instituut voor Plasmafysica. Minister Cals van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen slaat de 68e paal.



1959



het plasma vijf duizendste seconde lang een temperatuur van vijf miljoen graden Celsius. Bij die experimenten schoten er vrije neutronen uit de torus.

Hoewel de Russische geleerde Igor Kurchatov al had gewaarschuwd dat die neutronen ook op andere manieren dan door fusie konden ontstaan, gingen de Engelsen er toch vanuit dat dit hier niet het geval was. De directeur van Harwell, John Cockroft, zei '90 procent zeker te zijn, dat de neutronen thermonucleair waren'. De *Daily Mirror* kopte daarop 'Een eigen zon – en in Engeland gemaakt!' Andere Harwell-onderzoekers waren terughoudender dan Cockroft. Terecht, zo bleek. De wens was de vader van de gedachte. De neutronen bleken toch niet thermonucleair, er was geen fusie bereikt. De ZETA-machine was een van de vele pinchexperimenten die in die tijd werden gedaan. Toen Nederland zich in 1959 aansloot bij het fusie-onderzoek, behoorden *pinches* tot het standaardpakket van een fusielaboratorium. Ze kwamen in vele gedaanten: recht of torusvormig, van klein tot groot. Ook de richting en sterkte van de aangelegde magneetvelden varieerde. De pinch werd beschouwd als een serieuze kandidaat voor het opsluitsysteem van een fusiereactor. Maar de experimenten met de ZETA-pinch hadden ook aangetoond dat de methode fundamentele problemen



De bouw van laboratoriumhal B

met zich meebracht: bij het samenpersen groeiden de instabiliteiten in het plasma snel en ontspoorde het plasma. Aan het concept moest nog flink worden gesleuteld.

Dat gebeurde ook op Rijnhuizen. Zodra de noodgebouwen op het terrein van Rijnhuizen waren neergezet, startte de opbouw van de experimenten. Zoals Porgo, de ProefOpstelling Ringvormige GasOntlading. Porgo was een torus van 32 centimeter breed. De eerste ontlading was in januari 1960, een halfjaar voor de opening van de eerste laboratoriumhal. Om het oplichtend plasma te kunnen fotograferen was een supersnelle camera gebouwd, een

15 MAART 1960: De theoretische werkgroep Thermonucleaire reacties (TN 1) vestigt zich in kasteel Rijnhuizen. De groep verricht fundamenteel theoretisch onderzoek en verleent steun aan de experimentele werkgroepen. De groep valt niet onder directeur Braams, maar vormt een zelfstandige eenheid.

Het hoogste punt: directeur Braams hijst de vlag op het dak van het nieuwe laboratorium.



16 MEI 1960: De Amerikaanse natuurkundige Theodore Maiman bouwt de eerste laser. In juli verschijnen verontruste krantenberichten over 'de mogelijk dodelijke stralen'.

1960



Het blazen van een glazen torus

bakbeest dat 48 opnamen in een record-tijd van 240 microseconden kon maken. Het licht van het plasma werd via een spectrometer naar de camera geleid. Zo werd onder meer ontdekt dat er tijdens de ontlading silicium van de glaswand kwam. Dat vervuilde het plasma. Pas later bleek dat glas en kwartsglas geen geschikte materialen zijn voor een fusiereactor, omdat er altijd verontreinigingen uit de wand dampen. In de beginjaren was glas echter een populair materiaal, met als groot voordeel dat je erdoorheen kon kijken. „Het was fundamentele fysica, ze wisten nog niets. Ze wisten amper wat een plasma was. Het was allemaal nieuw, pionieren”, vertelt elektro-



Schroefpinch SP IV wordt gelast

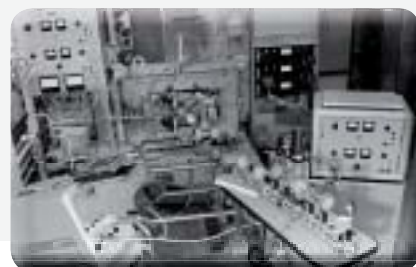
technicus Wim Kooijman, die in 1962 op het instituut begon en er meer dan veertig jaar heeft gewerkt. De pinchgroep onderzoekt alle mogelijke soorten pinches, zoals de thetapinch, de z-pinch, de alternerende pinch en de schroefpinch. De schroefpinch blijkt verrassend stabiel en groeit uit tot de specialiteit van Rijnhuizen. De resultaten komen overigens niet eens in de buurt van fusie-omstandigheden: de schroefpinch haalt in 1963 bijvoorbeeld een opsluittijd van 6 microseconde en een temperatuur van 500.000 graden – dat is te kort en te koud. Behalve de pinchgroep zijn er nog twee onderzoeksgroepen op het instituut: de injectiegroep en de hoogfrequentgroep. In het



JUNI 1960: De grote experimenteerhal B wordt in gebruik genomen. Hierdoor kwam er in het koetshuis ruimte vrij om de instrumentmakerij uit te breiden. Een van de eerste opstellingen die verhuist naar het nieuwe gebouw is de pinch Porgo, de Proef-Opstelling Ringvormige Gas-Ontlading. (foto rechtsonder)

1960: Het FOM-jaarverslag meldt dat de groei van het personeelsbestand van Rijnhuizen 'beneden de verwachtingen bleef, mede als gevolg van de overal in den lande heersende schaarste aan fysici en technici'.

1960



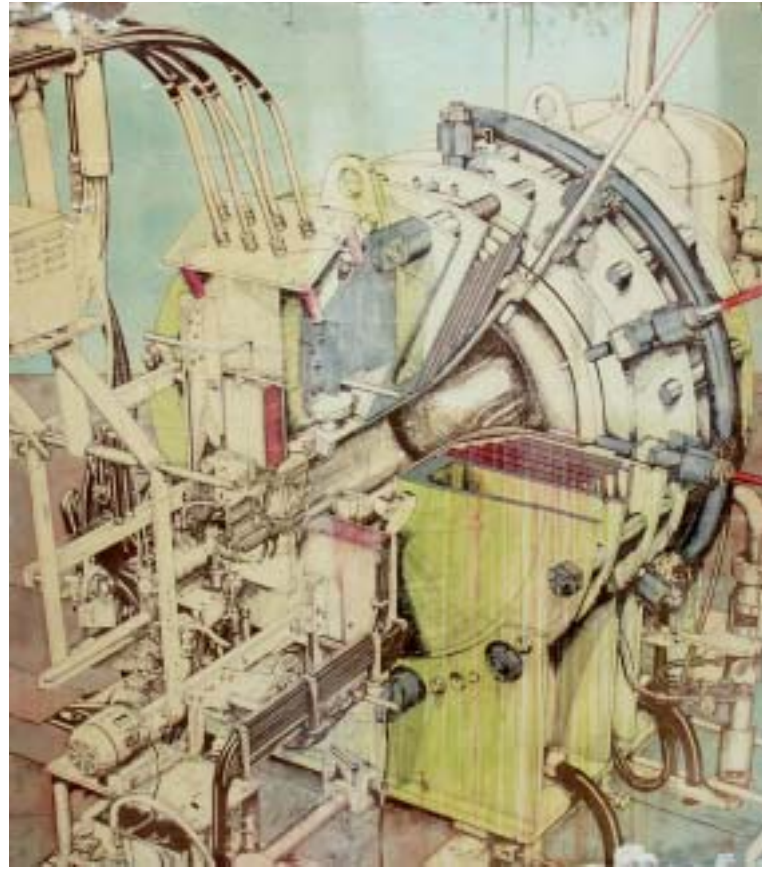


Injectie-
experiment

kasteeltje zit ook een theoriegroep, de werkgroep TN I. Zij is zelfstandig, de groep valt niet onder Braams, maar de samenwerking tussen theorie en experiment is intensief.

De hoogfrequentgroep was haar experimenten als werkgroep TN II begonnen in de Peguscentrale in Utrecht. De elektriciteitscentrale had twee kamers beschikbaar gesteld voor experimenteel werk. Er liep onderzoek naar het opstoken van plasma's met elektron- en ionencyclotronverhitting. Toen het FOM-Instituut voor Plasmafysica werd opgericht, verhuisden de experimenten naar Rijnhuizen.

De injectiegroep bouwde *magnetische flessen*. In een van de experimenten werd met twee tegengestelde spoelen een magneetveld aangelegd dat naar buiten toe sterker werd, een quadrupoolveld.



31 AUGUSTUS 1961: Ondanks het moratorium op kernproeven kondigt sovjetpremier Nikita Chroesjtsjov nieuwe proeven met de waterstofbom aan.

1961

28 MAART 1961: De voorzitter van de Raad van Bestuur van FOM, Jan de Boer, opent het hoofdgebouw. Het gebouw bevat een experimenteerhal, een bibliotheek, een collegezaal en 25 werkkamers.



Alternerende pinch

4 - 9 SEPTEMBER 1961: De IAEA organiseert de eerste Fusion Energy Conference, een conferentie over gecontroleerde fusie in Salzburg, Oostenrijk.



Personeelsfeest in het voorjaar van 1960: Rijnhuizen organiseert een fietsrally.



Het plasma hing in het midden van de 'fles', waar het magneetveld het zwakst was. Via de 'flessenhals' werden snelle waterstofionen geïnjecteerd. De benodigde apparatuur was metersgroot, het onderzoek was het duurste op het instituut. De resultaten vielen tegen. Er ontsnapten te veel deeltjes aan het magneetveld en het plasma had de neiging naar buiten te

lopen en tegen de wand te slaan. De Kluiver: „Er is in Amerika nog tot in de jaren tachtig aan open systemen gewerkt. Maar altijd lekte er plasma uit het magneetveld. Er werden allerlei trucs bedacht om die verliezen tegen te gaan of weer aan te vullen, maar dat lukte niet.” De experimenten leverden veel fundamentele kennis op, maar een open systeem bleek uiteindelijk geen geschikt concept voor een fusiereactor.

Emeritus-hoogleraar Daan Schram solliciteerde na zijn studie elektrotechniek op het instituut. Hij herinnert zich de beginjaren als iets bijzonders: „Het was een jong laboratorium, dat is het mooiste. Eigenlijk zou je ieder laboratorium na tien jaar moeten opdoeken, zodat je opnieuw kunt beginnen. De sfeer was enthousiast, ondanks het feit dat het allemaal niet zo geweldig lukte. Het was de fase waarin een heleboel concepten werden uitgetoet. Er was veel discussie.”

Adri Nijsen-Vis was in 1961 natuurkundestudente en wilde haar groot onderzoek graag doen bij het fusie-onderzoek. De sfeer en het onderwerp spraken haar aan. Zij mocht echter niet

30 OKTOBER 1961: De Sovjet-Unie gooit boven Nova Zembla de Tsaarbom af. De waterstofbom van 50 megaton veroorzaakt de zwaarste kernexplosie ooit. De explosie is tot in Finland te zien. De Tsaarbom is onderdeel van een serie van 59 kernproeven.

Het spoelenstel van het injectie quadrupool-experiment wordt binnengebracht.

1961

1962

16 – 18 MEI 1962: Het FOM-Instituut voor Plasmafysica en het FOM-Laboratorium voor Massascheiding zijn gastlaboratoria van de European Study Group on Fusion, bezocht door 73 deelnemers.





Glasblazerij

komen, omdat er geen hoogleraar op het instituut was. Maar op het terrein zat tijdelijk ook een vaste stof-groep van de Rijksuniversiteit Utrecht, in het zuidelijke koetshuis. Nijssen-Vis: „Toen ben ik daar, bij professor Volger, mijn onderzoek gaan doen, dan zat ik toch nog in de buurt van al die leuke mensen. Daarvoor had ik een onderzoek gedaan bij Philips. De sfeer was daar anders. Oud en deftig.” Na haar studie solliciteerde Nijssen-Vis alsnog bij het instituut. Ze kreeg eerst een contract voor een jaar en kwam daarna in vaste dienst.

Het geluid van fusie

Wie op Rijnhuizen kwam werken, moest niet bang zijn voor knallen. Voor de pinch-experimenten werden grote condensatorbanken opgeladen, die vervolgens in een fractie van een seconde werden ontladen. Dat gaf harde klappen. Toch droegen de medewerkers geen oordoppen, vertelt computertechnicus Wim Kooijman: „Welnee, je moest gewoon je mond openhouden, dan is de druk aan beide zijden van je trommelvlies gelijk.” Wie dat vergat, had piepende oren. „Dat overkwam ons vaak”, vertelt instituutsmanger Noud Oomens.

„Het ging niet altijd als gepland, dan kwam de ontlading te vroeg.” De knallen uit het instituut waren te horen tot in het kasteeltje, verderop op het terrein, waar de theoriegroep zat. Met het verdwijnen van de pinches en de opkomst van betere elektronica is het geluid van fusie-onderzoek veranderd – nu zoemen de machines vooral. ■



18 MEI 1962: Directeur Kees Braams wordt buitengewoon hoogleraar plasmafysica aan de Rijksuniversiteit Utrecht. Vanaf nu kunnen er studenten stage lopen op Rijnhuizen.

1 JULI 1962: Stichting FOM sluit een associatieverdrag met Euratom, de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie.

Het gehele onderzoeksprogramma van Rijnhuizen valt onder dit verdrag. Euratom betaalt 40 procent van het onderzoek.





192 laserstralen komen samen in het middelpunt van deze target chamber van de National Ignition Facility (Californië).

Het fusie-onderzoek op Rijnhuizen richtte zich vanaf het begin op het opsluiten van hete plasma's. Dat was het deel van het fusie-onderzoek dat was gedeclassificeerd. Maar niet al het onderzoek was vrijgegeven. De eerste waterstofbom werd in 1952 tot ontploffing gebracht. Het was een logische gedachte om een fusiereactor ontwerpen, waarin gecontroleerd 'mini-bommetjes' tot ontploffing worden gebracht. De fysici die hieraan werkten, maakten bolletjes van tritium en deuterium. Door die snel samen te drukken, zou fusie op gang kunnen worden gebracht. De methode leek eerst kansloos: er was geen methode om de bolletjes snel genoeg samen te drukken om de fusiereactie op gang te brengen. De komst van de laser in de jaren zestig bracht daar verandering in. Met een laser werd het mogelijk het bolletje van alle zijden gelijktijdig te verhitten. De buitenlaag verdampt dan en vliegt naar buiten, wat een schokgolf naar binnen opwekt die de fusiereactie start. Het principe werkt, maar de methode is vooralsnog te ingewikkeld om op te schalen voor energiewinning. Tot op de

dag van vandaag is het onderzoek naar *traagheidsopsluiting* of *laserfusie* grotendeels geheim: de resultaten van het onderzoek zijn vanuit militair oogpunt interessant – als modelstelsel voor de atoom- en waterstofbom. Het meeste onderzoek op dit gebied vindt plaats in Amerika en Frankrijk. ■

1963: Rijnhuizen bouwt de eerste schroefpinch. Dit type pinch groeit uit tot de specialiteit van het instituut.



1963

1964

20 FEBRUARI 1964: De nieuwe werkplaats, hal C, wordt na vertraging door vorstverlet alsnog opgeleverd. Hier komen de instrumentmakerij, het magazijn en de tekenkamer.



Vanaf 1962 mogen ook studenten onderzoek komen doen op het instituut. Directeur Braams wordt in mei dat jaar buitengewoon hoogleraar Plasmafysica aan de Rijksuniversiteit Utrecht. Nijssen-Vis: „Dat was een groot feest voor iedereen van het instituut. We vierden het in café De Zwaan, aan de overkant van het kanaal. Dat zat vol omdat wij een hoogleraar hadden.”

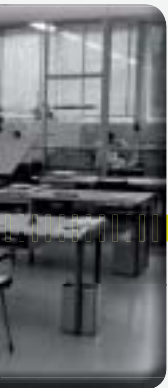
Het hoogleraarschap van Braams is niet de enige aanleiding voor een feest. In de begintijd zijn de meeste medewerkers jong, twintigers nog. Zij promoveren, trouwen, krijgen kinderen. Er wordt hard gewerkt en er is veel te vieren. De werknemers van het eerste uur sluiten vriendschappen, die een leven lang stand houden.

In de beginjaren was er veel geld voor nieuwe apparatuur. Een verademing voor de fysici die van de universiteitslaboratoria kwamen, waar vaak nog met vooroorlogse apparatuur werd gewerkt. Het instituut was ultramodern, aldus De Kluiver: „Iedereen was diep onder de indruk. Aan de Universiteit van Amsterdam, waar ik eerst werkte, mat ik drukken nog op de antieke manier, met kwikinstrumenten. Daar kwam kwikdamp bij vrij, die kon je bij die plasma-experimenten niet gebruiken. Op Rijnhuizen hadden we de nieuwste drukmeters. Ook de vacuümtechniek was op het instituut veel moderner.” Volgens hem werd het instituut op ongekende schaal van geld voorzien: „Toen ik daar kwam, zag ik met open mond hoe er iedere week kuddes handelaren kwamen, van spectroscopen, spectrometers, oscillografen, vacuümapparatuur. Die gingen de groepen langs. Dan bestelden we weer drie oscillografen.”



Wat niet gekocht kon worden, werd zelf gemaakt. Het instituut had alles in huis, een glasblazer, een instrumentmakerij, een afdeling elektronica en vacuümspecialisten. „Vooraf op vacuümgebied was nog weinig te koop”, herinnert Louis van der Woerd zich. Hij begon in 1963 als constructeur bij het instituut. „Er werd van alles in huis ontwikkeld, meetkoppen om de druk van het vacuüm te meten bijvoorbeeld.”

Het las- en constructiewerk besteedde het instituut vaak uit aan Vernooij. Dat was een familiebedrijf in Jutphaas, dat hekken maakte voor boeren en onderdelen voor de baggerindustrie. Het instituut en het bedrijf groeiden samen op. Van der Woerd, die la-



12 MEI 1964: Hal C wordt officieel in gebruik genomen. In de hal van het kasteel wordt die dag ook een plaquette van W.J. Beekman onthuld, gemaakt door beeldhouwer Charles Hammes. Beekman was tot 1 juli 1963 directeur van Stichting FOM.

1964: Bij het droogleggen van de gracht is het fundament van een hoektoren zichtbaar. Het fundament is rond 1700 aangelegd, maar de toren is nooit gebouwd.





De tekenkamer verhuist in 1964 naar de nieuwe hal C.



ter zelf bij Vernooij ging werken: „Het begon met frames, laswerk. Op een gegeven moment maakte Vernooij ook de vacuümkamers. Zo kwam het bedrijf in de vacuümwereld terecht, in de hoogwaardige technologie.” Vernooij Vacuüm Engineering, inmiddels 22 man sterk en onderdeel van de Triumph Group, is nog altijd een van de leveranciers van het instituut.

Er was op het instituut ook geld voor reizen naar het buitenland, met name naar Engeland en Amerika. Daar zat de kennis en ervaring. De Kluiver ging bijvoorbeeld in 1961 naar Los Alamos. Het fusiewereldje was klein, vertelt hij, je kende iedereen. „Ook de Russen deden mee. Zelfs tijdens het ijskoudste regime kwamen zij nog naar ons toe.”

Hoe hard er op het instituut ook werd gewerkt, de resultaten vielen vaak tegen. Nijsen-Vis: „Bij iedere vooruitgang kwamen er weer nieuwe problemen. Heel ontmoedigend. Er ontstonden altijd instabiliteiten in het plasma en de opsluittijd was kort.”

Eind 1961 concludeerde ROM dat ‘de achterstand die Nederland op het gebied van thermonucleaire reacties ten opzichte van enkele andere landen had, goeddeels kon worden ingelopen’. Maar het jaarverslag meldde ook dat het onderzoek trager vorderde dan gehoopt. „Hoewel over het gedrag van pinchontladingen en van stellaratorplasma’s vele nieuwe bijzonderheden bekend werden, leidde dit niet tot belangrijke verbeteringen in temperatuur, dichtheid en opsluittijd. Ook roterende plasma’s beantwoordden niet aan veler verwachtingen, terwijl grote injectie-experimenten duidelijk teleurstelden’.

In de fusiereactie ITER, die in 2018 operationeel moet worden, zal het plasma een kwartier kunnen branden. In de jaren zestig was dat nog ver buiten bereik. De Kluiver: „Aan een seconde dachten we toen nog niet eens. We hadden het over microseconden. Enkele milliseconden, dat was al heel mooi.” Technicus Albert Hugenholtz: „We graptten weleens tegen elkaar, later worden we

7 OKTOBER 1964: De Minister van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen keurt het ontwerp voor een nieuwe laboratoriumvleugel goed.

APRIL 1965: Begin van de bouw van de nieuwe vleugel D. Hier komen een experimenteerhal, werkkamers en de kantine.

1964

1965

26 MAART 1965: In het bijzijn van koningin Juliana wordt Nederlands eerste kerncentrale, Dodewaard, in gebruik genomen.





allemaal directeur van een fusiereactor. Maar we wisten ook wel dat het nog een hele tijd zou duren voor het zover was.”

En er is in die jaren zestig nog iets wat de verwachtingen over fusie flink tempert. De Amerikaanse theoreticus David Bohm vertelt de fusiewereld, dat het opvoeren van de plasmatemperatuur weleens dweilen met de kraan open kon zijn. Als Braams in 1990 in de Holstlezing aan de Technische Universiteit Eindhoven terugblijkt op de jaren zestig, verwoordt hij het als volgt: „Er waarde in het fusie-onderzoek een spook rond, genaamd Bohm-diffusie. David Bohm had een stelling geponereerd, die hij niet

theoretisch kon afleiden, hoogstens aannemelijk maken, maar die wel verklaarde wat in veel experimenten gezien werd, namelijk dat een plasma heel snel ontsnappen uit zijn magnetische opsluiting. Vooral de stellarators in Princeton vertoonden Bohmverliezen en de school van Spitzer was gaan geloven dat ze onvermijdelijk waren.” Als Bohm gelijk had, zou fusie waarschijnlijk nooit economisch rendabel kunnen worden. Gelukkig voor de fysici zat hij ernaast. ■



Het plasma wordt instabiel: experiment TIBO van de wervelgroep.



1966: Rijnhuizen richt de wervelgroep op. Deze onderzoeksgroep bestudeert of het mogelijk is om heet plasma te omhullen met een deken van koud gas. De druk van het omringende gas moet voorkomen dat het plasma instabiel wordt.

1966



1967

24 JANUARI 1967: Minister van Onderwijs en Wetenschappen Isaac Diepenhorst opent de nieuwe vleugel D van het laboratorium.

Hoofdstuk 4

Het type Tokamak



1968: het jaar van de Praagse Lente, de studentenbetogingen in Frankrijk én het jaar dat de tokamak definitief doorbreekt. Fysicus Jan Terlouw is groepsleider op Rijnhuizen. Het Internationale Atoomenergie Agentschap (IAEA) organiseert dat jaar voor de derde keer een grote, internationale conferentie over plasmafysica en fusie-onderzoek. In Novosibirsk, in de Sovjet-Unie. Terlouw: „Ondanks de koude oorlog en terwijl in Centraal-Europa die strijd woedde, zaten wij diep in Siberië. We stonden niet onder controle van Intoerist, het officiële reisbureau van de Sovjet-Unie – zó diep in Siberië was het. Er was ook een bar geopend voor ons westerlingen, De Integraal. De plaatselijke bevolking vond het geweldig, en wij ook. Russische hoogleraren staken de draak met het regime, dat durfden ze, zo ver van alles. Het was een grote conferentie. De openheid was geweldig.”

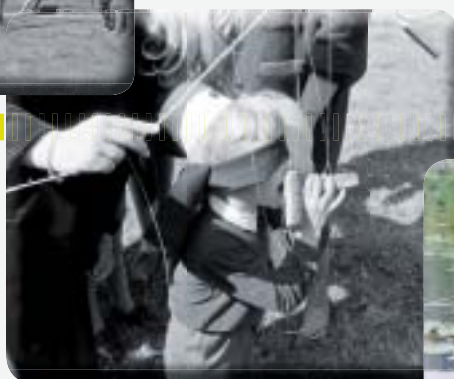
De conferentie zou een ijkpunt worden in de geschiedenis van het fusie-onderzoek. De Russen presenteerden er de nieuwste resultaten van hun tokamak T3. De prestaties waren indrukwekkend: een elektronentemperatuur van 1 keV – circa 10 miljoen graden – bij een plasmadichtheid van 10^{19} m^{-3} en een opsluittijd van een paar milliseconden. Het waren ongehoorde getallen, veel beter dan welke andere opstelling ter wereld ook.

Het was zelfs zo goed, dat de Russen niet meteen werden geloofd.

De Russen presenteerden op de IAEA-conferentie in Novosibirsk de opzienbarende resultaten van tokamak T3.



In de tuin van Rijnhuizen zijn regelmatig feesten gehouden voor de kinderen van het personeel.





De fusiewereld had al te vaak te mooie verhalen geloofd. Zoals het ronkende persbericht dat Argentinië dicht bij een fusiereactor was, in 1951. Of het bericht van de Britten, in 1958, dat de gemeten neutronen van hun ZETA-reactor ‘met 90 procent zekerheid’ door fusie ontstonden. Dit keer zouden ze zich niet laten misleiden: de wetenschappers eisten onafhankelijk bewijs voor de Russische prestaties. En dat kwam er.

Wat ze hadden bereikt, werd door een deel van de fusiewereld voor onmogelijk gehouden. De Russen veegden met hun tokamak namelijk de vloer aan met Bohmdiffusie.

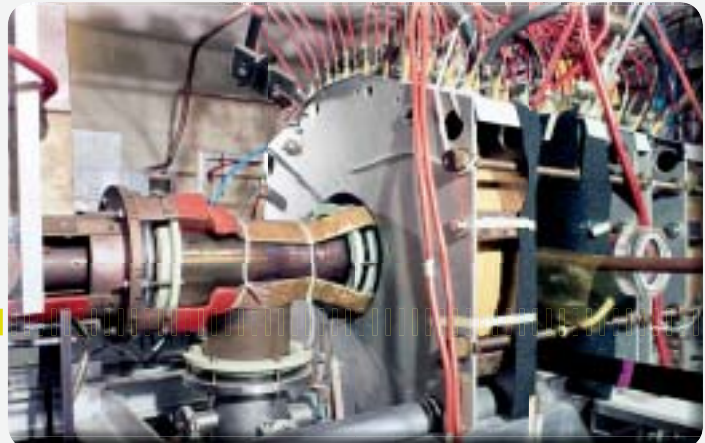
De geveesde Bohmdiffusie was een verzamelnaam voor niet helemaal begrepen warmteverliezen – een vuistregel die een verband aangaf tussen grootheden als dichtheid, temperatuur, afmetingen en de veldsterkte van de magneten. Met Bohm was de opsluittijd van plasma’s te voorspellen. Maar de Russische T3 haalde opsluittijden die wel vijftig keer langer waren dan je op basis van deze stelregel zou verwachten. Terlouw: „We waren onder de indruk, maar we keken er ook kritisch naar.”

Fysicus Chris Schüller was student op Rijnhuizen. Hij was niet bij de conferentie, maar herinnert zich de opwinding toen de berichten uit Rusland Rijnhuizen bereikten: „Een temperatuur van 10 miljoen graden – we geloofden onze oren niet. Ik heb het verslag van de conferentie zo snel mogelijk gelezen.”

Een groep Engelse wetenschappers van Culham Laboratory vloog een jaar later met vijf ton apparatuur naar de Sovjet-Unie. Zij kwamen op uitnodiging van de Russen temperatuursmetingen doen met een methode die mogelijk was geworden door een nieuwe uitvinding: de laser. De verstrooiing van laserlicht aan de bewegende elektronen in het plasma gaf een maat voor de temperatuur. Deze meetmethode heette Thomsonverstrooiing, naar Sir Joseph Thomson, de ontdekker van het elektron. Uit de Engelse metingen bleek dat er geen woord was gelogen over de prestaties van de tokamak. Integendeel, de tokamak haalde nog hogere temperaturen dan de Russen hadden geclaimd. Bohmdiffusie bleek geen fundamenteel probleem, maar een experimentele regel, afgeleid uit slechte experimenten.

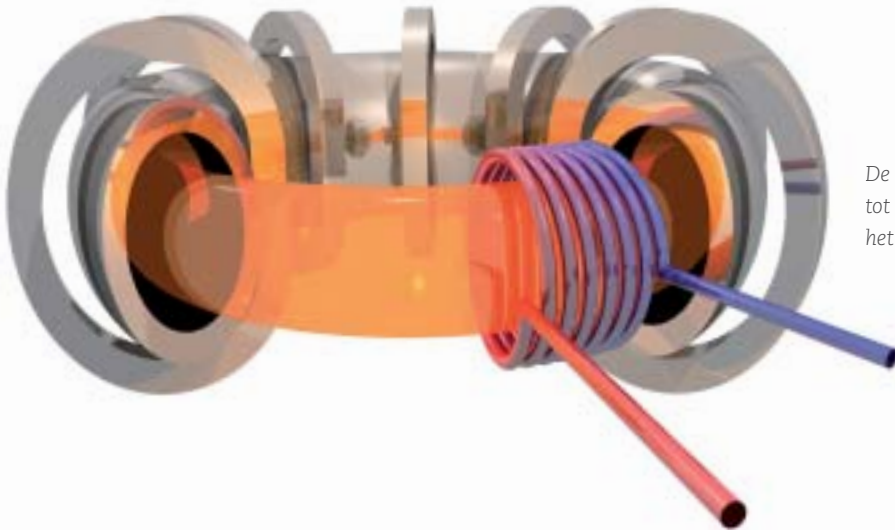
Tokamak T3 was overigens niet de enige opstelling die beter presteerde dan volgens Bohms vuistregel mogelijk was. Op de Novosibirskconferentie waren meer experimenten die het Bohmspook

1967: Door een restauratie van de kelder van het kasteel krijgt de theoriegroep meer werkruimte.



1967: Begin van de turbulente verhittings-experimenten, eerst op het lineaire systeem Turhe en later op de torus Tortur.

1967



De tokamak groeide uit tot het werkpaard van het fusie-onderzoek.

meer geïnteresseerd was in plasma-experimenten op kleine schaal en dat binnen FOM, en in Jutphaas, het bouwen van machines op enige schaal niet eens werd overwogen. Fusie werd in Nederland nog niet gezien als toegepaste wetenschap, en daarvoor stabiliseerden de

definitief verjoegen. Al die plasma's bleven langer leven dan voorspeld. De Russische tokamak was echter met afstand de beste. Na de controlemetingen van de Engelsen begon de tokamak een triomftocht over de wereld. Het belangrijkste Amerikaanse fusielaboratorium, Princeton, reageerde onmiddellijk en verving zijn C-stellarator al in 1970 door een tokamak. Ook in Europa verrees in de jaren zeventig een tiental tokamaks. Voor Rijnhuizen was een grote tokamak te duur, zo staat in het FOM-jaarslag van 1970: 'Binnen het thermonucleaire gebied is de schaalvergroting al zodanig dat Nederland er bijzonder veel moeite mee zou hebben om zelf een machine van het type Tokamak, momenteel – terecht – zeer in de mode, te bouwen'. Was een tokamak echt te duur geweest? De schrijver Edwin Shaw zegt in zijn boek over JET, *Europe's Experiment in Fusion*, dat Braams

budgetten of namen ze af, zo schrijft Shaw. Het is de vraag of hij gelijk heeft. Niet alleen de bouw van een tokamak had veel geld gekost, ook het in bedrijf houden zou een zware belasting zijn geweest voor het relatief kleine Rijnhuizen. Bovendien was het instituut bezig met een ander groot project: de bouw van de grote schroefpinch Spica. Braams kiest voor een andere manier om tokamakervaring op te doen. Het instituut sluit in 1970 een samenwerkingsovereenkomst met het Amerikaanse instituut MIT. Daar wordt een tokamak gebouwd met een zeer sterk magneetveld: Alcator. MIT heeft geld voor de bouw, maar niet genoeg mankracht. En Rijnhuizen heeft genoeg mankracht, maar geen geld voor een tokamak. In de periode 1971 tot 1975 werken er veertien Nederlandse experimentatoren, technici en theoretici in Amerika, de meesten voor een jaar.

Injectie-experiment in hal B



1 JULI 1967: Het Verdrag van Brussel gaat in: Euratom, de Europese Economische Gemeenschap (EEG) en de Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal fuseren tot de Europese Gemeenschappen.

1967



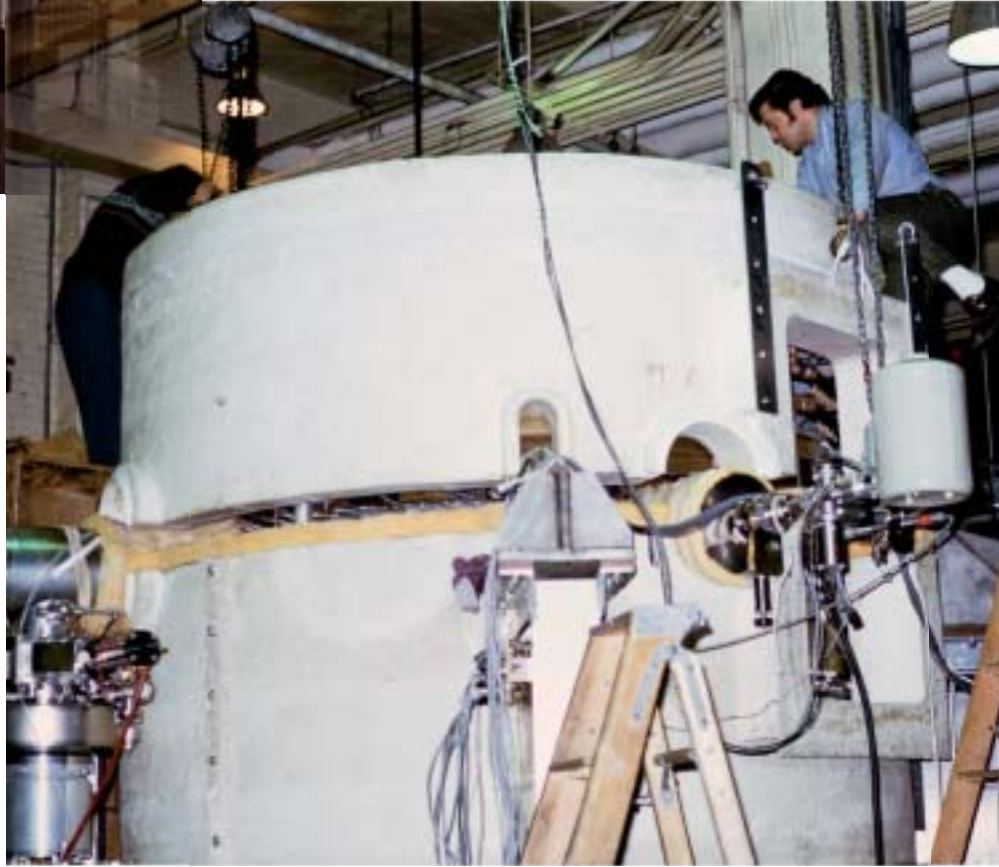
Alternierende pinch



MIT'ers Ron Parker (l) en Bob Taylor (r)

Rijnhuizen deed van 1971 tot 1975 onderzoek op de MIT-tokamak Alcator.

Daan Schram was een van de onderzoekers die naar Boston ging. Hij begon in 1962 bij Rijnhuizen, na zijn studie elektrotechniek. Hij promoveerde er in 1969. „Ik kon daarna geen vast contract krijgen, maar ik kon wel een plaats krijgen bij het Alcatorproject.” Een vetpot was het niet, 500 dollar boven op zijn salaris van FOM. „Ik vond het er geweldig, de werksfeer sprak me erg aan. Als je een idee had, dan gingen we meteen aan de slag. Dan kwam ik 's ochtends in het lab en dan had MIT-collega Bob Taylor de experimenten die nacht helemaal voorbereid. Maar voor



1968



1 – 7 AUGUSTUS 1968:

Op een conferentie in Novosibirsk in de Sovjet-Unie presenteren de Russen de opzienbarende resultaten van hun T3-machine; het betekent de definitieve doorbraak van de tokamak.



mijn vrouw en drie kinderen was het niet altijd makkelijk.” Ook Schüller ging in 1972 een jaar naar MIT: „Vanuit Rijnhuizen stond het project onder leiding van Luuk Ornstein, vanuit MIT lag de leiding bij Bruno Coppi en Ron Parker. Dat waren alle drie kleurrijke figuren, die het werken aan Alcator spannend maakten.”

Toen de Rijnhuizenaren op MIT aankwamen, waren de meest vooraanstaande diagnostieken al aan de Amerikanen vergeven. De Nederlanders richtten zich noodgedwongen op het gewone werk: het meten van stroom, spanning, positie en elektronendichtheid. ‘Een gouden greep’, concludeerde Schram in zijn afscheidscollege aan de Technische Universiteit Eindhoven, waar hij van 1972 tot 2005 lector en hoogleraar Technisch Natuurkunde was. ‘Het was het enige wat werkte en het gaf de nodige basisinformatie’.

De tokamak draaide niet zoals verwacht. Alcator maakte, net als andere tokamaks in die tijd, de hooggespannen verwachtingen niet waar. De resultaten waren niet veel beter dan die van de Russische tokamak. „Het zag er in het begin van de jaren zeventig heel somber uit voor het fusie-onderzoek”, vertelt Schram. Een van de dingen die de onderzoekers zich nog niet realiseerden, was hoe belangrijk het was dat het reactievat schoon was. Ook Alcator was te ‘vies’: bij iedere ontlading kwam er waterstof, koolwaterstoffen en zuurstof van eerdere experimenten vrij van de wand. Schram: „Het plasma verzoop steeds doordat er zoveel extra waterstof en verontreinigingen van de wanden afkwam.”

Tot overmaat van ramp vloog de machine in 1972 in brand. Alcator moest compleet worden herbouwd. Hierbij stond één

ding voorop: het schoonhouden van de machine. MIT-fysicus Taylor gebruikte de vrijgekomen tijd om experimenten met het schoonmaken van het vat voor te bereiden. Hij had het idee om de tokamak schoon te branden met een glimontlading, een methode die ook bij deeltjesversnellers werd toegepast. Dat pakte wonderwel uit.

Schram: „Taylor bedacht dat je het vat kon schoonbranden met een ontlading. Hij testte dit door zuurstof in het vat te laten, om het daarna met waterstofontladingen weer te verwijderen. Dat was ongehoord.” Het mocht dan ongehoord zijn, het werkte wel. In de nieuw opgebouwde Alcator werd deze schoonmaakmethode gecombineerd met verbeterde vacuümtechniek en een gepulste brandstoftoevoer, waarmee de hoeveelheid waterstof in het vat beter te reguleren was. Mede daardoor werd hij de schoonste machine ter wereld en brak de tokamak de jaren erna het ene record na het andere. De tokamak bereikte een opsluittijd en plasmadichtheden die een factor tien hoger lagen dan in andere tokamakexperimenten. Volgens Schram hebben deze methoden – *discharge cleaning* en gepulste gastoevoer – het fusie-onderzoek toen gered.

Het succes van Alcator straalde af op Rijnhuizen, aldus Schram: „Door de samenwerking zaten wij er bovenop. Iedereen wist dat wij bij het project betrokken waren.” De bekendheid van Rijnhuizen werd nog vergroot doordat veel van de gedetacheerde onderzoekers na hun tijd bij MIT nog een paar weken door Amerika reisden. Ze combineerden vakantie met voordrachten aan de grote fusielaboratoria.



Werkoverleg



Medewerkers van de injectiegroep

1970

1970: Van 1959 tot 1970 vond de Utrechtse afdeling Vaste Stof van hoogleraar Volger onderzoek op het terrein van Rijnhuizen. Als het Ornstein Laboratorium van de Rijksuniversiteit Utrecht af is, verlaat de groep het koetshuis. Het afscheidscadeau is Rijnhuizer groen: een stel bomen om de kale Uithof aan te kleden.

Spectaculair sinterklaasfeest

November 2008. De waterbak bij de ingang van het instituut is afgezet met rood-wit-gestreept lint. In het water ligt een pistool. Er is een 'soort van moord' gepleegd, zo gaat het verhaal, maar niemand weet er het fijne van.

Ieder jaar wordt in de sinterklaastijd de wat saaie kantine van Rijnhuizen omgetoverd tot een theaterzaal. In het diepste geheim bereidt een groep medewerkers het sinterklaascabaret voor: een avondvullend programma, waarin collega's – en vooral het management – op de hak worden genomen.

De traditie is even oud als het instituut zelf. Hij is meegenomen door de medewerkers van het Fysisch Laboratorium in Utrecht, die eind jaren vijftig op Rijnhuizen kwamen werken.

Het begon als onemanshow voor Sinterklaas. Beheerder Johan Hovestrijdt herinnert zich de beginjaren: „Ieder jaar was er een geheime Sinterklaas, de oude wees de nieuwe aan. Ik was het in 1966.

De Sinterklaas stuurde vooraf altijd briefjes naar het instituut.

Directeur Kees Braams en zijn secretaresse Hetty Toft probeerden met hun goede taalgevoel aan de stijl van die briefjes Sinterklaas te ontmaskeren. Toen ik het werd, heb ik Hetty als een van de pieten gevraagd. Toen was een van de twee medeplichtig.” Dat jaar kwam Braams er voor het eerst niet vooraf achter, wie Sinterklaas was.

Oud-medewerker Adri Nijssen-Vis: „Vanaf 1968 of '69 is het cabaret geworden, en het werd steeds mooier. Er kwamen verborgen talenten boven. Mensen bleken fantastisch te kunnen piano spelen, of goochelen.”

In de jaren zeventig begon de sinterklaastraditie uit de hand te lopen. De organisatie sleepte loeizware boomstammen naar binnen, legde een watterval aan en bouwde een kamer om tot zandstrand: het was groots, maar het kostte ook veel tijd en zorgde voor overlast. Wekenlang waren de medewerkers bezig met de voorberei-



dingen, het hele instituut werd versierd. Ook de grappen gingen soms over het randje, Braams riep de cabaretiers zelfs een keer op het matje.

Oud-directeur Van der Wiel: „Ik heb er altijd hard om gelachen, maar je werd ook hard aangepakt.” Als er dingen zijn die niet deugen, dan krijgt de directeur het die avond zeker te horen. Behalve een avond vermaak is het cabaret eigenlijk het functioneringsgesprek van het management.

De opbouwtijd heeft Van der Wiel teruggebracht tot een week, waarvan de laatste twee dagen zeer intensief zijn. Wie het cabaret doet, blijft tot de avond zelf strikt geheim. De communicatie verloopt via twee commissarissen. Wat veranderd is, is het entreegeld. Vroeger moesten de medewerkers entree betalen

voor hun personeelsfeest, tegenwoordig is de toegang gratis.

De zondag na het cabaret ontvangt Sinterklaas traditiegetrouw de kinderen van de medewerkers op het kasteeltje. ■



Magische machine



Zoals melk in pakken en in flessen kan, zo zijn ook hete plasma's op te sluiten in verschillende verpakkingen: in een pinch, een stellarator of een tokamak. Die laatste is uitgegroeid tot de standaardverpakking voor hete plasma's. TFTR in Princeton, JT-60 in Japan, JET in Engeland en straks ITER in Frankrijk – de paradepaardjes van het fusie-onderzoek zijn allemaal tokamaks. De tokamak is halverwege de jaren vijftig uitgevonden door de Russen. Zij ontwikkelden een torusvormige opsluiting met een schroefvormig magneetveld. De tokamak had bijna *tokomag* geheten: een samentrekking van de eerste letters van de Russische woorden *toroidalnaja*, *kamera* en *magnitnaja*. Maar om de associatie met het woord *magic* te vermijden, werd in 1959, vlak voor de conferentie in Uppsala (Zweden) nog het woord *katoesjka* toegevoegd. Vrij vertaald staat tokamak voor een toroidale kamer met magnetische spoelen: precies wat het is. De grote doorbraak van de tokamak kwam in 1968. Toen bleek de machine met kop en schouders boven de andere opsluitsystemen uit te steken. ■

De Tokamak Fusion Test Reactor van het Amerikaanse Princeton (1989)

3 DECEMBER 1970: De medewerkers van het instituut eisen meer inspraak. Dit leidt tot de oprichting van de Laboratoriumraad.

Schroefpinch III



10 DECEMBER 1970: De Zweedse plasmafysicus Hannes Alfvén ontvangt de Nobelprijs voor Natuurkunde voor zijn werk aan de theorie van de magnetohydrodynamica (MHD). Deze theorie beschrijft plasma's als magnetische vloeistoffen. MHD werd een belangrijk onderzoeksthema voor de theoriegroep op Rijnhuizen.



De nieuw opgerichte ondernemingsraad geeft directeur Braams de keuze uit drie samenwerkingsmodellen.



der slag of stoot. De Rijnhuizen-medewerkers, die de eerste jaren vaak naar eigen inzicht experimenten uit hadden kunnen voeren, moesten nu in grotere projecten samenwerken. „Al die kleine baasjes van al die kleine experimenten moesten ietsjes minder de baas worden”, zo herinnert Adri Nijsen-Vis zich die tijd. Zij werd na haar studie natuurkunde de tweede vrouwelijke onderzoeker bij het instituut. „In het begin was iedereen gelijk. Braams was weliswaar de baas, maar de groepsleiders waren zijn gelijken. Nu kwam er differentiatie. Dat gaf spanningen die je op ieder instituut hebt, maar die wij tot dan toe niet hadden gehad.”

Bovendien waren de roerige jaren zestig niet onopgemerkt aan het instituut voorbij gegaan. De medewerkers eisten inspraak en organiseerden protestbijeen-

komsten in de kantine. Zij hadden niet langer genoeg aan het werkoverleg met directeur Braams – koffie Braams, of Kees koffie, zoals dat heette – maar eisten ook officiële inspraak. Na ruim een jaar overleg hield de Laboratoriumraad op 3 december 1970 zijn eerste vergadering. In 1973 werd besloten dat de ‘labraad’ zou worden omgezet in een ondernemingsraad. Het kostte vijf jaar voordat die er werkelijk kwam. Een van de pijnpunten was de

Met de komst van de tokamak was het fusie-onderzoek de fase van het pionieren voorbij. In het decennium na 1958 waren tientallen concepten uitgeprobeerd, de meeste zonder succes. Deze periode had vooral veel fundamentele kennis opgeleverd over plasma's. Het fusie-onderzoek op Rijnhuizen concentreerde zich nu op grotere machines, waarin de meest succesvolle ideeën werden doorgevoerd. Op het instituut verliep deze omslag niet zon-



1971

1971: Tijdens een vijfjarige samenwerking doen medewerkers van Rijnhuizen tokamakervaring op bij de MIT-tokamak Alcator. In totaal werken veertien fysici, technici en theoretici in Boston, de meesten een jaar.

vraag of de zelfstandige theoriegroep op het terrein een eigen ondernemingsraad moest krijgen. Uiteindelijk werden op 1 januari 1978 instituut en theoriegroep formeel samengevoegd, waardoor dit probleem verviel.

Het internationale fusie-onderzoek stapte in de jaren zeventig grotendeels over op de tokamak. Ook op Rijnhuizen gingen stemmen op om die kant op te gaan, maar de groepsleiders hielden vast aan hun eigen koers. Het instituut zette vol in op zijn eigen specialiteit: schroefpinch. „Dat onderzoek was een van de topprestaties van Rijnhuizen,” volgens fysicus Niek Lopes Cardozo. „Als klein instituut moet je kiezen of je meegaat in de grote stroom of dat je een niche opzoekt. De schroefpinch was een unieke niche.”

Achteraf bleek dat met de tokamak het ‘winnende’ opsluitsysteem was gepresenteerd, maar dat was in de jaren zeventig nog niet zo duidelijk. De schroefpinch had veel overeenkomsten met de tokamak, maar zou, in theorie althans, duidelijk efficiënter zijn in het opsluiten van hogedrukplasma's. Het was dus niet zo gek dat Rijnhuizen besloot om de schroefpinchexperimenten op grotere schaal uit te voeren.

Het Ministerie van Onderwijs en Wetenschap stelde 2,5 miljoen

Een delegatie van het FOM-bestuur bekijkt het schaalmodel van Spica.



gulden (1,1 miljoen euro) beschikbaar voor het nieuwe experiment: Spica – de Screw Pinch Confinement Approach. In deze schroefpinch zou de temperatuur moeten worden opgevoerd naar twee tot drie miljoen graden en een opsluittijd van een tiende seconde. FOM stelde uit eigen budget 1,5 miljoen gulden beschikbaar. Dat was samen een immens bedrag. Zoveel, dat oud-medewerkers het oplepelen als de tafel van twee: Spica kostte vier miljoen gulden.



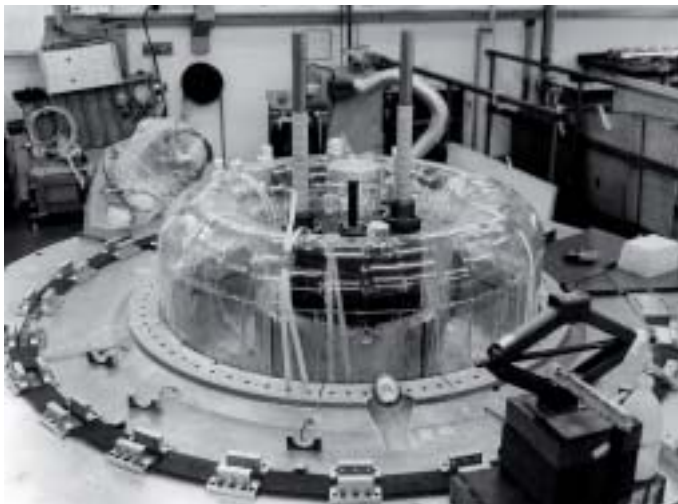
1971

1971: De opbouw van experiment Ringboog



1971: Het feest voor het 25-jarig jubileum van FOM is in de tuin van Rijnhuizen.





De ronde torus van Spica I is bij Spica II vervangen door een renbaanachtige vorm.



De 60 centimeter hoge torus werd in 1973 geïnstalleerd. Het was een apparaat van wereldniveau, met fantastische meetapparatuur. Het doel van het experiment was om de schroefpinch, die het op kleine schaal zo goed deed, op grotere schaal te testen. „Met de bouw van Spica liet het instituut zien dat het een grootschalige machine kon bouwen, binnen budget en redelijk op tijd”, vertelt instituutsmanger Noud Oomens, die op het onderzoek aan Spica promoveerde. Het experiment liep uiteindelijk tot 1987, met een tussentijdse *upgrade*. De experimenten leverden goede resultaten en mooie publicaties op, Spica zette nieuwe records voor plasma-druk. Maar juist het succes van Spica bracht Rijnhuizen in een lastige positie: al vrij snel werd namelijk duidelijk dat

pinches nooit uit konden groeien tot een fusiereactor. Het snel samenpersen van het plasma vereiste een wand van niet-geleidend materiaal, maar juist van dat soort materialen kwamen veel verontreinigingen af als ze in contact kwamen met het plasma. Die vervuiling veroorzaakte fatale instabiliteiten in het plasma. Spica was te succesvol om te stoppen, maar achteraf had het instituut er waarschijnlijk beter aan gedaan om al in een vroeger stadium de focus naar tokamakonderzoek te verleggen.

29 DECEMBER 1971: Het twaalf ton zware transformatorjuk van het experiment Ringboog komt aan op Rijnhuizen. Ringboog is een gasdekenexperiment, waarbij wordt geprobeerd om een plasma in een wervelende laag gas op te sluiten.



1972

JANUARI 1972: ‘Grenzen aan de groei’ verschijnt. Dit rapport voor de Club van Rome voorspelt een snel groeiend tekort aan natuurlijke hulpbronnen.

TEC: samen sterk

Wie klein is, moet slim zijn. Dat geldt zeker in het fusie-onderzoek, waar grote machines voor nodig zijn. Rijnhuizen, dat een relatief klein fusielaboratorium is, heeft daarom altijd samenwerking gezocht met andere fusielaboratoria. Een succesvolle samenwerking is die met de burens: de Duitsers en de Belgen. De eerste samenwerking tussen het Duitse onderzoekscentrum Jülich en Rijnhuizen kwam midden jaren tachtig tot stand. Rijnhuizen werkte aan Rutherfordverstrooiing, een diagnostische methode die in die tijd in opkomst was en waarmee de ionentemperatuur van het plasma kon worden vastgesteld. Oorspronkelijk wilde Rijnhuizen een apparaat voor de Europese tokamak JET bouwen, maar de leiding van JET wilde het prototype niet. Zij vond dat apparatuur zich eerst op andere tokamaks moest hebben bewezen, voor het op JET mocht worden geïnstalleerd. Rijnhuizen had destijds echter geen tokamak in huis die groot genoeg was voor het Rutherfordapparaat, dat RUSC was gedoopt. Dus ging het instituut op zoek naar



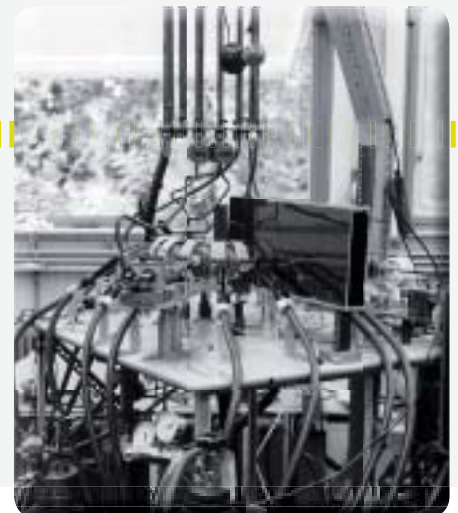
een partner. De Duitse tokamak Textor bleek aan de eisen te voldoen. De apparatuur werd in 1988 naar Jülich gebracht en is daar tot 1994 gebleven. Het oorspronkelijke plan, plaatsing bij JET, werd al snel verlaten. JET kreeg namelijk een divertor (plasma-uitlaat), wat technisch niet te combineren viel met de Rutherforddiagnostiek. RUSC bleef dus in Duitsland. Het apparaat deed het goed, er promoveerden twee Rijnhuizenmedewerkers op. Maar

misschien nog belangrijker dan de mooie wetenschappelijke resultaten was dat de samenwerking goed beviel. Er ontstonden nieuwe plannen. In 1993 organiseerden Rijnhuizen, Jülich en het Belgische plasmalaboratorium van de Koninklijke Militaire School gezamenlijk een zomerschool op het gebied van plasmafysica. Rond die tijd werd ook een overleg tussen de drie laboratoria gestart om te zien of er een gezamenlijk onderzoeksprogramma

1972: De bouw van schroefpinch Spica begint. De vier miljoen gulden kostende machine is het grootste experiment van Rijnhuizen tot dan toe.



Schroefpinch SPII



1972





kon worden ontwikkeld. Elk instituut vaardigde drie wetenschappers af. Dit overleg heette in de wandelgangen de *Gang of Nine*. Het resultaat was een langdurige samenwerking; op 31 mei 1996 tekenden de Nederlanders, de Duitsers en de Belgen het Trilateral Euregio Cluster (TEC). Tot de zomer van 2009 was de tokamak Textor de standplaats van de samenwerking. Ieder land had er zijn specialiteit. De Duitsers bedreven de machine, de Belgen deden ionencyclotronverhitting. Rijnhuizen was gespecialiseerd in de diagnostieken en ECRH-verhitting. De drie relatief kleine laboratoria maakten zo efficiënt gebruik van elkaars expertise, waardoor ze de internationale concurrentie aankonden. In de hoogtijdagen werkten er vijftien medewerkers van Rijnhuizen permanent in Duitsland. Inmiddels is het werk op Textor grotendeels beëindigd, maar de samenwerking niet: TEC zal zich nu concentreren op Magnum-PSI op Rijnhuizen. In dit grote experiment wordt de interactie tussen het plasma en de reactorwand onderzocht. ■

Theoreticus Hans Goedbloed: „Het was de wet van de remmende voorsprong. We hadden een goed experiment, maar het is te lang doorgedaan.”

Naast Spica had Rijnhuizen nog twee grote experimenten – het gasdekenexperiment Ringboog en de torus Tortur, waarin verhitting werd bestudeerd. De gasdekenexperimenten waren een nieuwe richting in het fusie-onderzoek. Dit onderzoek begon in 1966. Het idee was om de druk van het hete plasma in het vat op te vangen met de tegendruk van een laag koud gas. Terlouw werkte aan deze gasdekenexperimenten. Hij vertelt dat directeur Braams over dit idee zeer te spreken was: „In het begin geloofde hij er erg in. Volgens de theorie kon je in een homogeen gas plasma opsluiten.” Ook elektronicus Albert Hugenholtz herinnert zich dat enthousiasme: „Op een dag kwam Braams de kantine in en zei dat hij de fusiereactor had uitgevonden. Hij dacht echt dat dat het werd.”

NERVEUZE PALING

Het plasma gedraagt zich als een nerveuze paling bovenop een met snot ingesmeerde plastic buis. Het floept naar links, en het floept naar rechts. Het blijft slechts zelden middenop, wat ze zo graag zouden zien.

Technicus Ogé Kruijt beschrijft het plasma in het Ringboogproject, 1982 ■

1972: Het laboratorium van de wervelgroep



FEBRUARI 1972: De Joint European Torus Working Group komt voor het eerst bijeen. De Euratom-werkgroep maakt een voorstudie voor de bouw van de grote Europese Tokamak, JET.

1972: Voor het schroefpinch-experiment Spica is nieuwe laboratoriumruimte nodig. De bouw van hal E begint.



De opstelling
Ringboog

Nadat in kleinere opstellingen de stroming van het gas alleen was bestudeerd, kwam in 1974 de grote Ringboogopstelling. Daarin werd onder meer het transport van helium onderzocht. Uiteindelijk bleek het plasma in Ringboog dramatisch snel af te koelen. De onderzoekers haalden met moeite temperaturen van 100.000 graden, terwijl ondertussen in andersoortige experimenten miljoenen graden werden gehaald. In 1983 werd het project afgesloten. Maar de slinger komt altijd terug, vertelt Schüller: „Het idee dat je de stralingswarmte egaal over de wand kunt verdelen met een gasdeken, is in getransformeerde vorm nog steeds actueel. Voor de ITER-reactor is het zeker een van de dingen waaraan wordt gedacht. Braams had goed gezien dat het afvoeren van de warmte een belangrijk thema was. Maar wij maakten de dichtheid van die mantel te hoog, omdat de mantel ook tegendruk aan het plasma moest bieden. Hierdoor koelde het plasma té snel af. Bij ITER denken ze aan een veel ijler gas.”

Het andere grootschalige experiment uit de jaren zeventig, Torture, kreeg al snel een andere naam. Torture was een ongelukkige

1972: De oude wandschilderingen, die op de wand van de Tuinkamer van het kasteel zijn aangetroffen, zijn gerestaureerd.



30 MEI 1972:
Koningin Juliana
bezoekt Rijnhuizen.



Links: Tortur,
onder: gasdeken-
experimenten

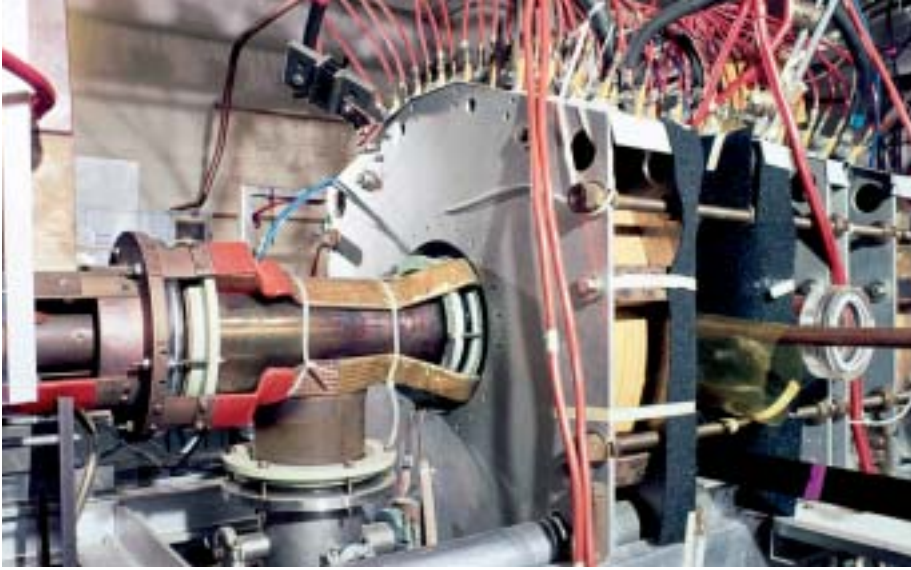


afkorting van 'toroïdaal turbulentie-experiment'. Om de associatie met martelen te voorkomen, werd die naam bijgesteld tot Tortur. In deze opstelling bestudeerden de fysici de verhitting van plasma's door stroomgedreven turbulentie: met sterke stroomstoten werd in een fractie van een microseconde het plasma verhit. Fysicus Hans de Kluiver was na een bezoek aan Berkeley met zijn team begonnen met de turbulente verhittingsexperimenten. In een rechte buis bleek dat de temperatuur inderdaad kon worden opgejaagd. Een torusvorm was de logische volgende stap, om het probleem van warmteverliezen aan de uiteinden van de buis op te lossen. Euratom vond de verhittingsexperimenten belangrijk. Daardoor kwam geld om Tortur uit te bouwen: de kwartsglazen wand van Tortur I werd in Tortur II vervangen door metaal, er kwam een grote condensatorbank bij, een duur spoelensetel en transformatorstations. In deze opstelling leek Tortur al sterk op een tokamak.

De turbulente verhitting werkte gedeeltelijk: het centrum van het plasma werd

JUNI 1972: Het eerste Symposium on Fusion Technology (SOFT), een tweejaarlijks Europees symposium over fusietechnologie. Nederland is in 1974 en 1988 gastland.





Nadat de experimenten naar turbulente verhitting in een rechte buis succesvol bleken, werd de torus Tortur gebouwd. Onder: het koperen schild voor Tortur II.



duidelijk warmer, maar de rand koelde af, waardoor het nettoresultaat tegenviel. Bovendien was deze verhittingsmethode niet zomaar om te zetten naar de grote tokamak JET. De focus van het onderzoek verschoof daarom in de loop van de tijd van turbulente verhitting naar tokamakdiagnostiek. In de derde en vierde variant van het experiment was de opstelling zo aangevuld, dat het een kleine, maar complete tokamak werd. Het plasma bleef tientallen milliseconden in stand en werd 10 miljoen graden

3 JUNI 1972:
Rijnhuizen houdt voor het eerst een open dag.



7 JANUARI 1973:
De oprichting van Ontspanningsvereniging Rijnhuizen (OVR).

Sneeuwballengevecht op Rijnhuizen.

1972

1973



heet. „Tortur IV was klein, maar kwalitatief goed: de opsluittijd volgde de schaalwetten voor tokamaks”, vertelt De Kluiver.

De resultaten van de Russische tokamaks lieten de wereld in 1968 versteld staan met hun 10 miljoen graden, maar voor fusie moet er minstens 100 miljoen graden worden gehaald. De tokamak haalde al zijn warmte uit de stroom die door het plasma liep – door de elektrische weerstand van het plasma ontstond warmte. Er bleek echter een grens aan het verder opschroeven van de stroom. Het plasma was als een bad, waarvan de afvoer groter werd wanneer de kraan verder open ging. Hoe heter het plasma, hoe beter de warmtegeleiding werd en hoe meer warmte er weglekte. Met *ohmse verhitting* alleen kwam de plasmatemperatuur niet boven de 20 miljoen graden. Externe verhitting werd daarom een hoofdthema in de jaren zeventig en tachtig.

Een van de manieren om plasma extra op te stoken is met microgolven – dit heet elektronen-cyclotron-resonantieverhitting (ECRH). Rijnhuizen was goed op microgolfg gebied, dus het lag voor de hand om onderzoek te doen naar deze vorm van verhitting. In 1982 werd er samenwerking gezocht met het fusielaboratorium in Fontenay-aux-Roses. Op de

In de jaren 80 deed Rijnhuizen verhittingsonderzoek op de Franse Tokamak TFR.

Franse tokamak TFR deden de onderzoekers van Rijnhuizen experimenten met microgolfbronnen, drie gyrotrons van ieder 200 kilowatt.

In 1986 was het tijd voor een grote schoonmaak op Rijnhuizen: het instituut besloot de lopende onderzoeken af te ronden en het fusie-onderzoek te concentreren op één tokamak. „In het begin wist je niet wat werkt, in fusie. Daardoor waren er op het instituut



30 MEI 1973: Het nieuwe laboratoriumgebouw, hal E, wordt zonder officiële plechtigheden in gebruik genomen.

18 JUNI 1973: Het eerste plasma van de schroefpinch Spica



veel onderzoekslijnen ontstaan”, vertelt Schüller. „Vanuit plasmafysisch oogpunt waren de experimenten op bijvoorbeeld Spica interessant, maar ze pasten niet langer in de internationale *mainstream* van het fusie-onderzoek.”

Tortur was een kleine tokamak, maar het instituut wilde een maatje groter. Een nieuwe tokamak was nog steeds te duur, dus werden er plannen gemaakt om de lopende experimenten samen te smeden tot één grote machine. Maar het hoofd van de technische dienst, Ad van Ingen, had een beter idee: „Ik was er wat huiverig voor om zelf een tokamak te bouwen, daar hadden we de capaciteit niet voor. Maar ik wist dat ze in Grenoble stopten met hun tokamak Petula.” Dus belde hij naar het Département de Physique du Plasma et de la Fusion Contrôlée. „We konden Petula zo krijgen, voor niets.” In 1986 reisde er een groep medewerkers van Rijnhuizen naar Grenoble, om de tokamak op te halen. „We waren daar bijna klaar, toen kwam de directeur naar me toe”, vertelt Van Ingen. „Die zat met een naar gevoel, hij had toch wat geld voor Petula moeten vragen. Hij vroeg of we er nog wat diagnostiek bij wilden kopen, voor 75.000 gulden. Ik heb Braams gebeld, en dat was toen zo geregeld.”



De afbraak van de Petula in Grenoble

De tokamak kreeg op Rijnhuizen een nieuwe naam, RTP.

Voor zijn tweede leven in Rijnhuizen werd de tokamak geschilderd. Petula kreeg ook een nieuwe naam, RTP – Rijnhuizen Tokamak Petula, later veranderd in Rijnhuizen Tokamak Project. In januari 1989 was het eerste officiële plasma – het eerste schot, zoals de fysici zeggen. Voor deze gelegenheid was er een delegatie van het hoofdkantoor van FOM gekomen. Hoewel, het eerste

1973: Rijnhuizen krijgt zijn eerste centrale computer, een PDP-15.



1973



Wervelexperimenten



schot? Technicus Paul Smeets gelooft er niets van: „Iemand riep: ‘Hoera, hij doet het!’ en iedereen begon te juichen.” Pure psychologie, denkt hij. Want hij zag niets: „De dag ervoor werkte het, de dag erna ook. Maar volgens mij was er bij de opening geen plasma.” Instituutsmanager Oomens bekennt lachend dat Smeets gelijk heeft: „Dat heb je bij experimenten vaker, als er belangrijke mensen komen kijken, dan werkt het even niet. Dus ik riep gewoon: ‘Daar was het schot!’”

Het verhittingsonderzoek met gyrotrons, dat in Parijs was opgestart, ging op RTP verder. Het onderzoek richtte zich op de rol van de elektronen in het plasma – een thema dat het fusie-onderzoek tot dan toe wat had verwaarloosd, aldus Schüller. Hij werd in 1988 hoofd van het fusie-onderzoek op Rijnhuizen, nadat hij negen jaar bij de Europese tokamak JET had gewerkt. Onder-

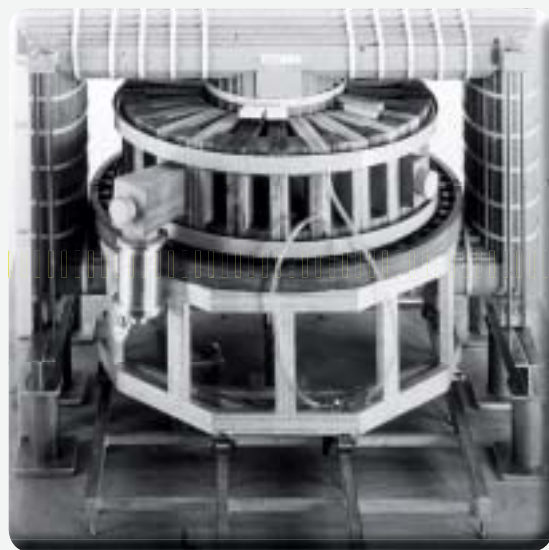
zoeksthema's op RTP waren het ontstaan van instabiliteiten en de gelaagdheid van het plasma. Een belangrijke ontdekking van het RTP-team was dat de warmteverliezen in het plasma niet overal gelijk zijn: het plasma bleek uit lagen te bestaan, als de schillen van een ui. Dit kon worden ontdekt doordat de temperatuur in het plasma nauwkeurig gemanipuleerd en gemeten kon worden. Later werd deze gelaagdheid ook teruggevonden op grote tokamaks, zoals de Europese tokamak JET.

Voor het onderzoek op RTP werden veel promovendi aangetrokken. Schüller: „Bij JET werkten vooral mensen met ervaring, de gemiddelde leeftijd liep daar tegen de vijftig en je zag er bijna geen studenten. Ik dacht, dat gaat op den duur niet goed, je hebt ook jonge mensen nodig.”

Ook op Rijnhuizen werkten veel ervaren onderzoekers. Samen met de nieuwe directeur Marnix van der Wiel besloot Schüller het roer om te gooien. Er werden zoveel mogelijk promovendi aangehouden voor het onderzoek op RTP. Rijnhuizen groeide daardoor uit tot een belangrijke leverancier van jonge fusiefysici.

Na negen jaar trouwe dienst werd RTP te klein. De torus van dertig centimeter hoog en 1,4 meter breed was een van de kleinste tokamaks ter wereld. De afsluiting van het experiment was in stijl: in 1998 werd vvd-europarlementariër Elly Plooi-j-van Gorsel, die kritisch tegenover het fusie-onderzoek stond, gevraagd het laatste schot van RTP te doen. ■

1973: Het eerste plasma in wervelopstelling Ringboog. Hier een schaalmodel van het experiment.



17 OKTOBER 1973: De eerste oliecrisis begint: een aantal OPEC-landen, waaronder Saoedi-Arabië, Irak en Koeweit, kondigt een olie-embargo af naar aanleiding van de westerse steun aan Israël in de Jom Kipoeroorlog. In Nederland gaat benzine op de bon.

Hoofdstuk 5

Meten is zweten

„Tegenwoordig is er geen kunst meer aan. Je ziet nu op een spectrometer meteen welke stoffen er in je plasma zitten.” De wetenschappers van tegenwoordig hebben het maar makkelijk, wil Wim Kooijman zeggen. De digitalisering en nieuwe diagnostieken hebben de wetenschap onherkenbaar veranderd. Kooijman begon in 1962 als laboratoriumassistent op het instituut en werd



later computertechnicus. In de begintijd was ‘meten nog gewoon zweten’, aldus Kooijman. „In de spectrografen zaten destijds lichtgevoelige glasplaten. Na het experiment rende je naar de donkere kamer om die te ontwikkelen.” De afbeelding van de spectrograaf werd vervolgens vergeleken met ijkplaatjes van de spectraallijnen van bekende ontladingen, bijvoorbeeld van een ijzerboog. „Je schoof die ijkplaatjes net zo lang over de opname van je experiment tot het paste.” Het was uren puzzelen om te weten te komen welke stoffen er in het plasma zaten. De spectraallijnen gaven ook een indicatie van de temperatuur.

Voor het maken van berekeningen gebruikten de onderzoekers hun rekenliniaal. Kooijman: „Die was heilig, je had hem altijd op zak.” Wetenschap ging grotendeels met de hand, computers waren er niet.

1973

DECEMBER 1973: Om energie te besparen duurt de kerstvakantie op Rijnhuizen langer.

OVERHEID SCHENKT 1 DAG

Zoals bekend zal in het kader van de energiebezuiniging het instituut van 22 december 1973 tot 2 januari 1974 gesloten zijn.

Maandag 24 december was al vastgesteld als kollektieve snipperdag van 1973. Inmiddels heeft de overheid 1 dag vrij gegeven, zodat nog twee dagen te compenseren overblijven. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden. Eén ervan is dat 1 dag van de kollektieve snipperdagen 1974 wordt opgenomen en 1 dag wordt ingehaald door 33-dagen 15 minuten langer te werken. Omdat dit inhalen - vanwege de energiebesparing - toch moet gebeuren als de dagen wat langer worden, is besloten in de loop van januari 1974 definitieve afspraken over deze compensatie te maken.



Typmachine met een extra toetsenbord voor wiskundige teksten

Op Rijnhuizen
gebouwde snelle camera
uit 1961

Op de tekenkamer werkte nog een rekenkundige, de rekenmeester, die de moeilijke berekeningen deed. Hij berekende bijvoorbeeld hoe sterk materialen moesten zijn en hoeveel ze zouden werken. Als de experimentatoren vastliepen, klopten ze bij de theoriegroep in het kasteel aan voor hulp.

Fotografie was een van de weinige methoden om verschijnselen vast te leggen. Een huisfotograaf hield zich bezig met het uitzoeken van geschikte films. Daarbij hield hij rekening met de kleur en intensiteit van het licht dat bij de experimenten vrijkwam. De films moesten zorgvuldig worden ontwikkeld.

De apparatuur had eerst geen geheugen. Het was een grote vooruitgang toen er camera's op de markt kwamen, waarmee het oscilloscoopbeeld op polaroidfilm kon worden vastgelegd. De experimenten vereisten een goed gevoel voor timing van de onderzoekers. Tijdens de metingen stond er achter iedere scoop



iemand klaar. Bij het starten van het experiment werd er afgeteld en op nul drukte iedereen op de knop voor een foto. Wanneer de ontlading te vroeg of te laat kwam, moest alles overnieuw. Van de experimenten zijn duizenden polaroidfoto's gemaakt, vele waarnemingsboeken vol.

Het digitaliseren van de data ging met de hand. Dat kostte veel tijd. De eerste stap was een selectie van de foto's. Een groot deel van de opnamen ging weg. Van de beste werden een paar punten opgemeten. De laboratoriumassistenten lazen de foto's uit met een oogloepje met schaalverdeling. Wat later kwam er een xy-lezer met kruisdraad, waardoor je snel en nauwkeurig de assen af kon lezen. „Het

was een gigantisch werk, maar het moest, want anders kon je niets met de metingen doen. Je wilde met de data rekenen, er niet alleen naar kijken”, vertelt elektronicus Albert Hugenholtz.

Het uitlezen van de polaroids werd makkelijker toen een ponsbandschrijver aan de xy-lezer werd gekoppeld. Nu hoefden de data niet langer ingetypt te worden, maar konden ze met een druk op het voetpedaal in een ponsband worden gestanst.

Ponskaarten en -banden waren in de jaren zestig en zeventig wat de USB-stick tegenwoordig is: het middel om data en programma's mee op te slaan en te transporteren. Halverwege de



1974

1974: Rijnhuizen bouwt Tortur, een opstelling om turbulente verhitting te bestuderen. Het instituut kreeg extra steun van Euratom voor dit experiment.





Ponskaartlezer



De PDP-8 computer
in 1975

jaren zestig had het instituut nog geen eigen computer. Daarom reed Hugenholtz, die in Zeist woonde, 's avonds regelmatig met een stapeltje ponsbanden naar het Electronisch Rekencentrum van de Rijkuniversiteit Utrecht. „Ik kon de resultaten dan de volgende ochtend weer ophalen. Maar als er ergens een foutje in de ponsband zat, was het mislukt. Dan moest je dat repareren, met plakbandjes, en nieuwe gaatjes maken. Dan was je dus weer een dag verder. Soms bleef ik een uurtje bij het rekencentrum, dan kon ik in de *quick service* de band ter plaatse repareren.”

Computers waren in die tijd nog lege dozen: op de ponsbanden stond zowel de data als de programmatuur. De resultaten van de berekeningen kwamen terug op grote vellen papier, in tekst en getallen. Grafieken maken kostte het rekencentrum een week, daar was een plotter voor nodig. Dat duurde de wetenschappers meestal te lang. Daarom programmeerden ze hun berekeningen zo, dat de getallen en tekst er in de vorm van grafieken uitkwamen. Dan hoefden ze niet zelf de data over te zetten op grafiekenpapier.

De eerste computer op het instituut was een analoge computer, waarmee de onderzoekers fysische verschijnselen konden simuleren met behulp van koppelbare versterkers. Een grote stap vooruit was de tafelcomputer met 256 geheugenplaatsen van acht bit voor het programma en de data, die in 1972 kwam. Aan de computer was een plotter gekoppeld – een luxe die een

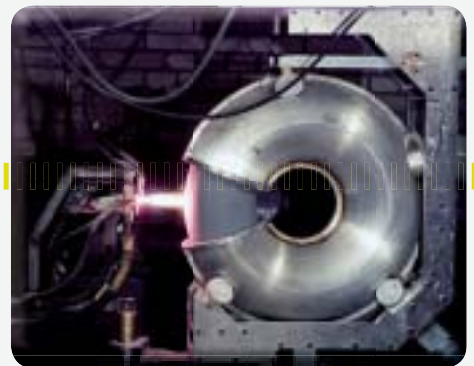
25 OKTOBER 1974: De regering heeft besloten de doelstelling van het Reactor Centrum Nederland (RCN) in Petten te verbreden en de naam te wijzigen in Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). RCN en FOM stellen daarop een fusie voor tussen RCN en Rijnhuizen en vragen om een verhoging van het onderzoeksbudget voor kernfusie.

1974

1975

10 JUNI 1975: Een aantal kamerleden bezoekt Rijnhuizen voor uitleg over het fusie-onderzoek.

Schroefpinch IV





De eerste centrale computer van Rijnhuizen, de PDP-15

eind maakte aan het lange wachten op de grafieken van het rekencentrum. Spelenderwijs leerden de medewerkers omgaan met de computer. Kooijman: „Het was een dure machine, dus bij de afdeling Elektronica was een oppasser aangewezen die de computer moest bewaken. Die kwam regelmatig kijken of alles in orde was.” Zoals te verwachten in een laboratorium, probeerden de werknemers van alles uit op het apparaat.



Plotter

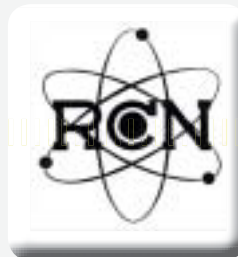
„De programmaruimte ging naadloos over in de dataruimte. We kwamen erachter dat je de toetsen onzichtbaar kon herdefiniëren. Dan leek het alsof de machine niet meer kon rekenen, $3 + 4 = -15$ kwam er dan bijvoorbeeld uit. Toen we daarmee bezig waren, kwam de oppasser binnen. Die dacht dat het apparaat stuk was en belde zonder dat wij het wisten de leverancier. Die kwam toen met een kuub spullen om de computer te repareren.”

Het instituut kocht ook een PDP-8 voor het gasdekenexperiment Ringboog, dat in 1972 van start ging. De Amerikaanse computerpionier DEC bracht die computer in 1965 op de markt. De minicomputer was de eerste die voor massaproductie was ontworpen. Hij was voor 'slechts' 18.000 dollar te koop. De PDP-8 was een hit, er werden er 50.000 van verkocht. „Het was geweldig wat je met die kleine geheugens kon doen”, vertelt Hugenholtz. „Je leerde er compact van programmeren. Als je in je tekstverwerker 'hallo' typt”, vult Kooijman aan, „ben je tegenwoordig al meer geheugen kwijt dan er toen in die hele computer zat.”

Dataopslag op tapes



9 DECEMBER 1976: Na kamervragen komt er eindelijk reactie van de regering op het voorstel tot het samenvoegen van RCN en Rijnhuizen. Zij vindt de samenvoeging niet gewenst, wegens 'het lang-termijn karakter, het hoge kostenniveau en de grote onzekerheden van het op energie-productie gerichte kernfusie-onderzoek'.

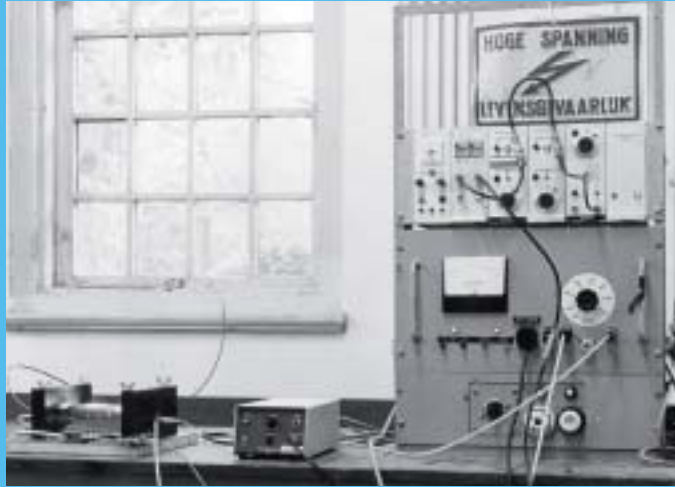


1976

Aan het werk als de Persilfabriek sluit

Voor de experimenten op Rijnhuizen is altijd veel stroom nodig geweest. In de beginjaren belastte het instituut het elektriciteitsnet zwaarder dan officieel was toegestaan. „Eigenlijk had er een dikere kabel naar het instituut gelegd moeten worden, we hadden

20 megawatt nodig”, vertelt Ad van Ingen, die in 1960 hoofd techniek werd op Rijnhuizen. „Maar van het elektriciteitsbedrijf PUEM mochten we van een gewone aansluiting gebruik maken, mits we geen grote storingen op het net veroorzaakten. Ze vertelden ons dat de relais pas afsloegen als de lijn meer dan twee keer in een kwartier te zwaar belast werd. Dus mochten de wetenschappers



maar één keer per kwartier veel stroom uit het net trekken. Dat was oppassen.” Het instituut betaalde dankzij deze truc het tarief voor een gewone aansluiting, en niet het 20 megawatt-tarief.

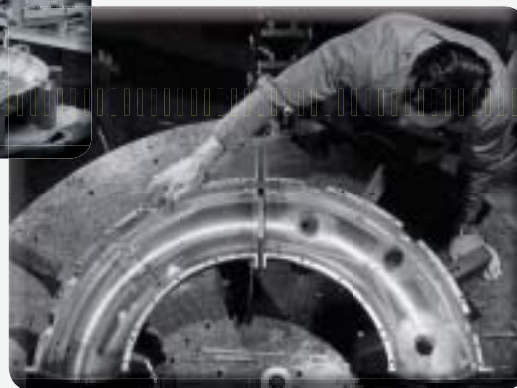
Het elektriciteitsnet was in die tijd ook nog niet zo stabiel. Wim Kooijman was in die jaren laboratoriumassistent. Bij het opladen van de condensatorbanken hield hij rekening met de werktijden in de

nabijgelegen Persilfabriek. „Wanneer de fabriek dichtging, dan ging de referentiespanning omhoog.”

Rijnhuizen had in het begin ook een grote accukelder. Daar stonden duizend accu's van twee volt, die Rijnhuizen van de marine had gekregen. Na een doorslag en een ontploffing in deze kelder, waarbij twee mensen gewond raakten, verdween de accubatterij halverwege de jaren zestig. „Toen gingen we over op het net”, vertelt natuurkundige Adri Nijsen-Vis. „Voor onze experimenten met magnetische flessen gebruikten we een grote magneet.” Dit experiment trok te veel stroom om overdag te draaien. „In de winter mochten we die pas 's avonds na acht uur inschakelen. We werkten toen vaak 's nachts, van acht uur 's avonds tot zes uur 's ochtends.” Toen er eind jaren zestig een schakelstation van het 50 kilovolt-netwerk in de buurt van Nieuwegein kwam, werd Rijnhuizen daarop aangesloten: fusie was toen weer gewoon dagwerk. ■



1977: De kwartswand van Tortur wordt vervangen door metaal.



1977



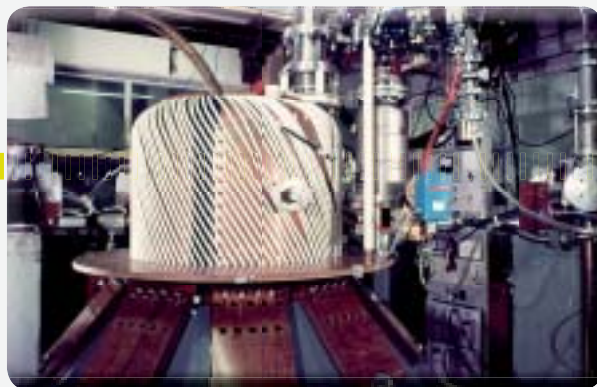
In 1973 kwam op Rijnhuizen ook de eerste centrale computer, een PDP-15. Die was gereserveerd voor berekeningen van de experimentatoren: de theoretici mochten hem niet gebruiken. De capaciteit van de computer was onvoldoende voor hun getallenkrakers. Zij stuurden nog jaren ponskaarten naar de universiteit. In de jaren zeventig stond het instituut ook via een telefoonlijn in verbinding met SARA, het academisch reken centrum in Amsterdam. „Ik zorgde dat ik op maandagochtend voor dag en dauw op het instituut was, dan had ik de lijn alleen. In die tijd was je zo een kwartier bezig om verbinding te krijgen. De data ging via de telefoon, tergend traag”, vertelt theoreticus Hans Goedbloed. Door de opkomst van de computer kon de wetenschap met grote stappen vooruit. Voor het eerst kregen de onderzoekers meer te zien dan een paar momentopnamen uit het experiment. „Dankzij de computer kon je pas echt te weten komen wat er gebeurde”, zegt instituutsmanger Noud Oomens. Hij ging in 1974, tijdens zijn promotie, een jaar naar de Alcator-tokamak op MIT. Rijnhuizen had destijds een samenwerkingsverband met het onderzoeksinstituut in Boston. „Ze hadden een black box-systeem uit de vliegtuigerwereld gekocht. Dat was een grote trommel, waar ze alle signalen op wegschreven. Die kon je daarna op je gemak analyseren en beslissen van welk fragment je een polaroid maakte. Dat was geweldig.”

Niet alleen het vastleggen van de metingen was in de beginjaren moeizaam, ook de diagnostische middelen lieten te wensen over. Oud-directeur Kees Braams schreef na zijn pensionering een boek over de geschiedenis van vijftig jaar plasma-onderzoek.



De kunsten van de glasblazerij: model van de Platte Brug bij de Oude Sluis in Vreeswijk.

Schroefpinch IVb



Meetspoeltje voor
de opstelling
Tortur



Hij beschreef hierin een debat in het Britse Hogerhuis over de financiering van fusie-onderzoek, begin jaren zeventig. Een van de leden stelde daar de vraag: 'Hoe meten ze eigenlijk een temperatuur van 300 miljoen graden?' Het antwoord luidde: 'Ik vermoed met een heel lange thermometer'. Braams berekende in zijn boek dat een kwikthermometer voor die temperatuur 600 kilometer lang zou moeten zijn. Dat geeft wel aan dat traditionele meetmethoden ongeschikt waren voor de temperaturen in het fusie-onderzoek. Daarom bestond een belangrijk deel van het werk uit de ontwikkeling van betrouwbare meetmethoden.

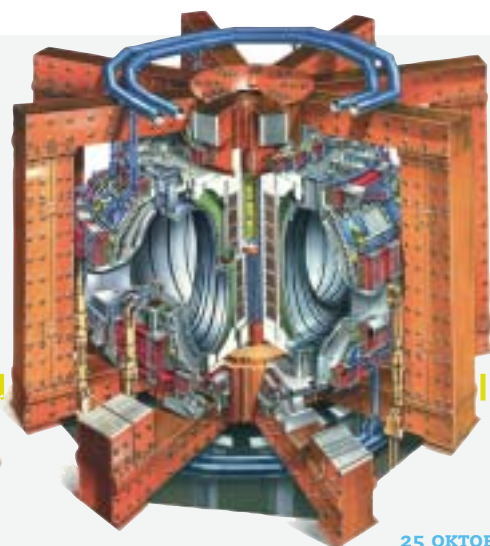
Het meten van temperatuur en andere eigenschappen van het plasma ging in de beginjaren met primitieve middelen. „Lasers

waren er nog niet. Als de plasmadichtheid laag was, kon je hem meten met microgolven”, vertelt Hugenholtz. De plasmatemperatuur werd niet met 'erg lange thermometers' gemeten, maar met sondes. Die werden in het

plasma gehangen. Deze methode was niet zonder gevolgen: het plasma koelde erdoor af en vergiftigde. Voor het bepalen van de plasmadruk werden spoeltjes gebruikt. Hugenholtz: „Die werden pneumatisch in en uit het plasma geschoten. We maakten ze zelf van een lucifer en een lusje van koperdraad. De geniale instrumentmaker Frans La Maire maakte ook sets van magneetspoeltjes waarmee je in drie richtingen het magneetveld kon meten.”

Door de uitvinding van de laser hadden de onderzoekers een nieuwe methode om het plasma te observeren zonder het te verstoren. De eerste laser was in 1960 gebouwd door de Amerikaan Theodore Maiman. Hij won het nipt van andere laboratoria, die het theoretisch concept ook graag in praktijk wilden brengen. Het apparaat van Maiman was zo groot als een luciferdoosje. Daarna ging het snel. Binnen tien jaar veroverde de laser zijn plaats in het plasmafysica-onderzoek en nu is een plasmalaboratorium zonder lasers niet voor te stellen.

Rijnhuizen was vanaf het begin te klein om kans te maken in de race om het heetste plasma of de grootste tokamak. Voor opstellingen van die omvang had het instituut niet de capaciteit. In plaats daarvan specialiseerde het instituut zich in deelgebieden van het plasmaonderzoek en in diagnostiek. In de beginjaren gingen de wetenschappers nog naar andere laboratoria om er kennis op te doen. Maar toen de kennisachterstand na een paar jaar was ingehaald, kreeg Rijnhuizen een eigen gezicht. Diagnostiek werd daar een belangrijk onderdeel van.



1977

1978

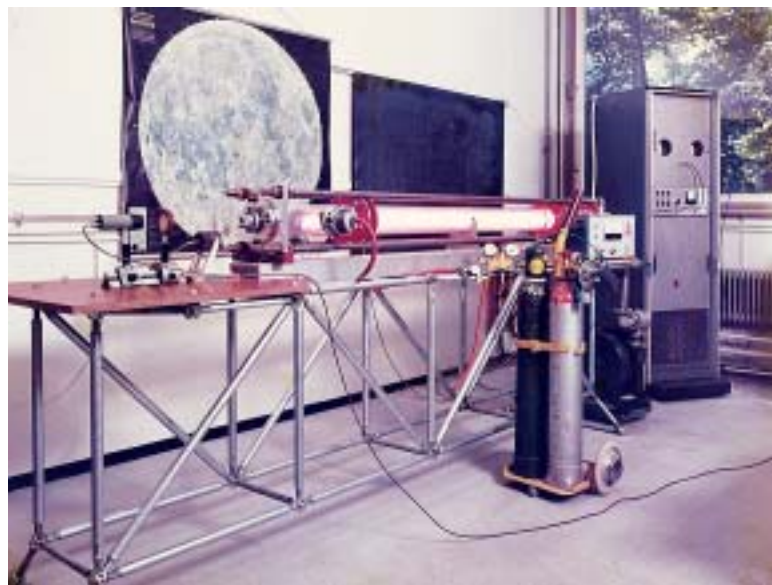
25 OKTOBER 1977: Na lange onderhandelingen besluit de Raad van Ministers van de Europese Gemeenschap dat de Europese tokamak JET in Culham komt.

1 JANUARI 1978: De theoriegroep TN I en het instituut integreren. Het hoofd van de theorie-afdeling, Folker Engelmann, wordt adjunct-directeur.

De ontwikkeling van nieuwe diagnostiek lag vooral in de handen van de technici. Rijnhuizen had op dit gebied een belangrijk voordeel ten opzichte van laboratoria in het buitenland: de HTS was een goede opleiding, waarvoor in het buitenland geen equivalent was. Daar waren technici mbo'ers. De HTS'ers waren op Rijnhuizen onmisbaar – zij wisten vaak meer van meetapparatuur dan de academici. Ook nu nog zijn wetenschappers in het buitenland jaloers op het hoge niveau van de Nederlandse technici.

Hugholtz was een van die HTS'ers die intensief met de ontwikkeling van nieuwe meetmethoden bezig was: „Toen ik in 1960 op Rijnhuizen kwam werken, lag er een kast vol microgolfspullen. Daar ben ik mee gaan spelen. Ik bouwde interferometers en reflectometers.” Hij werkte veel samen met promovendus Luuk Ornstein, die later groepsleider zou worden en hoogleraar thermonucleaire plasmafysica. „Ik werd zijn assistent, maar het ging op gelijkwaardige basis.” Ornstein publiceerde over het onderzoek, onder meer over het werk van Hugholtz. Daarin werd de technicus alleen bedankt als *skillfull worker*. „In het begin mocht ik bijvoorbeeld ook niet naar conferenties. Er was in die tijd nog een groot onderscheid tussen academici en niet-academici. Dat was bij Ornstein. Ik ging daarom al snel zelf artikelen schrijven. We publiceerden ook veel samen.”

HCN-laser voor opstelling Ringboog



Hugholtz groeide uit tot de microgolfspecialist van het instituut. Hij was de eerste HTS'er die een jaar naar MIT ging voor het Alcator-project. Later ontwikkelde hij ook de microgolfdiagnostieken, die Rijnhuizen aan de Europese tokamak JET leverde. Toen het aan de Technische Universiteit Eindhoven ook voor hbo'ers mogelijk werd te promoveren, deed Hugholtz dat. Hij verdedigde er in april 1990 zijn proefschrift.

Collega-technicus Rolie Barth maakte gebruik van de promotiemogelijkheid van de Rijksuniversiteit Utrecht. Hij promoveerde op zijn specialisatie, de Thomsonverstrooiing.

Barth was in de jaren tachtig de drijvende kracht achter de ontwikkeling van een tweedimensionale spectrometer, waarbij met Thomsonverstrooiing in één keer de elektronentemperatuur en dichtheid te meten was in een dwarsdoorsnede van het plasma.

17 JANUARI 1978: Na jaren overleg keurt de Raad van Bestuur het reglement voor de ondernemingsraad van Rijnhuizen goed.





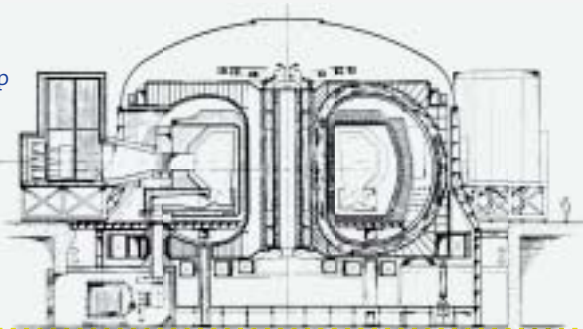
Zelfs bij lage elektronendichtheden kon met grote nauwkeurigheid worden gemeten. Barth begon zijn werk op de kleine tokamak Tortur en vervolmaakte het op de grotere tokamak RTP. Vooral door zijn werk kreeg Rijnhuizen een goede reputatie op het gebied van Thomsonverstrooiing. Andere fusielaboratoria klopten in Nieuwegein aan voor advies. Zo bouwde Rijnhuizen halverwege de jaren negentig een Thomsonsysteem voor de Spaanse TJ-II-stellarator. Ook voor Textor, de tokamak voor het drielandenonderzoek van Nederland, Duitsland en België, bestond een belangrijk deel van de Nederlandse bijdrage uit Thomsondiagnostiek.

Hoeveel kennis en kunde Rijnhuizen op het gebied van diagnostiek in huis had, werd goed zichtbaar toen het instituut de tokamak RTP kreeg. „Voor de komst van RTP kregen we advies van een Euratomcommissie over het diagnostisch programma dat we wilden uitvoeren”, vertelt Tony Donné, specialist op het gebied van diagnostiek. „Ze vonden de plannen te ambitieus. Ze zeiden dat

ze aangenaam verrast zouden zijn als de helft zou worden gerealiseerd.” Volgens Donné heeft het instituut zijn ambities uiteindelijk grotendeels waargemaakt. „Ik denk dat ook zij de rol van de hts'ers op Rijnhuizen hebben onderschat.” Hij begint een lange lijst aan apparatuur op te sommen die voor RTP werd gebouwd: een zes-kanaals ECE-roosterspectrometer (‘een prototype voor een apparaat voor JET’), de 20-kanaals microgolfradiometer Ernie, een 20-kanaals interferometer/polarimeter, pulsradarreflectometrie (‘leverde heel mooie plaatjes’), een tomografieopstelling voor zichtbaar licht en één voor röntgen (‘met tachtig meetkanalen en vijf meetkoppen, een unicum’), Thomsonverstrooiing, neutrale deeltjesdiagnostiek... „En volgens mij ben ik er nog een aantal vergeten”, peinst Donné. RTP was volgens hem de best gediagnosticeerde machine ter wereld. Het zette Rijnhuizen op de kaart als diagnostisch expertisecentrum.

Deze sterke diagnostiektraditie wordt nog altijd in stand gehouden. Een jongere meetmethode, waar Rijnhuizen tegenwoordig in uitblinkt, is de ladingsruil-recombinatie-spectroscopie (CXRS). Wanneer er neutraal waterstof in het hete plasma wordt geschoten, komt er door de interactie met het plasma licht vrij. Dat geeft informatie over de dichtheid, temperatuur en rotatie van het plasma. De methode kwam in de jaren negentig op. Rijnhuizen installeerde deze diagnostiek op de Duitse tokamak Textor. Het instituut ontwerpt momenteel ook een CXRS-systeem voor de internationale tokamak ITER. Het fusie-onderzoek in Nederland is te klein om een reus als ITER in huis te halen, maar groot genoeg om een van zijn ogen te ontwikkelen. ■

FEBRUARI 1979: De International Working Group van het Internationaal Atoomagentschap voor Energie komt voor het eerst bijeen om te praten over een internationale tokamak, Intor (International Thermonuclear Reactor).



1979

14 MAART 1979: Rijnhuizen organiseert een voorlichtingsbijeenkomst om het Nederlandse bedrijfsleven te informeren over JET en te interesseren voor mogelijke levering van onderdelen voor dit project.

Sportief Rijnhuizen

Wanneer er ijs ligt, krijgen de werknemers van Rijnhuizen een dag ijsvrij. De Ontspanningvereniging Rijnhuizen regelt dan een tocht. Deze sportieve traditie begon al in de jaren zestig. Oud-medewerker Albert Hugenholtz vertelt over de eerste Rijnhuizen-schaatsdag: „Een paar collega's ging schaatsen, een tocht op de Ablasserwaard geloof ik. Ik wou niet mee, ik wilde tijd voor mezelf en mijn vriendin houden. Maar directeur Kees Braams wist dat ik goed kon schaatsen, hij wilde per se dat ik meekwam. Dus die zei: 'Dan maak ik er een dienstreis van'. Het gevolg was dat ook de jaren daarna, als er voldoende ijs lag, iedereen vrij kreeg om te schaatsen. Dan ging er een autootje van het lab mee, met koek en sopie.”

Er is altijd veel gesport op en rond Rijnhuizen, vooral in de jonge jaren van het instituut. In de zomer werd er gezwommen in 'het grootste kanaal in de buurt', het Amsterdam Rijnkanaal. Hugenholtz: „Dan ging er een hele groep mee, zelfs Leo



Rietjens, de onderdirecteur.” Andere sportieve activiteiten in de jonge jaren waren de karatelessen die fysisch Wouter Schuurman gaf in de kantine. Ook zijn bridgecursus werd goed bezocht. Daarnaast werd er veel getennist en deed er een Rijnhuizenteam mee aan de zomercompetitie voetbal voor bedrijven. Rijnhuizen is ook altijd goed vertegenwoordigd geweest op de FOM-sportdag, die jaarlijks wordt georganiseerd. De Voetbalvereniging Rijnhuizen groeide in 1973 uit tot Ontspanningsvereniging Rijnhuizen (OVR), die nog altijd bestaat. Behalve activiteiten voor de sportievelingen organiseert de OVR culinaire en sociale evenementen. ■



Hoofdstuk 6

De olie voorbij

Het gasveld in Slochteren (1959)



In 1959 stookten de Nederlandse huishoudens kolen. Dat veranderde toen op 29 mei 1959 onder het bietenland van boer Kees Boon uit Kolham de aardgasbel werd ontdekt. Een maand na de vondst pompte de Nederlandse Aardolie Maatschappij het eerste Groningse gas omhoog. Het was het einde van de kolenboer, Nederland stapte massaal over op gas.

Twee jaar voor de vondst van het gas had Nederland besloten zich aan te sluiten bij het internationale fusie-onderzoek. De belofte van een goedkope en schier onuitputtelijke brandstofbron lonkte. Fusie was een belangrijke wetenschappelijke ontwikkeling. Natuurkundige Adri Nijsen-Vis: „De eerste jaren geloofden we dat fusie binnen 25 jaar zou lukken. Daar wilde ik bij zijn. Niet om het energieprobleem op te lossen, dat was er namelijk

niet. Maar omdat de gedachte fascinerend was, dat de brandstof voor fusie zo goedkoop was.”

Voor de meeste medewerkers op het instituut was de fusiereactor slechts een bijkomstigheid van het onderzoek: zij waren gefascineerd door hete gassen, door het gedrag van plasma's, door de fundamentele natuurkunde die erachter schuilging.

In de jaren zestig doen de fysici van Rijnhuizen hun werk in

1979: Door onrust in het Midden-Oosten is er minder olie beschikbaar. De olieprijs stijgt tijdens deze tweede oliecrisis tot recordhoogte.

1979: Directeur Braams wordt voorzitter van de JET Scientific Council.

1981 - 1983: Nederland houdt een brede maatschappelijke discussie over kernenergie en het energiebeleid. Het eindadvies is om af te zien van de bouw van nieuwe kerncentrales.





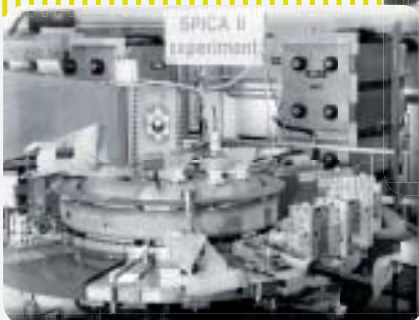
De Jakobs ladder op een open dag: de ontlading klimt langs twee elektroden omhoog.

de luwte. In kleine opstellingen worden fundamentele concepten uitgeprobeerd. Maar begin jaren zeventig neemt het draagvlak voor het fusie-onderzoek af. De universiteiten beklagen zich bij FOM dat de drie FOM-instituten, waaronder Rijnhuizen, samen maar liefst 60 procent van het budget verbruiken. De industrie loopt

niet warm voor het Nederlandse fusie-onderzoek: volgens een FOM-onderzoek in 1970 blijkt men het 'fundamentele onderzoek dat in Jutphaas plaatsvindt te waarderen', maar reageert men 'zeer sceptisch' als er wordt gevraagd of het onderzoek moet worden uitgebreid met het oog op de toekomstige energieproductie met hulp van fusiereactoren. Kernsplijting heeft de toekomst, zo concludeert de industrie. De milieubeweging maakt geen onderscheid tussen kernsplijting of kernfusie: atoomenergie is hoe dan ook fout. De oprichting van de Amsterdamse Werkgroep Atoom in 1971 en de protesten tegen de bouw van de kerncentrale in Borssele, die in 1973 in gebruik werd genomen, markeren het begin van een grote anti-kernbeweging.

In 1972 besluit Rijnhuizen zijn eerste open dag te organiseren voor algemeen publiek. De open dag is op zaterdag 3 juni, vier dagen na het bezoek van koningin Juliana, als het instituut toch al helemaal spic en span is. Nijsen-Vis organiseerde de dag: „Directeur Braams vond dat we naar buiten moesten treden, meer laten zien wat voor onderzoek we deden. Het was ook bedoeld als tegenwicht tegen de associatie met kernenergie.”

1981: De schroefpinch Spica krijgt een grotere ontladingsbuis en nieuwe diagnostieken. De opstelling heet voortaan Spica II.



1982

4 FEBRUARI 1982: Goed nieuws voor de fusiewereld: op de Duitse tokamak Asdex is de H-mode ontdekt. De opsluiting van het plasma verbetert met een factor twee.



De bezoekers krijgen uitleg over fusie op de zon en hoe lastig het is dat proces op aarde na te bootsen.

Rijnhuizen houdt ieder jaar een open dag



tegenwoordig de jaarlijkse open dag bezoekt, zal de radioactieve wand aantreffen in het rijtje nadelen van de fusiereactor. In oktober 1973, een jaar na die eerste open dag, krijgt het energiedebat een nieuwe impuls. Tot verbijstering van de wereld draaien de Arabische olieproducerende landen de oliekraan dicht. Het is een reactie op de steun van de westerse landen aan Israël tijdens de Jom Kipoer-

Hoe mooi het zou zijn als het lukt, omdat de brandstofvoorraad nagenoeg oneindig is. Dat er bij fusie niet met zwaar radioactieve brandstoffen geslept hoeft te worden, zoals bij een kerncentrale. Over één ding hielden de Rijnhuizenmedewerkers echter hun mond: de wand van de fusiereactor. De neutronen die vrijkomen bij een fusiereactie maken de reactormantel radioactief. Anders dan bij kernsplijting gaat het hier om elementen die relatief snel vervallen – binnen tientallen tot honderden jaren, afhankelijk van het materiaal. Maar die nuance zou in de jaren zeventig volledig verloren zijn gegaan. Radioactiviteit, in welke vorm ook, was onbespreekbaar. „We dachten bovendien dat we dat probleem nog wel op zouden lossen, met andere materialen”, vertelt Nijsen-Vis.

Die nieuwe materialen zijn nog niet gevonden en het radioactief worden van de wand wordt nog altijd als een minpunt van de fusiereactor gezien. Maar het taboe is er inmiddels vanaf. Wie



9 JULI 1982: De tweemaster Caprice gaat te water in het Merwedekanaal. Directeur Kees Braams ontwierp en bouwde het schip zelf. De familie Braams schenkt de ontspanningsvereniging van Rijnhuizen een tafeltennistafel, als dank voor alle hulp die de medewerkers bij de bouw hebben verleend.



1982



oorlog. De olielanden verhogen de olieprijs met 70 procent en verminderen de productie. De prijs voor een vat olie schiet omhoog en breekt door de grens van – omgerekend naar nu – veertig dollar per vat. Ook ons land is doelwit van de olieboycot: Nederland nam niet alleen een pro-Israëliësch standpunt in, maar leverde ook in het geheim wapens.

Wanneer de boycot ingaat, bereidt Nederland zich op het ergste voor. Er komen verplichte autoloze zondagen. Benzine gaat op de bon. In het personeelsblad *Interkom* van december 1973 schrijft beheerder Johan Hovestrijdt dat Rijnhuizen bonnen voor dienstritten aan zal vragen. Verder kan iedereen die meer dan vijftien kilometer van het instituut woont, een verklaring van de werkgever krijgen. Daarmee kunnen de werknemers bonnen voor extra benzine aanvragen. Ook gaat het instituut in het kader van de energiebesuiniging rond kerst drie dagen extra dicht. Twee daarvan zijn collectieve snipperdagen. De derde dag zal worden ingehaald wanneer het weer langer licht is, door 33 dagen lang een kwartier over te werken. Voor die vrije dag is ingehaald, is de oliecrisis alweer voorbij. In maart 1974 komt op de olietop in Washington een einde aan de boycot. Maar dat betekent niet dat alles weer wordt zoals het was. De olieprijs blijft hoog. De westerse wereld is er in één klap

Autoloze zondag in Brussel (2007). Tijdens de eerste oliecrisis werden er in Nederland autoloze zondagen ingevoerd om energie te besparen.



van doordrongen geraakt dat olie geen vanzelfsprekendheid is. Er verschijnen uitgebreide artikelen in de krant over alternatieve energiebronnen en energiebesparing.

De oliecrisis versterkte ook de boodschap van de Club van Rome. Deze organisatie van Europese wetenschappers werd wereldberoemd door het rapport 'Grenzen aan de groei' uit 1972. De club schetste een somber beeld van de toekomst: grondstoffen zouden snel opraken en er zou te weinig voedsel zijn om de groeiende wereldbevolking te kunnen voeden. De oliecrisis was volgens velen slechts een voorproefje van wat ons te wachten stond.

Dankzij de crisis stond het onderzoek naar andere energiebron-

ZOMER 1982: Drie medewerkers gaan drie maanden naar Rusland om een 6-kanaals elektronen-cyclotron emissie (ECE)-spectrometer te testen op de grote tokamak T-10. De test is succesvol en Rijnhuizen krijgt in december de opdracht om voor de Europese tokamak JET een 12-kanaals-versie van het apparaat te bouwen.



DECEMBER 1982: Het eerste plasma van de grote Amerikaanse tokamak TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor).





nen in Amerika boven aan de agenda. Het fusiebudget vertienvoudigde er ten opzichte van de jaren zestig. In Europa gaf de hoge olieprijs een extra stimulans voor de ontwikkeling van een grote tokamak, JET. Uiteindelijk werd in 1977 besloten de machine daadwerkelijk te bouwen. Vlak daarna kwam de tweede oliecrisis, dit keer door onrust in het Midden-Oosten. En ook dit keer volgde het Amerikaanse fusiebudget de snel stijgende oliekoers.

In Nederland waren olieprijs en onderzoeksbudget voor fusie niet zo sterk gekoppeld. Hier werd het kernfusie-onderzoek beschouwd als fundamentele wetenschap, met een fusiereactor als einddoel. Het geld voor het onderzoek kwam, via FOM, van het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen – en niet van het Ministerie van Economische Zaken. In de beginjaren van het instituut sprak dat voor zich: het onderzoek naar de eigenschappen van plasma's was zeer fundamenteel van aard. Maar in de jaren zeventig richtte het instituut zich meer en meer op het opsluiten van hete plasma's. De wetenschappers riepen steeds vaker technologische hulp in van het Reactor Centrum Nederland (RCN) in Petten. De samenwerking beviel zo goed, dat de twee de regering voorstelden om Rijnhuizen en RCN samen te voegen. De minister van Economische zaken, Ruud Lubbers, had toen net de eerste Energienota uitgebracht, in reactie op de oliecrisis. Daarin stelde hij voor de doelstelling van het RCN te verbreden en de naam te wijzigen in Energie Centrum Nederland (ECN). Volgens RCN en FOM paste fusie uitstekend bij die verbreding, zeker nu het onderzoek de pioniersfase voorbij was.



FOM en RCN dienen het voorstel om samen verder te gaan in oktober 1974 in. De instituten stellen in het plan ook voor om het Nederlandse Euratombudget voor fusie te verhogen van 10 naar 12,5 miljoen gulden per jaar. Zo blijft de bijdrage aan het Europese fusieprogramma in verhouding: ook andere landen verhogen het Euratombudget.

Het kabinet Den Uyl staat niet te juichen en het plan blijft twee jaar liggen. In juni 1976 komen er kamervragen over de impasse. Het duurt dan nog tot december voor de regering met een ferm 'nee' komt. In het FOM-jaarboek van 1976 wordt beschreven hoe de kaarten lagen. De Minister van Onderwijs en Wetenschappen, Jos van Kemenade, 'plaatst het onderzoek in een zuiver wetenschappelijk kader waarin verruiming van de financiële middelen niet past'. Minister Ruud Lubbers van Economische zaken 'erkent dat het onderzoek zich duidelijk op de toepassing van fusie richt, maar wil de verantwoordelijkheid voor fusie-onderzoek niet overnemen zolang er geen beheerste kernfusie is gerealiseerd'.

De regering laat FOM weten dat fusie-onderzoek niet genoeg prioriteit heeft om extra middelen beschikbaar te stellen en dat het FOM-Instituut voor Plasmafysica niet in ECN zal worden opgenomen. Als argumenten voor dit besluit geeft de regering 'het lange-termijnkarakter, het hoge kostenniveau en de grote onzekerheden van het op energieproductie gerichte kernfusie-onderzoek'. Het zijn precies deze argumenten – te duur, te ver weg, te onzeker – waar kernfusie nog altijd mee worstelt. Zo heeft het jaren geduurd voor er was besloten om de internationale fusiereactor

25 JUNI 1983: Blijdschap bij directeur Hans-Otto Wüster bij het eerste plasma in de Europese tokamak JET.



1983: De bouw van de Duitse tokamak Textor.



1982 1983

DECEMBER 1982: Minister Deetman van Onderwijs en minister Van Aardenne van Economische Zaken bevrieten het onderzoeksbudget voor kernfusie voor vier jaar, vanwege de 'lage prioriteit die kernfusie-onderzoek binnen het kader van energie-onderzoek' heeft.

Fusie in een bekersglas

Een bekersglas met zwaar water en twee elektroden, één van platina, één van palladium: zo eenvoudig leek fusie te zijn, in maart 1989. Op een druk bezochte persconferentie op de universiteit van Utah maakten elektrochemici Martin Fleischmann en Stanley Pons bekend dat er in hun bekersglas meer energie vrijkwam dan erin ging. Zij schreven deze warmteontwikkeling toe aan een fusiereactie van het deuterium. Bovendien detecteerden ze neutronen en tritium, wat ook op fusie wees. Bij hun opstelling was de energieopbrengst nog niet zo hoog, maar de twee chemici verwachtten dat in een opgevoerd experiment het rendement zou stijgen tot honderden procenten. Na de persconferentie waren ze wereldberoemd: hun *koude kernfusie* haalde alle kranten en journaals.

Fleischmann en Pons vermoedden dat er tijdens de elektrolyse deuteriumkernen in de palladiumelektrode terecht kwamen, zo dicht dat ze fuseren.

De fusiewereld reageerde stomverbaasd. Zouden er dan toch geen gloeiendhete plasma's nodig zijn om fusiereacties op gang te brengen?

Zou fusie ook op de keukentafel kunnen? Hadden zij al die jaren op het verkeerde spoor gezeten? Het klonk ongeloofwaardig. Om te fuseren moeten de positief geladen atoomkernen zeer dicht bij elkaar komen. In een fusiereactor gebeurt dat door ze te verhitten. De kernen krijgen dan zoveel snelheid, dat ze ondanks hun onderlinge afstoting op elkaar botsen. Wat gebeurde er precies in het bekersglas van Pons en Fleischmann, dat dit nu ook bij lage temperaturen lukte? Marnix van der Wiel was in die tijd directeur van Rijnhuizen. Hij kreeg al snel een telefoontje van Euratom: „Die zeiden, luister eens, wij geloven hier niets van. Maar we kunnen niet het Europees parlement om geld voor fusie vragen als we er niet het fijne vanaf weten. Dus vragen we alle Europese fusielaboratoria om hier een halfjaar aan te werken.” Ook Rijnhuizen deed dat. Fysicus Niek Lopes Cardozo sprong er met een promovendus op. „We gingen eerst naar het Engelse onderzoekscentrum in Harwell voor overleg. Zij hadden contact met Fleischmann en Pons. Daar was in november ook een bijeenkomst, waar iedereen zijn resultaten presenteerde.” In het koetshuis van Rijnhuizen probeerden ze de Amerikaanse resultaten te reproduceren. Lopes Cardozo denkt met plezier aan de experimenten terug: „We leer-



Pons en Fleischmann

*Boven en onder:
De experimenten
op Rijnhuizen
leverden geen bewijs
voor koude fusie.*



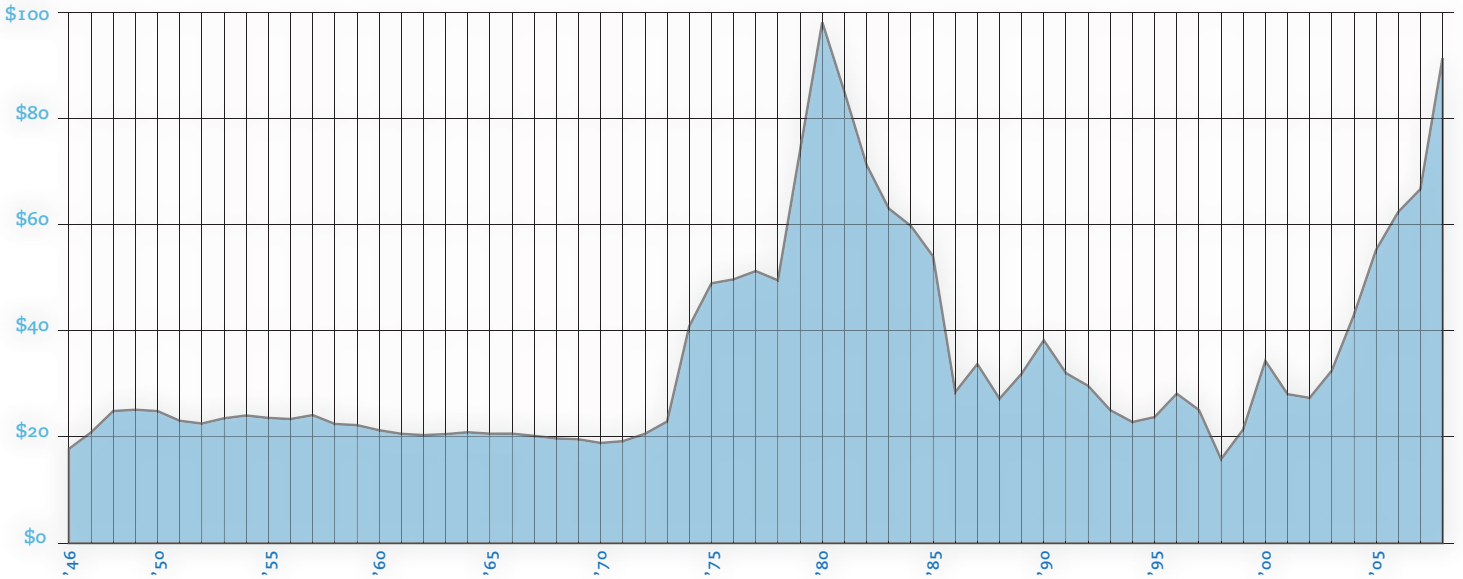
den van alles. Hoe je palladium vol waterstof kunt laden, over neutronentellers. Het waren heel conceptuele experimenten.” Van der Wiel noemt ook de overweldigende media-aandacht: „Er kwam drie keer per week een televisieploeg naar het laboratorium. Ik werd op de gekste momenten gebeld. Ik moest zelfs in het journaal bij Joop van Zijl uitleggen hoe het zat.” Hoe graag de wereld ook wilde dat het werkte, het werkte niet. Niet in Nieuwegein, niet bij de collega's van Amolf, het FOM-instituut in Amsterdam. Daar zat een groep plasmafysici die ook fusie-onderzoek deed. Zij werkten aan de ontwikkeling van bronnen en versnellers voor de injectie van intense neutrale bundels in tokamaks. Maar ook dit werk was opzij gelegd voor controle-experimenten. Ze werden uitgevoerd door Aart Kleyn, later directeur van Rijnhuizen. Maar ook hij vond geen bewijs voor koude fusie. Wereldwijd slaagde niemand erin de resultaten te reproduceren. Lopes Cardozo: „De meetapparatuur van Fleischmann en Pons bleek niet eens nauwkeurig genoeg voor de metingen die ze claimden gedaan te hebben.” Uiteindelijk bleek er nog veel meer mis, het onderzoek rammelde aan alle kanten. Koude kernfusie werd naar het rijk der fabelen verwezen. ■



Ruwe olieprijs in dollars per vat, gecorrigeerd in de dollarkoers van 2008

ITER te bouwen. ITER wordt met zijn constructiekosten van 5 miljard euro en eenzelfde bedrag voor de exploitatie een kostbaar wetenschappelijk experiment. Maar afgezet tegen de budgetten van de olie- en energiesector valt dat bedrag mee. Daar is men gewend in miljarden te denken – de bouw van een kolencentrale kost bij-

voorbeeld een miljard euro. Alleen Shell besteedt jaarlijks al meer dan een miljard dollar aan onderzoek en ontwikkeling – op een omzet van rond de 300 miljard. Maar de energiesector investeert nog niet in fusie: voor hen is de fusiereactor nog altijd te ver weg. Pas wanneer ITER bewijst dat fusie wetenschappelijk en technisch haalbaar is, zal de interesse van de energiewereld toenemen. Een groot publiek debat over kernfusie is er in Nederland nooit geweest. In politieke discussies over energie werd het onderwerp soms even aangestipt, maar de meeste aandacht ging uit naar



9 APRIL 1984: De officiële opening van JET in aanwezigheid van Koningin Elizabeth en de Franse president François Mitterrand.



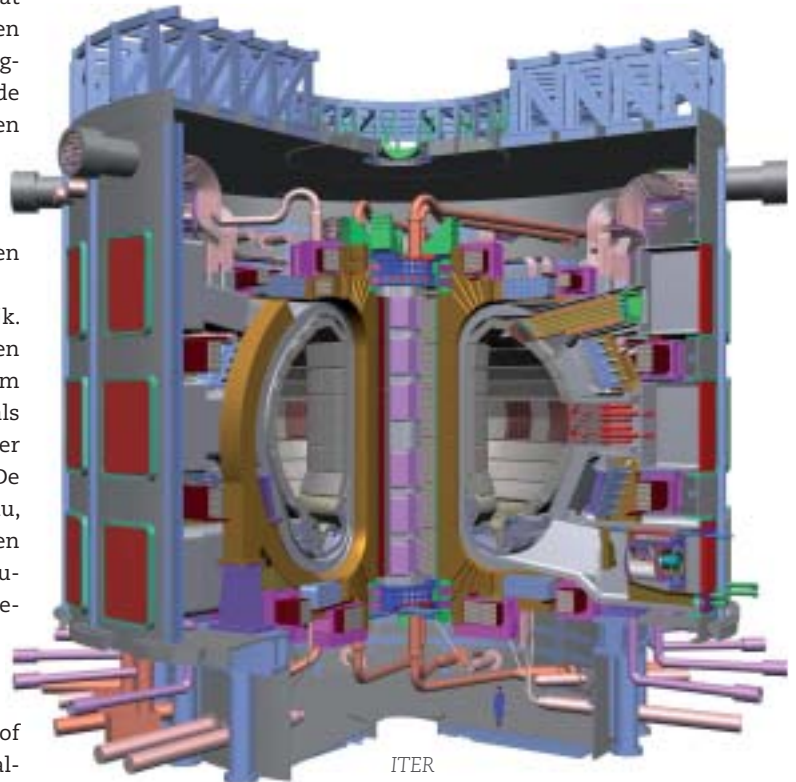
16 NOVEMBER 1984: Rijnhuizen bestaat 25 jaar.



de kortere termijn: kolencentrales, kerncentrales, windparken en zonnecellen. Binnen FOM was er wel van tijd tot tijd debat geweest over de vraag, of Rijnhuizen nog toekomst had. In de jaren tachtig bijvoorbeeld. De olieprijs was na de oliecrises weer teruggezak naar een ouderwets laag niveau. Daarmee daalden ook de wereldwijde investeringen in fusie-onderzoek. Bovendien waren er technische problemen met het opstoken van het plasma – de warmte vasthouden was een groot probleem. Voor FOM was dat reden om in 1987 te besluiten dat Rijnhuizen naast fusie ook ander onderzoek moest gaan doen. Dat betekende een inkrimping van het fusie-onderzoek met 25 procent.

Ook in de jaren negentig had het fusie-onderzoek het moeilijk. De besprekingen rond ITER zaten muurvast. De politiek had geen haast; olie was nog altijd onvoorstelbaar goedkoop. „Waarom moet je zo'n duur ding bouwen om energie mee te maken, als je het bijna gratis uit Saoedi-Arabië haalt? Die discussie ging er toen”, vertelt Aart Kleyn, vanaf 2003 directeur van Rijnhuizen. De olieprijs schommelde in de jaren negentig, omgerekend naar nu, rond de 25 dollar per vat. Van tekorten was voorlopig ook geen sprake. De voorraden waren groot en er werden regelmatig nieuwe velden gevonden, zoals in 1998 in de Golf van Mexico. In Amerika daalde het budget voor fusie-onderzoek.

Op Rijnhuizen volgt in 2000 een tweede grote bezuiniging. FOM schroeft de financiering flink terug. Niek Lopes Cardozo was destijds hoofd fusie van Rijnhuizen: „In die tijd leek het of fusie-onderzoek ophield. Iedereen wist dat het dood was, behalve de mensen die erin werkten – die sfeer hing er.” ITER leek er



ITER

MAART 1985: Rijnhuizenmedewerkers koppelen de eerste van drie gyrotrons aan de tokamak TFTR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses). Het instituut heeft een meerjarige samenwerking met de Fransen opgezet. Rijnhuizen gebruikt de hoogvermogenmicrogolffbronnen voor verhittingsexperimenten.



5 APRIL 1985: Het eerste plasma in de grote Japanse tokamak JT-60.



1985: De Amerikaanse tokamak TFTR breekt door de 100 miljoen-graden-grens.



niet meer te komen, de Amerikanen hadden zich in 1998 zelfs teruggetrokken uit de samenwerking. In die tijd stapte Rijnhuizen gedeeltelijk over van zuivere plasmafysica naar onderzoek naar de wandbelasting van de fusiereactor. „Dat was een vangnetconstructie”, aldus Lopes Cardozo. Mocht ITER niet door zijn gegaan, dan had het instituut met dit project makkelijk over kunnen schakelen: materialenonderzoek is ook voor andere takken van fysica interessant. Maar ITER ging uiteindelijk wél door. Dat was voor FOM het moment om fusie weer tot aandachtsgebied te bevorderen: hier moest Nederland bij zijn.

Na de eeuwwisseling groeit, door de aandacht voor klimaatverandering, het draagvlak voor fusie weer. In de loop van de jaren negentig was het broeikaseffect op de agenda verschenen. In 1990 verscheen het eerste rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), de klimaatorganisatie van de Verenigde Naties. Het IPCC concludeerde dat de mens de klimaatverandering versnelt door de grote hoeveelheden CO₂ die vrijkomen bij het gebruik van fossiele brandstoffen. De jaren daarna werden wetenschappers steeds stilliger over de gevolgen van de stijgende temperaturen.

Met het toenemend CO₂-gehalte in de lucht groeit ook de aandacht voor de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen. In 1997 wordt het Kyoto-protocol opgesteld, waarin wordt afgesproken dat de deelnemende landen de uitstoot van broeikasgassen terug zullen dringen. Niet iedereen doet mee. Grootverbruiker Amerika ratificeert bijvoorbeeld niet, omdat het land bang is voor de economische gevolgen.

In het nieuwe millennium stijgt klimaatverandering op de politieke agenda. Het ene na het andere jaar belandt in de top tien van warmste jaren ooit. De wereld begint zich serieus zorgen te maken. Het klimaat wordt een belangrijk argument in het energiedebat. Dat is goed voor het fusie-onderzoek. Fusie heeft immers net als kernsplijting en alternatieve energiebronnen als voordeel dat er geen CO₂ bij vrijkomt. In juni 2005 komt het besluit over ITER alsnog: de tokamak zal in Frankrijk worden gebouwd.

ITER moet rond 2020 aantonen dat fusie technisch haalbaar is. De vraag is hoe lang de volgende stap zal duren: de bouw van de demonstratiecentrale DEMO, die elektriciteit aan het net zal moeten leveren. Rijnhuizendirecteur Kees Braams waagde zich niet graag aan speculaties over wanneer de fusiereactor er zou zijn. In 1972 schreef de Russische kernfysicus Lev Artsimovich dat ‘als de mensheid fusie nodig heeft, het er zal zijn, want er zijn geen onoverkomelijke hindernissen’. De leuze, ‘fusie zal er zijn wanneer de maatschappij het nodig heeft’ was ook het motto van Braams. Technisch lijkt het haalbaar, de grote vraag is of fusie-energie ook economisch rendabel zal zijn; de brandstof is goedkoop, de technologie echter duur. Fusie wordt tegenwoordig niet meer aangeprezen als een oneindige bron van goedkope energie – daarvoor is de technologie te complex gebleken. Maar de fusiewereld heeft nu een ander argument voor het onderzoek: fossiele brandstoffen zijn eindig en veroorzaken milieuproblemen. We kunnen ons niet veroorloven om een alternatieve energiebron als fusie niet serieus te onderzoeken. ■

NOVEMBER 1985: Tijdens een top in Genève spreken Michail Gorbatsjov en Ronald Reagan over ontwapening. Gorbatsjov stelt een wereldwijde samenwerking voor op het gebied van fusie. Het is het prille begin van de grote tokamak ITER.



1985

1986

26 APRIL 1986: Een explosie in de Russische kerncentrale Tsjernobyl: een wolk radioactief materiaal verspreidt zich over Europa.

Koninklijk bezoek

„Het hele instituut werd geboend”, vertelt natuurkundige Adri Nijssen-Vis. „En ik voelde me opgelaten, want ik mocht de koningin begeleiden.” Op 30 mei 1972 zag het instituut er piekfijn uit. De gangen waren leeggehaald, het toilet op het kasteeltje met moderne apparatuur uitgerust. De veiligheidsdienst was langs geweest om te controleren of er geen verdachte sujetten op het instituut werkten. Koningin Juliana was te gast op Rijnhuizen, als onderdeel van haar werkbezoek aan het westelijk weidegebied van de provincie Utrecht. Zij kreeg een rondleiding langs de experimenten. Technicus Bart de Groot stond bij Turhe, een van de experimenten waar de verhitting van het plasma werd onderzocht. „We hadden met drie gasen een rood-wit-blauwe boogontlading gemaakt. Ik maakte de boog, Hans de



tuur had. Ik wist het niet precies en gokte maar wat. ‘Meneer Van Ingen, mij houdt u niet voor de gek’, zei ze, ‘dat moet veel meer zijn.’” Na het bezoek heeft Juliana directeur Braams nog eens op de koffie uitgenodigd, om haar meer over energie-onderzoek te vertellen. Echtgenote Lieke

Het bezoek van koningin Juliana aan Rijnhuizen.

Kluiver gaf uitleg.” De Kluiver weet nog hoe blij hij was dat de boogontlading goed lukte: „Experimenten mislukken nogal eens als mensen komen kijken. Maar De Groot deed het koelbloedig.”

De koningin was zeer belangstellend. De Kluiver: „Ik weet nog dat ze zei, maar meneer, u kunt het plasma toch al opsluiten. Dat was scherp opgemerkt. Ik heb haar toen uitgelegd dat de temperatuur van deze plasma’s nog te laag was voor fusie.”

Hoe goed de koningin haar huiswerk had gedaan, ontdekte ook Ad van Ingen. Hij was verantwoordelijk voor de data-apparatuur op het instituut. „Ze vroeg me hoeveel geheugen de appara-

Braams: „Wij dachten eerst nog dat het een grap was, er werden zo vaak grappen uitgehaald op het instituut.” Maar toen de secretaresse naar het paleis belde, bleek dat Juliana inderdaad graag wilde dat Braams nog eens langskwam. ■



Hoofdstuk 7

Gebundelde krachten

„Mijn eerste conferentie was in Garching. Er waren 60, 70 mensen. Die kenden elkaar allemaal. Het waren de pioniers, de fusiewereld was nog niet groot. Die sfeer hing er ook. Er was bijvoorbeeld geen conferentiediner, we werden thuis uitgenodigd voor het eten.” Instituutsmanager Noud Oomens begon in 1971 als promovendus op Rijnhuizen. Hij beschrijft de fusiewereld in die jaren als ‘één grote familie’. Na de vrijgave van het geheime onderzoek in 1958 werden in een groot aantal landen fusie-

laboratoria opgericht. De wetenschappers zochten contact met de experts in fusie – Engeland, Amerika, Rusland – en met elkaar. De gezamenlijke start in een nieuw vakgebied zorgde voor een sterke band.

In die jaren moest een fysicus zijn talen spreken. Het was nog geen algemeen gebruik om in het Engels te publiceren. Omdat er in de Sovjet-Unie veel interessant onderzoek werd gedaan, stuurde directeur Braams in 1967 drie van zijn medewerkers op Russische les. Natuurkundige Adri Nijsen-Vis was een van hen. „De Russen liepen in die tijd voorop, ze stuurden ons bergen artikelen.” Zij kreeg drie maanden ontheffing van haar dagelijks

werk om aan de universiteit Russisch te studeren. Ze deed mee met het talenpracticum dat de studenten Russisch de eerste drie maanden kregen. Zo raakte ze snel wegwijs in de taal. De jaren



Impressie van plasma in tokamak JET



OKTOBER 1986: Frankrijk concentreert zijn tokamakonderzoek in Cadarache. De tokamak Petula in Grenoble moet daarom sluiten. Rijnhuizen kan de tokamak gratis overnemen.



1986

13 OKTOBER 1986: Het onderzoek op Rijnhuizen verbreedt: de opstelling PICO van Amolf verhuist naar Rijnhuizen. Het nieuwe vakgebied is de röntgenlithografie.



De Europese tokamak JET in 1983

daarna vertaalde Nijsen-Vis de Russische artikelen: „Alleen de samenvattingen – pas als iemand interesse had ook de rest.” Er kwamen ook geregeld Russen op bezoek op het instituut. „Dat contact is er altijd geweest, ondanks de koude oorlog.” Zo kwam er in 1969 een gast van het Kurchatov-Instituut voor Atoomenergie. Nijsen-Vis: „Hij overnachtte in een flat van een vriendin van me, die er een tijdje niet was. Hij vond alles hier bijzonder luxe. Hij was bijvoorbeeld verrast dat er sinaasappels te koop waren.” Die waren in de Sovjet-Unie zelden te krijgen. „Wij kwamen bij hem op bezoek en hij liet ons zijn koelkast zien. Hij had alles opgekocht. De koelkast lag helemaal vol sinaasappels.” Het onderwerp politiek werd vermeden. Nijsen-Vis: „Je wilde je gasten niet in verlegenheid brengen, maar ze praatten er soms wel over. Ze waren vast gescreend door de partij. Deze man moest zich ook regelmatig melden op de ambassade.” Computertehnicus Wim Kooijman herinnert zich dat Russische

gasten zich nooit helemaal op hun gemak voelden: „Ze waren een beetje paranoïde. Als er een groep kwam, was er ook altijd een partijbons bij. Dat was degene die Engels sprak.”

Niet alleen met de Russen was goed contact, maar eigenlijk met alle fusielaboratoria ter wereld. Er kwamen Japanners, Australiërs, Amerikanen en Europeanen naar Rijnhuizen. Vaak logeerden ze bij de medewerkers thuis.

Het overleg tussen de Europese laboratoria vindt vanaf het begin ook op formeel niveau plaats. De Europese Gemeenschap voor Atoomenergie, Euratom, wordt in 1957 opgericht, tegelijk met de Europese Economische Gemeenschap. Het voornaamste doel van de gemeenschap is het bevorderen van de vreedzame toepassingen van kernenergie. Kernsplijting was bij de oprichting het hoofdthema van de organisatie, maar er was ook een bescheiden budget voor onderzoek naar kernfusie. Euratoms rol in fusie is de afgelopen vijftig jaar flink gegroeid: van de 2,8 miljard euro die de organisatie voor de periode 2007 tot 2011 tot haar beschikking heeft, gaat twee derde van het budget naar fusie. De organisatie zorgt voor de inhoudelijke afstemming tussen de Europese fusielaboratoria.

Nederland sloot in 1962 als een van de eerste landen een associatieverdrag met Euratom. Braams trad dat jaar ook toe tot de belangrijkste adviesraad van Euratom, de Groupe de Liaison. Het

1 FEBRUARI 1987: Kees Braams gaat met vervroegd pensioen. Marnix van der Wiel (foto) volgt hem op als directeur van Rijnhuizen. Chris Schüller neemt Braams leerstoel over aan de Rijksuniversiteit Utrecht.



MAART 1987: Rijnhuizen krijgt toestemming voor de bouw van een vrije-elektronenlaser, Felix.

1987

De bouw van het D-vormige reactievat van tokamak JET



associatieverdrag was vooral bedoeld om de Nederlandse bijdrage aan Euratom terug te laten vloeien. Euratom betaalde 40 procent van het onderzoek. Voor de inhoud van het onderzoek op Rijnhuizen had het nauwelijks invloed, zo schrijft Edwin Shaw in zijn boek over de Europese fusiereactor JET.

De eerste tien jaar zijn de Euratominspanningen op het gebied van fusie redelijk bescheiden van aard. Dat verandert wanneer in 1968 de tokamak doorbreekt. Een jaar later adviseert de Groupe de Liaison, onder leiding van Braams, om het Europese fusieprogramma om te gooien in de richting van de tokamak. Naast meerdere kleine tokamaks is er in Europa behoefte aan een grote tokamak, zo stelt de groep. In een grotere machine zou de plasmatemperatuur hoger op moeten lopen. Iedereen wil dat graag uitproberen, maar een grootschalig experiment is te duur voor één laboratorium. Daarom is het tijd voor een gezamenlijk project.

In 1971 wordt de bouw van een grote, gezamenlijke machine in de doelstellingen van Euratom opgenomen. Er is ook al een naam voor de tokamak: de Joint European Torus, afgekort tot JET.

Het jaar erna begint een werkgroep met een verkennende studie. In 1975 ligt er een plan. De omvang van JET – een D-vormige torus van 4 meter hoog – is niet te vergelijken met voorgaande experimenten. Electronicus Albert Hugenholtz weet nog dat hij een presentatie over het plan zag: „JET was een grote stap, een heel grote stap. In die presentatie hadden ze de straal van alle bestaande experimenten bij elkaar gezet, en de omvang van JET eromheen. JET was groter dan al de andere experimenten bij elkaar.”

Uiteindelijk werkte Hugenholtz zelf mee aan JET. Rijnhuizen leverde microgolfdiagnostieken voor de tokamak in het Engelse Culham. Hugenholtz was specialist op dat gebied en werd voor twee jaar gedetacheerd bij JET: „Toen ik daar werkte, had ik echt het gevoel dat we met iets groots bezig waren. Het was een mijl-

1987

29 APRIL 1987: Burgemeester Mans Flik reikt oud-directeur Braams een koninklijke onderscheiding uit. De nestor van het Nederlandse fusie-onderzoek is benoemd tot Ridder in de Orde van de Nederlandse Leeuw.



1987: De vs, de Sovjet-Unie, Europa en Japan starten de internationale ITER-samenwerking.

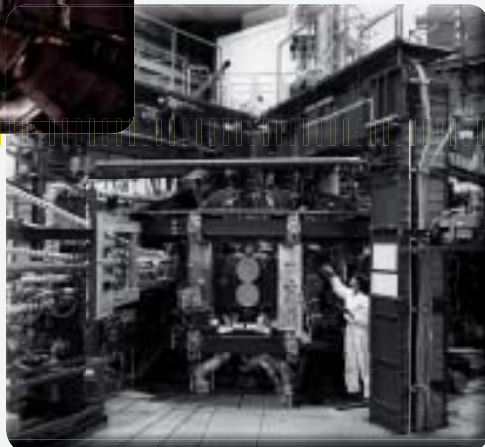
Zaken met Rusland

„De banken in Rusland waren na de val van het communisme onbetrouwbaar. Dus ben ik in 1992 met een koffertje vol dollars naar een conferentie in Würzburg afgereisd.” Nu kan fysicus Chris Schüller erom lachen, maar destijds vond hij het doodeng. Alsof hij op pad was voor een cocaïnedeaal. Het geld was een eerste betaling van Russische gyrotrons, die Rijnhuizen voor de tokamak RTP had besteld. Met deze microgolffron gingen de onderzoekers het plasma verhitten. „We hadden de tip gekregen dat Alexander Litvak, een Russische fysicus, met zijn team een nieuw type gyrotron had ontwikkeld, dat het fantastisch deed. Ik ben met een paar collega's naar Nizhny Novgorod afgereisd om te gaan kijken.”

De gyrotrons zagen er inderdaad goed uit. „Er was alleen één probleem.” Euratom betaalde mee aan RTP, en daar hoorden bepaalde eisen bij. „Van de Europese Commissie moesten alle investeringen in fusie bij de Europese industrie gebeuren, tenzij er hiervoor geen Europese industrie beschikbaar was.” De gyrotrons waren een tussengeval. Er was een Europees consortium dat onder leiding van het Franse elektronicaconcern Thomson gyrotrons bouwde. „Met die dingen was altijd wat aan de hand. Ze gingen steeds kapot. We hadden voor het verhittingsonderzoek dat wij wilden doen wat beters nodig.” De Russen konden de nieuwe

gyrotrons bovendien voor een zacht prijsje leveren – zij wilden graag de Europese markt op. „Tegen kostprijs, een half miljoen. Terwijl die van Thomson twee miljoen kostten.” Schüller belde vanuit Rusland naar FOM voor overleg en kreeg toestemming om de gyrotrons te bestellen. „Daarna kwam er een enorme storm kritiek van de Europese Commissie, hoe ik dat had kunnen doen. Ik moest me in Brussel komen verantwoorden. Zes heren zaten er op me te wachten. Ik heb toen gezegd: ‘Heren, ze zijn slechts een kwart van de prijs van Thomson. Zelfs als we uw 40 procent Euratomsubsidie niet krijgen, zijn we goedkoper uit.’ Veel gemopper, maar uiteindelijk hebben we de subsidie toch gekregen. Zij zagen ook wel in dat de apparaten beter waren.”

Na die eerste betaling hoefde Schüller niet meer met zijn koffertje op pad. Litvak vond een bank in Cyprus, die door Russische instellingen werd gebruikt voor buitenlandse betalingen. „Daarbij wist je wel zeker dat het geld aankwam, wat bij Russische banken vaak niet het geval was. De overige betalingen zijn via die Cypriotische bank gegaan”, aldus Schüller. ■



1988

SEPTEMBER 1988:

Rijnhuizen test op de Duitse tokamak Textor of het mogelijk is met Rutherfordverstrooiing de ionentemperatuur te bepalen.

OKTOBER 1988: De afbraak van het Tortur-experiment markeert de laatste stap in de vernieuwing van het onderzoeksprogramma van Rijnhuizen. Het fusie-onderzoek concentreert zich in huis op de tokamak RTP (voorheen Petula), en daarbuiten op de tokamaks JET en Textor. Een kwart van het geld gaat voortaan naar 'niet-fusie'-onderzoek

paal. Er werd hard gewerkt, in shifts. Ik heb nooit van mijn leven zo hard gewerkt als daar – en er zoveel voldoening uitgehaald.”

Toch leek de bouw van JET aanvankelijk niet door te gaan. Het plan lag in 1975 klaar, maar er was nog geen locatie. De kandidaten waren Cadarache in Frankrijk, Garching en Jülich in Duitsland, Culham in Engeland, Ispra in Italië en Mol in België. Nederland deed niet mee in de strijd. Ad van Ingen zat namens Rijnhuizen in het comité dat de locaties op geschiktheid beoordeelde: „Braams zei meteen: ‘Wij hoeven niet zo nodig’. Maar de andere laboratoria wilden JET graag hebben. Het werd een heel politiek spel.”

De discussie draaide al snel niet meer om welke locatie de beste voorzieningen kon bieden. Ieder land kwam op voor zijn eigen belangen en geen enkele locatie had genoeg steun om gekozen te worden. Tien vergaderingen later was de Raad van Ministers er nog steeds niet uit. In plaats van het paradepaardje van Europese eensgezindheid dreigde JET te verworden tot het symbool van een Europa, waarin de lidstaten enkel oog hadden voor hun eigen belangen. Uiteindelijk ging het begin 1977 nog tussen twee kandidaten. Frankrijk had zich teruggetrokken op voorwaarde dat de volgende grote tokamak in Cadarache zou komen. De overgebleven laboratoria waren Culham en Garching, maar de onderhandelingen zaten muurvast.

Drukte bij de meetapparatuur op 25 juni 1983: het eerste plasma in JET



Op 13 oktober 1977 kapen vier Palestijnse terroristen een Boeing 737 van Lufthansa. Zij dwingen het vliegtuig via een aantal tussenstops naar Mogadishu in Somalië te vliegen. De kapers eisen de vrijlating van leden van de links-extremistische terreurgroep Rote Armee Fraktion, die in Duitsland gevangen zitten. Zij vermoorden de piloot, maar Duitsland geeft niet toe. Op 18 oktober bestormt de Duitse antiterreureenheid GSG 9 het toestel. Drie kapers komen om in het vuurgevecht, de vierde raakte ernstig gewond, maar de 86 inzittenden blijven ongedeerd. Een Britse SAS-eenheid assisteert Duitsland bij de bevrijdingsactie. Een week later maken de Europese wetenschapsministers bekend dat JET in Culham komt – een beslissing die waarschijnlijk direct samenhangt met de dankbaarheid van bondskanselier Helmut Schmidt voor de Engelse hulp bij het beëindigen van de kaping. Terwijl Europa bezig is met JET, wordt in de Verenigde Staten

26 JANUARI 1989: Het eerste plasma van de tokamak RTP (Rijnhuizen Tokamak Project).



1989



1989: De theoriegroep van Rijnhuizen installeert een numeriek programma voor de analyse van meetgegevens bij JET.



Rijnhuizen bouwde meetapparatuur voor JET, waaronder deze 2 mm-interferometer.

de tokamak TFTR gebouwd en in Japan JT-60. Ook dat zijn grote machines, al zijn ze allebei net wat kleiner dan JET. De Sovjet-Unie raakt zijn toonaangevende positie kwijt; het land houdt zijn experimenten kleinschaliger.

In 1979 legt de Duitse Eurocommissaris voor Energieonderzoek, Guido Brunner, de eerste steen voor JET. Vier jaar later, op 25 juni 1983, maakt de tokamak zijn eerste plasma, een halfjaar na de Amerikaanse concurrent TFTR.

Rijnhuizen behoort tot de kleinere laboratoria van Europa. De bijdrage aan JET was daarmee in verhouding. Fysicus Chris Schüller werkte in die jaren bij JET: „Het was een actieve club, maar bescheiden.” Rijnhuizen stond internationaal bekend om zijn goede diagnostiek. Het instituut bouwde in de jaren tachtig drie diagnostische apparaten voor JET. Het instituut zorgde ook dat er Nederlandse onderzoekers in Culham waren voor onderhoud en

onderzoek. Een deel van de mensen was voor langere tijd gedetacheerd, een ander deel bezocht de tokamak regelmatig. Hugenholtz deed beide: hij werkte er twee jaar, maar ging ook daarvoor en daarna regelmatig langs. Hij bouwde mee aan een twee millimeter-interferometer. Die moest voor de opening af zijn: „Het was spannend, de dag voor de opening werkte hij nog niet. De directeur, Otto Wüster, kwam zelf kijken. *What's wrong with the damn thing?*, vroeg hij. Maar de interferometer was op tijd klaar. Het eerste schot hadden we, dat heb ik gezien, maar ik had niet op het knopje gedrukt om de meting op te slaan. Het tweede schot werd de eerste dichtheidsmeting van JET.”

Ook de theoriegroep van het instituut was betrokken bij het werk op JET. Zij installeerden er in 1989 een computerprogramma om de meetgegevens te kunnen interpreteren. Dit programma was gebaseerd op de magnetohydrodynamica, de theorie die het plasma beschrijft als een magnetische vloeistof. Theoreticus Hans Goedbloed schreef het in 1975, toen hij als postdoc op Los Alamos werkte. Hij kwam daarna terug naar Rijnhuizen. De methode is in de loop van de tijd door de theoriegroep en buitenlandse groepen steeds verder uitgebreid en verfijnd. Zij is nog altijd in gebruik bij JET.

Op bestuurlijk gebied was de inzet van Braams in de wetenschap-



23 MAART 1989: De Amerikaanse elektrochemici Stanley Pons en Martin Fleischmann zeggen bij lage temperaturen kernfusie te hebben bereikt. Ze verwachten dat deze *koude kernfusie* op te schalen is voor commerciële stroomproductie. Wereldwijd proberen kernfusielaboratoria, waaronder Rijnhuizen, het experiment na te doen: zonder resultaat.



1990

JUNI 1990: Rijnhuizen organiseert in Amsterdam de 17e European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Heating.



De opening van JET

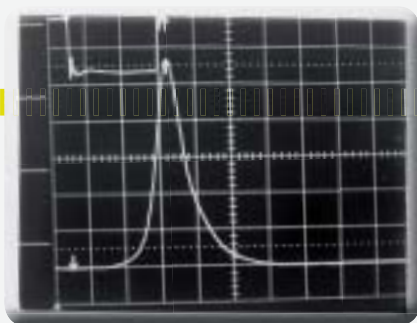


pelijke raad van JET de belangrijkste bijdrage van Rijnhuizen. Hij was van 1979 tot 1985 voorzitter. De raad bestond uit 15 wetenschappers. Zij adviseerden de JET-raad over de wetenschappelijke koers en veranderingen aan de tokamak. Schüller, die zelf in de jaren negentig lid werd van de raad: „Braams was gevreesd, je moest met een goed verhaal komen als je een nieuw onderzoeksthema bij JET wilde beginnen.”

Wanneer de bouw van JET in volle gang is, is het optimisme over tokamaks tanend. Het opvoeren van de plasmatemperatuur gaat stroever dan gedacht. Bij hogere temperaturen verliest het plasma zijn energie sneller en warmt het moeizamer op. Volgens nieuwe berekeningen zijn er gigantische vermogens nodig om het plasma tot fusietemperaturen te verhitten. „Het leek dweilen met de kraan open. Fusie zat begin jaren tachtig in een heel negatieve dip”, aldus elektrotechnicus Daan Schram, die in die tijd hoogleraar Technische Natuurkunde in Eindhoven was.

In die tijd loopt bij het VN-atoomagentschap IAEA een verkenning voor een

19 AUGUSTUS 1991: Het eerste licht van vrije-elektronenlaser Felix.

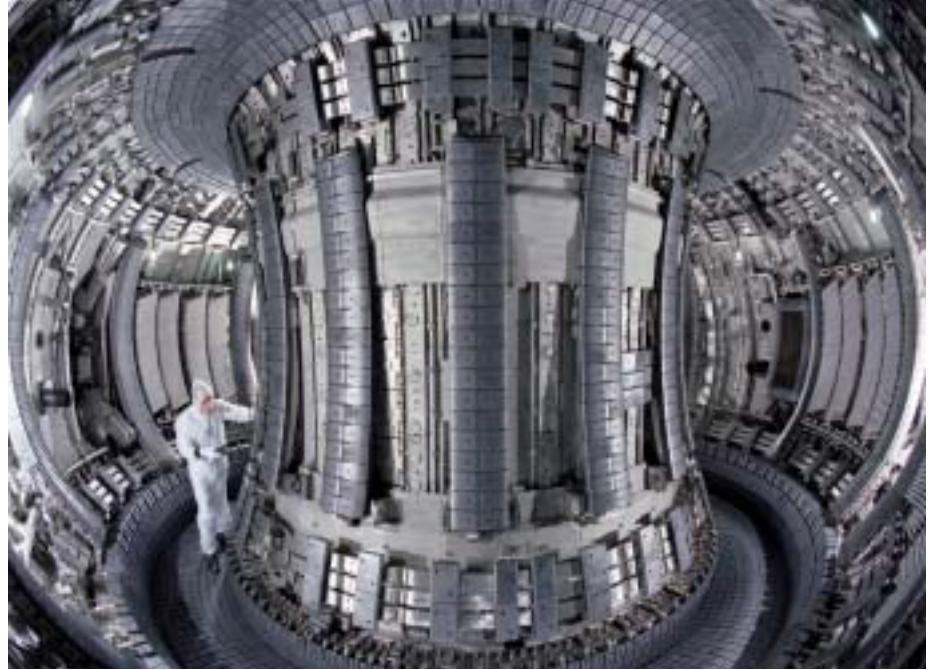


SEPTEMBER 1991: Rijnhuizen haalt de financiering binnen voor de bouw van een vrije-elektronenlaser, de FEM.



NOVEMBER 1991: Het eerste deuterium-tritium-plasma in een tokamak: JET wekt 2 megawatt op.

Reactievat JET na
het installeren van
een divertor



internationaal project. Japan, Amerika, Europa en de Sovjet-Unie kijken samen naar de ontwikkeling van een opvolger van JET. Intor (International Tokamak Reactor) zou een reactor op wereldschaal moeten worden. De Belgische fysicus Paul Vandenplas was bij het project betrokken. „Begin jaren tachtig bleek dat extra verhitting de opsluittijd niet verbeterde. Dat betekende dat de voorziene cijfers voor Intor volledig onjuist waren. Zo was toen nog het idee, dat een plasmastroom van 6 mega-ampère genoeg zou zijn voor een fusiereactor. Nu weten we dat dat minstens 15 mega-ampère moet zijn.”

De moeilijkheden met de verhitting lijken de doodsteek voor het fusie-onderzoek. De financiering loopt wereldwijd terug. Er is te weinig vertrouwen dat het fusie-onderzoek daadwerkelijk een fusiereactor op zal leveren. In Nederland laten de ministeries

voor Onderwijs en Wetenschappen en Economische Zaken de kamer in 1982 weten dat het fusiebudget de komende vier jaar zal worden bevroren, gezien ‘de lage prioriteit die kernfusie binnen het kader van energie-onderzoek heeft’.

Maar blijkbaar geldt ook voor fusie dat wanneer de nood het hoogst is, de redding nabij is. In 1982 komt er verrassend nieuws uit Duitsland. Bij verhittingsexperimenten op de tokamak Asdex is een manier gevonden om de opsluiting van het plasma met een factor twee te verbeteren. In deze H-mode (*high confinement*) sluit het plasma de warmte efficiënter op. Het was een welkome toevalstreffer. „Die H-mode gaf een enorme sprong”, vertelt Schüller. „Het nieuws werd met groot enthousiasme ontvangen.” Het jaar na de vondst van de H-mode is de opening van JET. Door zijn grootte breekt de tokamak records, maar ook hier lekt de

MAART 1992: De opdampinstallatie muco wordt ingezet voor experimenten met multilaag-spiegels, die extreem ultraviolet licht kunnen weerkaatsen.



1993: JET krijgt een divertor, waarmee de tokamak een hoger rendement haalt.

1992: De uitwerking van het concept van ITER begint. Vanwege de hoge kosten en politiek steekspel moet het ontwerp steeds worden bijgesteld. Uiteindelijk is het in 2001 klaar.



De controlekamer van JET in 1984

energie te snel weg. Een oplossing voor dit probleem was essentieel 'voor het wel-slagen van het project', zo staat in een evaluatierapport van het beheer van JET uit 1990.

Helaas was het ontwerp van JET niet geschikt om de machine zomaar 'in de H-mode' te laten draaien. De Duitse tokamak Asdex had een divertor. Deze 'magnetische uitlaat' is een speciaal daarvoor ontworpen deel van de wand waar de afgekoelde deeltjes uit het plasma naar worden afgevoerd. JET beschikte niet over

Links: het bedieningspaneel van de Nederlandse 2 mm-interferometer

Rechts: In 1997 wekt JET het recordvermogen van 16 megawatt op.



1993: Een beeldtentoonstelling in de tuin van Rijnhuizen trekt ruim 3000 bezoekers.



23 – 27 AUGUSTUS 1993: Rijnhuizen organiseert samen met de Universiteit Twente de 15th International Free Electron Laser Conference.

1993



De Amerikaanse tokamak TFTR

zo'n uitlaat. Daarom werd de machine in 1986 aangepast. Door de magneetvelden anders in te richten ontstond een provisorische divertor. Daarna waren de opsluittijden zo goed, dat in 1991 werd besloten om voor het eerst experimenten te doen met de fusiebrandstoffen deuterium en tritium. Tot dan toe was daar vanaf gezien, omdat de wand bij deze fusiereactie radioactief wordt. Dat maakt het werken met de reactor stukken lastiger. Maar nu was het tijd om te doen waar al sinds de jaren vijftig van werd gedroomd: onder gecontroleerde omstandigheden fusie op gang brengen.

Bij de eerste voorzichtige experimenten haalt JET een rendement van 33 procent: er gaat drie keer meer energie in dan er aan fusie-energie vrijkomt. Bij een uitbreidingsronde wordt onder meer een

echte divertor ingebouwd. Daardoor verdubbelt het rendement: JET wekt in 1997 een vermogen van 16 megawatt op met een rendement van 64 procent. Dat is nog altijd het grootste fusievermogen dat ooit is opgewekt.

Ook de Amerikaanse en Japanse tokamak draaien goed. Net als in JET wordt in de Amerikaanse tokamak TFTR met een mengsel van deuterium en tritium gewerkt. De Japanners slagen erin hun plasma zeer stabiel te maken. Ook nu nog houdt de JT-60 de duurrecords op het gebied van opsluiting. Directeur Aart Kleyn: „Die drie grote tokamaks werkten beter dan wie ook had durven dromen. Ze hebben een aantal grote wapenfeiten geproduceerd.” Volgens Kleyn hebben ze het beeld over fusie veranderd: „Het idee ‘fusie moet je stoppen, dat is een bodemloze put voor geld’ is



DECEMBER 1993: De Amerikaanse tokamak TFTR doet experimenten met een mengsel van 50 procent deuterium en 50 procent tritium, de brandstofmix voor commerciële fusiereactoren.



SEPTEMBER 1993: Rijnhuizen, Forschungszentrum Jülich en de Koninklijke Militaire School Brussel organiseren samen een zomerschool over plasmafysica voor promovendi. De Carolus Magnus Summer School is nu een tweejaarlijkse traditie.

langzamerhand vervangen door ‘jeempie, hier gebeurt het echt.’” Oorspronkelijk zou JET tot 1990 draaien, maar die datum bleek niet realistisch. „Het was gecompliceerd om echt tot reactoromstandigheden te komen”, vertelt Schüller. Hij was destijds in dienst bij JET. Zijn werk was op basis van experimenten te bepalen hoe JET het beste ingesteld kan worden. Dat kon niet vooraf worden berekend, maar moest in de praktijk worden geleerd. Na 1990 werden de experimenten in JET steeds verlengd met een paar jaar. De tokamak is nog altijd in gebruik en zal dat mogelijk blijven tot opvolger ITER start.

Vanaf 1983, als JET net draait, wordt er in Europa ook gewerkt aan de volgende stap: het ontwerp van de opvolger van JET, de Next European Torus (NET). In NET had het tritium-deuteriummengsel minstens 100 seconden moeten kunnen branden. Deze reactor was bedoeld om de technische betrouwbaarheid van een fusiereactor aan te tonen. Daarna zou de stap naar een echte demonstratiecentrale kunnen worden gezet, waarvoor al de toepasselijke naam DEMO is bedacht. De plannen zijn al in een vergevorderd stadium als de Russische partijleider Michail Gorbatsjov aan vs-president Ronald Reagan voorstelt om een gemeenschappelijk internationaal onderzoeksproject op te zetten. Zijn voorstel is om een tokamak te bouwen, als opvolger van de generatie JET, TFTR en JT-60. Europa, Japan en de Verenigde Staten zien daar wel wat in. Het is het prille begin van een van de grootste wetenschappelijke samenwerkingen ooit. ■

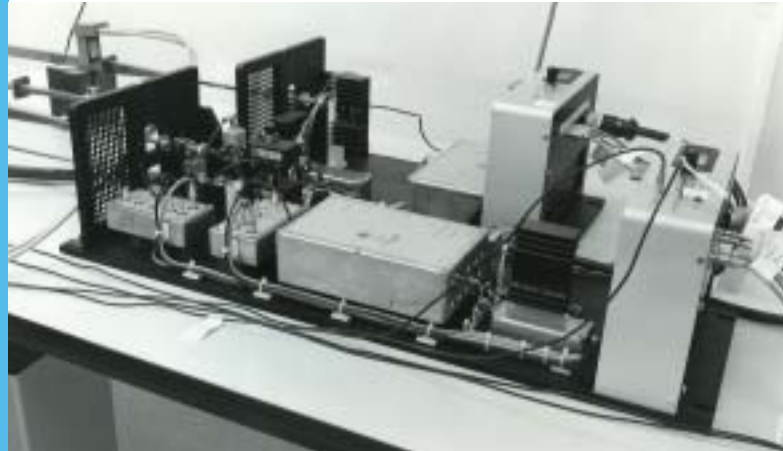
De eerste opdracht die Rijnhuizen van de Europese tokamak JET kreeg, was de bouw van een interferometer om de dichtheid van het plasma te meten. Microgolfspecialist Albert Hugenholtz en electronicus Anton Putter bouwden en installeerden het apparaat. Het was precies op tijd af voor de opening van JET.

Tegelijkertijd werd er op Rijnhuizen gewerkt aan een tweede apparaat voor JET dat de elektronentemperatuur kon meten. De elektronen die in de tokamak rondspinnen, zenden straling uit. Die straling is met een spectrometer op te vangen. De golflengte van die straling is een maat voor de elektronentemperatuur. Rijnhuizen had in die tijd samen met de Technische Universiteit Delft een methode bedacht, om met een rooster de straling in meerdere golflengten op te splitsen. Zo kon voor het eerst in één keer een profiel van het plasma worden gemeten. Omdat JET eiste dat alle apparatuur eerst op een andere tokamak was getest, bouwde het instituut eerst een 6-kanaals



1993

21 DECEMBER 1993: Staatssecretaris van Onderwijs Job Cohen opent Felix als internationale gebruikersfaciliteit: met één druk op de knop laat hij de laser ‘Felix’ graveren in een glasplaatje. De Engelse Science and Engineering Research Council (SERC) sluit een contract met Rijnhuizen; zij mogen Felix 20 procent van de tijd gebruiken.



De 2 mm-interferometer

variant, die de straling in zes golflengten splitste. Rijnhuizen had zelf geen grote tokamak in huis, dus gingen drie medewerkers naar Moskou om de apparatuur daar op de tokamak T-10 te testen. Het apparaat bleek succesvol, Rijnhuizen kreeg de opdracht om een 12-kanaals spectrometer voor JET te bouwen. Het prototype werd op Rijnhuizen zelf ingezet.

De derde grote opdracht voor een diagnostisch apparaat was een 12-kanaals reflectometer, voor het meten van het elektronendichtheidsprofiel. Rijnhuizen heeft aan deze – en andere – projecten een goede naam overgehouden op het gebied van diagnostiek. Ook voor de opvolger van JET, ITER, ontwerpt het instituut een diagnostisch systeem. ■

JANUARI 1994:

Begin van de bouw van de FEM-hal.

1994

1995

JULI 1995: In de kantine

protesteert het actiecomité

'Hou de Pauw' voor het behoud van de vogels op het terrein. Directeur Van der Wiel vindt de dieren vreselijk: „Ze schijten alles onder, maken krassen op de auto's en aan de telefoon vragen mensen: 'Wat is dat geluid, zit je in de jungle?'.” Bij zijn afscheid geeft hij geld om nieuwe pauwen te kopen.



Hoofdstuk 8 Verbreding



Staatsecretaris Cohen
opent Felix.

Uiterst rechts:
Het bedienings-
paneel van de vrije-
elektronenlaser Felix

Rechtsonder: Felix

Op 19 augustus 1991 is het feest in de kelder van Rijnhuizen. De twintig meter lange laser Felix produceert de eerste straling. Het instituut wint daarmee de wedstrijd wie in Europa de eerst werkende infrarood vrije-elektronenlaser heeft. De directe concurrent was een team in Parijs, vertelt oud-directeur Marnix van der Wiel: „Daar werkte een team goed ingevoerde versnellerfysici. Maar wij wonnen, terwijl we niets van versnellers afwisten. Het was een groot succes.”

De laser heeft zijn naam te danken aan de elektronen, die in het apparaat worden versneld tot bijna de lichtsnelheid. Deze vrije elektronen worden met magneetvelden zo gemanipuleerd, dat ze straling uitzenden: infrarood licht, in het geval van Felix. Wat vrije-elektronenlasers bijzonder maakt is hun instelbaarheid: de kleur van het licht is te veranderen. Dat is handig, omdat de materialen die met de laser worden onderzocht ieder op een andere kleur licht reageren. Felix is zo ontworpen dat het licht met één druk op de knop te veranderen is. Bij andere vrije-elektronenlasers kostte het vaak uren om een andere kleur in te stellen.

31 MEI 1996: Rijnhuizen, Forschungszentrum Jülich en het plasmafysicalaboratorium van de Belgische Koninklijke Militaire School sluiten het samenwerkingsverband TEC (Trilateral Euregio Cluster). De drie voeren gezamenlijk een onderzoeksprogramma uit op de Duitse tokamak Textor.

1996





Felix is vanaf het begin een internationaal succes. De laser wordt in 1993 door staatssecretaris Job Cohen officieel geopend als gebruikersfaciliteit. Het apparaat trekt onderzoekers uit allerlei disciplines naar Rijnhuizen. In 1998 krijgt het apparaat ook een interne gebruikersgroep, Moleculaire Dynamica. Zij gebruiken het infrarode licht van de laser om de structuur van moleculen te onderzoeken. Met kernfusie heeft dit allemaal niets te maken. De bouw van de laser is een trendbreuk met het verleden.

Halverwege de jaren tachtig, na bijna dertig jaar uitsluitend fusie-onderzoek, voerde het FOM-bestuur gesprekken met directeur Kees Braams over de toekomst van het instituut. „Fusie is een onder-



MEI 1997: Directeur Marnix van der Wiel stapt op. Chris Schüller volgt hem in juli op als interim-directeur.



1997: JET haalt het recordvermogen van 16 megawatt.

1997



Directeur Marnix van der Wiel



Fred Bijkerk (r) overlegt met een leverancier van vacuümtechnologie over het ontwerp van een nieuwe opdampinstallatie.

zoeksgebied dat grote beleidsmatige aan-uit-perioden heeft gekend. In die tijd bestond het gevoel dat fusie niet opschoot en dat het tijd was, dat het instituut een nieuwe wetenschappelijke uitdaging zou krijgen”, zegt Hans Chang, die van 1985 tot 2009 FOM-directeur was. De olieprijs zakte destijds naar het niveau van voor de oliecrises. Wereldwijd zakten de budgetten voor fusie mee. Technicus Bart de Groot: „Fusie ging naar een lager pitje, we hielden er zelf rekening mee dat we misschien wel helemaal over zouden moeten schakelen naar ander onderzoek.”

Begin 1986 besloot FOM dat 75 procent van het onderzoeksprogramma gericht bleef op fusie, maar dat het andere kwart werd ingezet voor nieuwe onderzoeklijnen. Braams was niet gelukkig met de verbreding. Hij trad af en ging vervroegd met pensioen. Zijn afscheid was het einde van een tijdperk. Natuurkundige Hendrik de Waard, voorzitter van het uitvoerend bestuur

van FOM, droeg samen met twaalf referenten Braams voor een koninklijke onderscheiding voor. Op 29 april 1987 werd de grondlegger van het Nederlands fusie-onderzoek benoemd tot Ridder in de Orde van de Nederlandse Leeuw.

De nieuwe directeur van Rijnhuizen is Marnix van der Wiel. Hij was voor zijn aanstelling groepsleider bij het FOM-Instituut voor Atoom en Molecuulfysica, Amolf, waar hij onderzoek deed naar de interactie van intense lasers met materie. „Ik was geen fusie-expert. FOM stelde daarom bij mijn benoeming als voorwaarde, dat ik een halfjaar naar JET zou gaan. Daar heb ik het jargon geleerd.”

Bij zijn komst vraagt Van der Wiel wie van de medewerkers van Rijnhuizen over zou willen stappen van fusie naar Felix. Fysicus Lex van der Meer meldt zich: „Ik vond het leuk om een nieuw vakgebied te verkennen.” Hij bouwt de laser met projectleider

OKTOBER 1997: De vrije-elektronenmaser FEM maakt de eerste microgolven.



1997



1998: Rijnhuizen richt de onderzoeksgroep Moleculaire Dynamica op: de groep krijgt 20 procent van de gebruikerstijd van de vrije-elektronenlaser Felix.

1998



Spiegel voor extreem ultraviolet licht

Wim van Amersfoort, die net als Van der Wiel van Amolf kwam, Rijnhuizencollega Dick Oepts, Kees van der Geer en een groep technici.

De vrije-elektronenlaser Felix vormt het speerpunt van het nieuwe onderzoek op Rijnhuizen. Maar er kwam nog een tweede lijn bij. Van der Wiel had in zijn tijd bij Amolf samen met andere Amsterdamse onderzoeksinstituten het Laser Applicatie en Informatie Centrum Amsterdam (Laica) opgericht. Het doel van Laica was om de industrie met het onderzoek te bereiken. Een van de thema's was lithografie met röntgenstraling. De onderzoeker die daaraan werkte, Fred Bijkerk, kwam met Van der Wiel mee naar Rijnhuizen.

Bijkerk krijgt de kans het onderzoek uit te breiden: „Het begon met wat middelen vanuit de industrie en een project van Technologiestichting srw.” Hij richt het onderzoek op extreem ultra-



Meerlaags-depositiemachine ADC: hierin worden de spiegels laag voor laag opgedampt, elke laag slechts enkele atomen dik.

violet-lithografie – lithografie met licht dat aan de optische kant van röntgenstraling zit. De halfgeleiderindustrie begint in het begin van de jaren negentig net te denken aan de ontwikkeling van een toekomstige generatie chipmachines, die met extreem ultraviolet licht werkt. Met dit kortgolvlige licht zouden dunnere lijnen op een chip kunnen worden geschreven dan met 'gewoon' licht, wat chips sneller maakt en de opslagcapaciteit groter.

Bijkerks groep ontwikkelt onder meer de optica die voor EUV-lithografie nodig is. De halfgeleiderindustrie toont interesse in de EUV-spiegels van de groep. Gewone spiegels zijn ongeschikt voor extreem ultraviolet licht. Door om en om een groot aantal dunne metaallagen op een gekromd oppervlak te dampen, ontstaan spiegels die deze kleur licht wél aankunnen.

De eerste voorzichtige belangstelling van chipmachinefabrikant ASML en optiekmaker Carl Zeiss groeit uit tot een intensieve

18 SEPTEMBER 1998: VVD-europarlementariër Elly Plooij-van Gorsel geeft het laatste schot van Rijnhuizentokamak RTP. In haar toespraak pleit Plooij voor een 'realistisch debat over fusie'.



1 AUGUSTUS 1998: Lenzenfabrikant Carl Zeiss en Rijnhuizen tekenen een overeenkomst voor onderzoek aan spiegels voor extreem ultraviolet licht voor chipmachinefabrikant ASML.



De FEM in aanbouw (l) en de drukvaten voor de opstelling (r)



samenwerking. In 1998 tekenden Rijnhuizen en Zeiss een groot contract voor de verdere ontwikkeling van de technologie. ASML installeerde in 2006 zijn eerste EUV-machines bij klanten. Daarin zitten spiegels die uit de samenwerking van Zeiss en Rijnhuizen zijn voortgevloeid: Zeiss levert de fijngeslepen substraten voor de spiegels, die met Rijnhuizen-technologie van hun coating worden voorzien. De spiegels weerkaatsen tot 70,2 procent van het licht – Rijnhuizen is daarmee wereldrecordhouder. Bijkerk: „De allereerste spiegels haalden 60 procent reflectie. Nu zitten we



1998

OKTOBER 1998: Amerika maakt bekend dat het land uit de ITER-samenwerking stapt.

SEPTEMBER 1998: De oude linde voor het kasteel sneuvelt. De ruim 300 jaar oude boom is vermoedelijk vlak na de bouw van Rijnhuizen geplant.



dicht bij de bovengrens, het theoretisch maximum is 74 procent. We richten ons onderzoek nu op het verbeteren van de levensduur van de spiegels.” Voor dit onderzoek gebruikt zijn groep de opstelling Pilot-PSI, die ook voor fusie-onderzoek wordt gebruikt. Hierin kunnen de spiegels aan intense ionenbundels worden blootgesteld. Zo kan de ‘slijtvastheid’ worden getest. De spiegels moeten bestand zijn tegen het zeer intense licht in de chipmachines, waarin ook ionen zitten. Daarnaast zullen de spiegels in de machines warm worden, waardoor de laagjes waaruit ze zijn opgebouwd dreigen te vermengen. Er zullen nieuwe tussenlagen moeten worden toegevoegd om dit vermengen te voorkomen.

Bijkerks onderzoek is in 25 jaar uitgegroeid tot een zelfstandige afdeling van het instituut; de onderzoeksafdeling nanolayer Surface and Interface Physics (nSI) bestaat tegenwoordig uit dertig mensen. Maar het heeft volgens Bijkerk wel een paar jaar geduurd voordat hij op Rijnhuizen zijn plek had gevonden. „Een deel van de fusie-onderzoekers had er best moeite mee dat er iets nieuws geïntroduceerd werd”, vertelt Bijkerk.

In de jaren na de verbreding zijn er twee Rijnhuizen: een fusielaboratorium en een niet-fusielaboratorium. Er is nog niet zoveel kruisbestuiving tussen het fusie-onderzoek en de ‘importfysica uit Amsterdam’, zoals de nieuwe onderzoekslijnen in het personeelsblad *Interkom* werden genoemd. Dit was ook voor directeur Van der Wiel reden om te werken aan een nieuw experiment, dat een brug slaat tussen nieuw en oud: „Ik wilde een project dat fusie en Felix verbond.” Het werd de FEM – een vrije elektronenmaser. Een variant op de vrije-elektronenlaser, waarbij een maser

in plaats van licht microgolven uitzendt. Microgolven zijn een belangrijke verhittingsbron voor de plasma’s van de fusiefysici. Zo kon de link tussen de afdelingen worden gelegd: de FEM zou een verhittingsbron vormen voor de Rijnhuizentokamak RTP. Met verstembare microgolven zouden groeiende instabiliteiten in het plasma onschadelijk kunnen worden gemaakt.

Het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen en Euratom verklaarden in 1991 bereid te zijn de 12 miljoen gulden te financieren die het instituut nog nodig had. De bouw kon beginnen. In de jaren daarna zal blijken, dat het instituut zich sterk heeft verkeken op dit project. Tegen de tijd dat de FEM klaar is, is RTP alweer afgebroken.

Van der Wiel herinnert zich hoe in 1994 de metershoge drukvaten het laboratorium werden binnengetakeld: „Als je het concept op papier tekent, is het een overzichtelijk plaatje. Maar toen ik die tank zag, met die grote hijskranen, dacht ik: Mijn hemel, waar zijn we aan begonnen.” De hoge spanning, twee megavolt, die minuten lang in stand moest blijven, het drukvat, waardoor je de apparatuur moeilijk kon bereiken: het is een gecompliceerd project. Volgens technicus Paul Smeets is onderschat hoe moeilijk het was: „Er is hard aan gewerkt, maar met te weinig mankracht. We hebben avonden gewerkt, zaterdagdagen gewerkt, zondagen gewerkt. Nu droom ik er niet meer over, maar dat heb ik wel gedaan. Maar uiteindelijk werkte het ding.”

De FEM maakt in 1997 de eerste microgolven, maar zit nog vol kinderziekten. De machine zou secondenlang moeten kunnen draaien, maar het blijft bij fracties van een seconde. Steeds gaat

1999



1 JANUARI 1999:
Hans Schreuder
volgt Chris Schüller op als interim-
directeur van Rijnhuizen.

JUNI 1999: De Trilateral Euregio Cluster organiseert de 26th Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics in Maastricht.

JUNI 1999: De première van de Fusion Road Show, een educatieve show over energie en fusie.





Gerard Meijer
in het laboratorium

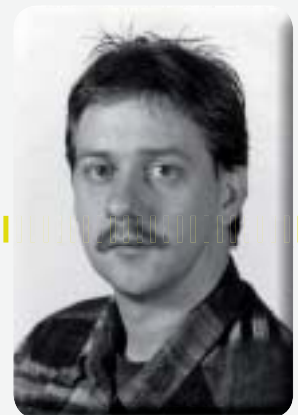
er wat stuk en moeten er onderdelen worden vervangen. Datzelfde jaar stapt Van der Wiel op na een ruzie met het FOM-bestuur. FOM gaat op zoek naar een nieuwe directeur. Na twee interim-directeuren wordt Gerard Meijer aangenomen, hoogleraar molecuul- en laserfysica in Nijmegen. Hij kent Rijnhuizen, hij komt er regelmatig als gebruiker van Felix. Meijer begint op 1 januari 2000. Een van zijn eerste beslissingen is om te stoppen met FEM. „Het was geen slecht moment. Het instituut had tegen die tijd laten zien dat het principe werkt, maar het project kostte te veel geld en mankracht. De wetenschappelijke opbrengst was niet in verhouding”, vertelt Meijer. In 2001 wordt het project afgerond. Met de aanstelling van Meijer zet FOM de lijn van de verbre-

ding verder door. Net als Van der Wiel is Meijer geen fusieman. En ook hij brengt een nieuwe onderzoekslijn mee: koude moleculen. Sommige neutrale moleculen kunnen met elektrische velden worden afgekoeld, tot ze zo weinig energie over hebben dat ze bijna stilstaan. Zo kunnen hun eigenschappen beter worden bestudeerd dan bij hoge temperaturen. Voor het fusie-onderzoek op het instituut breken een paar moeilijke jaren aan. Internationaal wordt er eindeloos vergaderd over ITER, de internationale opvolger van de Europese tokamak JET, maar er zit weinig schot in de zaak. De tokamak van Rijnhuizen, RTP, werd te klein en is in 1998 gestopt. Het instituut werkt vanaf 1996 in een drielandenverband met Duitsland en België aan de tokamak Textor in Jülich. Dat project loopt goed, maar het betekent ook een aderlating voor het fusie-onderzoek dat achtergebleven is in Nieuwegein. Apparatuur en collega's: een groot deel is naar Duitsland verdwenen. In 2000, vlak nadat Meijer is aangesteld, blijkt dat Rijnhuizen er niet in is geslaagd het fusie-onderzoek voldoende te promoten. FOM schroeft het budget voor fusie flink terug: in het strategisch plan 2001-2006 krijgt het fusie-onderzoek een dubbele min. 'De mindere zichtbaarheid van de resultaten van het Nederlandse werk op dit terrein en de geringere aantrekkingskracht op excellerende jonge Nederlandse onderzoekers

De FEM wordt in het drukvat geduwd.



1 JANUARI 2000: Gerard Meijer wordt directeur van Rijnhuizen. Hij brengt zijn onderzoek naar het afkoelen van neutrale moleculen mee uit Nijmegen.



2000

Fusion Road Show

„Iemand een idee? Wat heb je nodig om een heet plasma op te sluiten? Wat hoor ik daar, een vat? Goed idee, een vat.” Wetenschapsvoorlichter Erik Min bouwt een fusie-reactor, samen met zijn publiek in het auditorium van de Technische Universiteit Eindhoven. Hij heeft net in een wat beangstigende presentatie laten zien hoeveel



mensen er op aarde bijkomen en hoeveel energie al die mensen over vijftig jaar zullen verstoken. Nu is hij overgestapt naar fusie, als mogelijk alternatief voor fossiele brandstof-

bedacht. Al snel zijn er ook voorstellingen op conferenties, in musea en op universiteiten.

In december 2003 bezoekt minister Maria van der Hoeven het Forschungszentrum Jülich, waar Rijnhuizen ook onderzoek doet. Directeur Aart Kleyn: „We hadden besloten de Fusion Road Show voor haar op te voeren. De Duitsers hadden hun twijfels, die vonden het geen gepaste ontvangst voor een minister.” Maar gelukkig waardeerde Van der Hoeven het zeer: zozeer dat ze vraagt of de show ook Den Haag een keer wil aandoen, zodat collega's, ambtenaren en kamerleden hem ook kunnen zien. De heldere boodschap in zijn aantrekkelijke jasje had zijn weg naar de politiek gevonden. ■



fen. Samen met collega Mark Westra leidt hij het publiek binnen in de wereld van de fusiefysicus – wat komt er kijken bij de bouw van een fusiereactor. Min illustreert zijn verhaal met snelle proefjes. Dit is dan ook geen gewone lezing, dit is de Fusion Road Show – een mix van theater en wetenschap.

De Fusion Road Show is het geesteskind van fusiefysicus Niek Lopes Cardozo, voormalig hoofd fusie-onderzoek op Rijnhuizen. Hij bedacht de show in 1999. „Het instituut was toen een tijd lang te weinig met fusie naar buiten getreden.” De fusiefysici hadden wel



veel internationale contacten, maar de uitstraling in eigen land was beperkt. Nu is Lopes Cardozo goed in goochelen en gek op toneel. Dat bracht hem op het idee om een theater-show te ontwikkelen over fusie. Oorspronkelijk was de show bedoeld voor scholieren, maar de impact was veel groter dan vooraf



Minister Van der Hoeven bezoekt Textor.



Apparatuur voor het afremmen van neutrale moleculen

liggen aan dit besluit ten grondslag', zo staat in het strategisch plan. De dubbele min betekent dat er minder geld naar het fusie-onderzoek op Rijnhuizen gaat, het budget voor fusie wordt gehalveerd. Er volgt een reorganisatie, waarbij niet iedereen zijn baan kan houden. Een aantal onderzoekers moet overstappen naar de andere FOM-instituten, anderen gaan vervroegd met pensioen. „Het was een onrustige tijd, een zwarte bladzijde in de jaren van Rijnhuizen”, aldus Smeets. „Het was een kras, een deuk, en het heeft lang geduurd voor de sfeer weer goed was.”

De vrije-elektronenmaser FEM werd gestopt, de theoriegroep werd verkleind, gesplitst en ondergebracht bij de experimenten.

Het werk in Duitsland, bij Textor, ging wel door. Ook werd besloten om in Nieuwegein een nieuw onderzoeksprogramma op het gebied van fusie te starten: het nieuwe thema werd de interactie tussen het plasma en de wand.

Het idee om hiermee te beginnen, kwam van fysicus Niek Lopes Cardozo. „Ik stelde het voor tijdens een brainstorm over de toekomst van het instituut en ik werd levend gevild. Het was namelijk andere fysica dan wat we tot dan toe deden. Hete-plasma-fysica is een heel zuiver soort fysica, je hebt alleen te maken met ionen en elektronen zonder al te veel interactie. Wat ik voorstelde was anders, ik wilde kijken naar de koude wand. Hoewel, koud,

2000

2000: Begin van de bouw van Pilot-PSI, een experiment om de interactie tussen materialen en plasma te bestuderen.

19 MEI 2000: Inauguratie van de FOM-diagnostieken en het ECRH-verhittingsstelsel op de tokamak Textor in Jülich.





Pilot-PSI, de proefopstelling voor materialenonderzoek

dan heb je het nog altijd over 10.000 graden. Daar gaat het over moleculen, chemie, de diagnostiek is ook anders.”

Het plan doorstond de kritiek. Een belangrijk argument was dat materiaalonderzoek als voordeel had dat het ook voor andere vakgebieden interessant was. Het bood de mogelijkheid elders geld te zoeken, mocht fusie stoppen. Ook FOM vond het verstandig op deze lijn in te zetten.

Rijnhuizen begint in 2000 met een proefopstelling, Pilot-PSI (Plasma Surface Interaction). Lopes Cardozo mag zijn idee zelf uitwerken: hij wordt in 2001 hoofd fusie-onderzoek en blijft dat tot hij in 2009 Rijnhuizen verlaat voor de Technische Universiteit Eindhoven.



Terwijl fusie het rond de millenniumwisseling moeilijk heeft, loopt het andere onderzoek op Rijnhuizen goed. De infrarood-laser Felix is zo'n succes, dat directeur Meijer besluit om een grote nwo-subsidie aan te vragen om de laser verder uit te breiden. Felix krijgt een zusje, kopt het personeelsblad. Ze heet Felice: de Free Electron Laser for Intra-Cavity Experiments. Bij de laserlijn van Felix wordt slechts een fractie van het geproduceerde laserlicht gebruikt. Felice is zo ontworpen dat de volle intensiteit van het licht wordt benut. In de praktijk betekent dat, dat het licht dertig keer intenser is dan in Felix. Daarmee kan nieuw materialenonderzoek worden gedaan.

Felice opent in 2007. Meijer maakt het zelf niet meer mee. Net nadat hij de financiering rond heeft, maakt hij zijn vertrek bekend. Hij wordt directeur bij het Fritz Haber-Instituut, een van

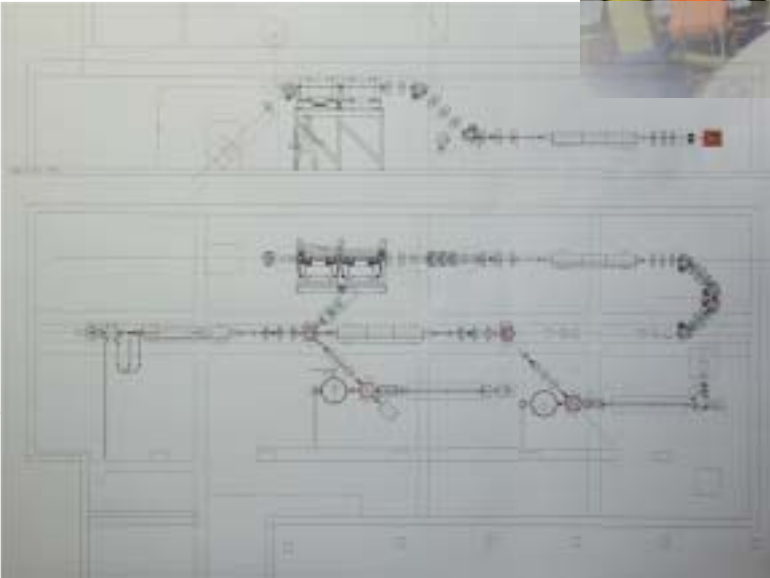


2001

10 MEI 2001: De groep Koude Moleculen haalt zijn tweede *Nature*-publicatie in een jaar tijd. De fysici hebben neutrale moleculen afgeremd en in een opslagring opgesloten.



De laser Felix wordt in 2007 uitgebreid met 'zijn zusje' Felice.



JULI 2001: Het ontwerp voor ITER is klaar.



APRIL 2002: NWO zegt financiering toe voor de bouw van Felice, de uitbreiding van de vrije-elektronenlaser Felix. Ook FOM stelt extra geld beschikbaar.

2 APRIL 2002: Het begin van de afbraak van de vrije-elektronenmaser FEM. De FEM heeft het gedaan, maar het oorspronkelijke doel de tokamak RTP ermee te verhitten, is niet bereikt.



De opdam-
installatie MUCO

de laboratoria van de prestigieuze Max Planck Gesellschaft. Zijn onderzoekslijn, koude moleculen, verhuist met hem mee naar Berlijn. De koude moleculen-groep sluit een vruchtbare tijd af in Nieuwegein. Ze zijn er als eerste in geslaagd met een elektro-statisch veld neutrale moleculen af te koelen en op te sluiten. Daarmee ontsluiten ze een nieuw vakgebied: de getemde moleculen zijn zo veel beter te bestuderen dan wanneer ze 'warm' zijn en met grote snelheden bewegen. Een jaar later weet de groep de koude moleculen ook in een opslagring te vangen. De kunststukken leveren twee publicaties in het toptijdschrift *Nature* op. Het aanbod van de Max Planck Gesellschaft komt al snel na zijn aantreden bij Rijnhuizen, maar Meijer neemt de baan toch aan: „Je kunt hier niet voor solliciteren, je wordt gevraagd. Zo'n kans komt maar één keer.”

Aart Kleyn neemt in 2003 het roer van Meijer over. Hij is hoogleraar scheikunde in Leiden. Zijn expertise, oppervlaktechemie, sluit goed aan bij de nieuwe onderzoekslijn naar plasma-wand-interactie. Onder Kleyns leiding wordt Magnum-PSI gebouwd, de opvolger van Pilot-PSI. Met deze metersgrote opstelling zal worden onderzocht welke materialen het best geschikt zijn om in een fusiereactor te gebruiken.

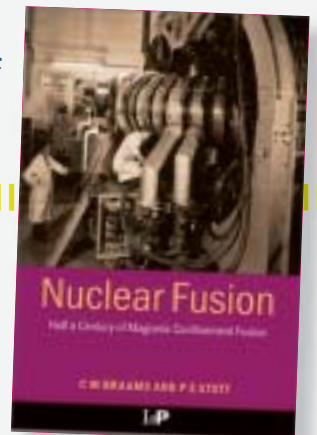
Aart Kleyn heeft ook tot taak om de uitstraling van het fusie-onderzoek van Rijnhuizen te verbeteren. Die is achtergebleven bij de andere onderzoekslijnen. De Volkskrant spreekt in een artikel over het afscheid van Meijer zelfs over 'Rijnhuizen, het voormalig kernfusiecentrum'. Wanneer in 2005 wordt besloten dat de internationale fusiereactor ITER in Frankrijk zal worden gebouwd, breken ook voor het fusie-onderzoek weer betere tijden aan. ■



De roestvrijstalen kap van de FEM krijgt een tweede leven als kunstwerk in de tuin.



12 DECEMBER 2002: Oud-directeur Kees Braams en de Engelse fusiefysicus Peter Stott presenteren hun boek *Nuclear Fusion, Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research*.



Hoofdstuk 9

De lange weg naar ITER



In 1985 ontmoet de Russische partijleider Michail Gorbatsjov de Amerikaanse president Ronald Reagan in Genève. De verhouding tussen de Verenigde Staten en de Sovjet-Unie is na jaren ijzige koude oorlog wat aan het ontdooien. De twee spreken over het afbouwen van het kernwapenarsenaal. Maar Gorbatsjov doet tijdens de ontmoeting ook een voorstel om een internationaal onderzoeksproject op te zetten: de bouw van een internationale fusiereactor. De Amerikanen zien hier wel wat in. De vs, de Sovjet-Unie, Japan en de Europese Unie starten drie jaar later met het ontwerpen van een grote fusiereactor. Hij krijgt de naam ITER, wat in het Latijn 'de weg' betekent. Niemand weet dan nog, wat voor lange weg er nog is te gaan voor de bouw van ITER start.



2003

23 MEI 2003: Aart Kleyn volgt Gerard Meijer op als directeur.



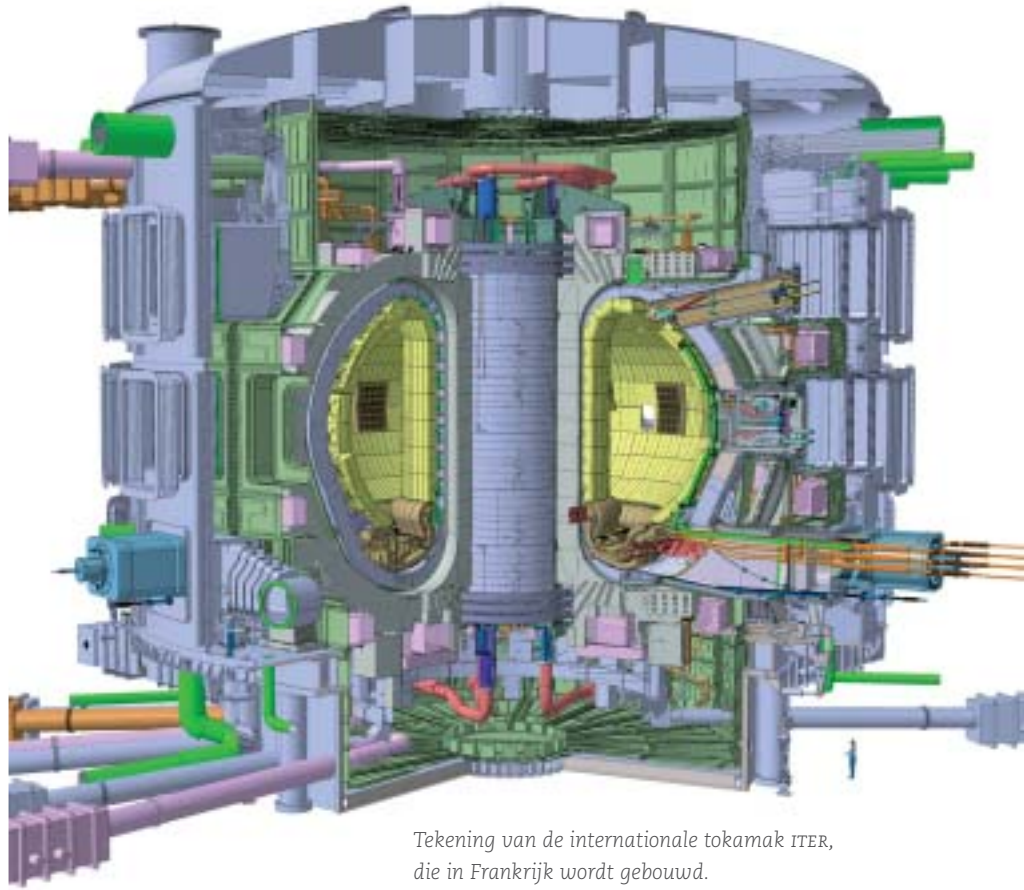
FEBRUARI 2003: Amerika keert op zijn schreden terug en sluit zich aan bij ITER. Ook China en Zuid-Korea sluiten zich in 2003 aan.





Het conceptuele ontwerp voor ITER is eind 1990 af. De tokamak zal een flinke slag groter zijn dan JET, de grootste tokamak van dat moment. Met ITER willen de deelnemende landen voor het eerst een fusie-reactie op gang brengen die meer energie opbrengt dan het kost om de reactie op gang te brengen. Maar liefst 1,5 gigawatt vermogen moet er worden opgewekt, net zoveel als het vermogen van toekomstige kolencentrales. Bovendien moet ITER minstens een kwartier achtereen kunnen branden, om zo de robuustheid van de reactor aan te tonen. De geschatte kosten zijn 6,5 miljard dollar. Twee jaar later tekenen de vier deelnemers een contract voor de ontwikkeling. Dan is de planning nog dat in 1998 wordt gekozen waar de tokamak komt en dat ITER in 2005 klaar zal zijn.

Tijdens het ontwerp is iedereen nog enthousiast, maar als er een paar jaar later over de bouw besloten moet worden, dreigt de samenwerking te mislukken. De Verenigde Staten twijfelen: de fusiewetenschappers daar vrezen dat al het onderzoeksgeld straks aan ITER op zal



Tekening van de internationale tokamak ITER, die in Frankrijk wordt gebouwd.

7 – 9 JUNI 2003: In het pinksterweekend is de expositie Rijnhuizen Uitgebeeld: dertig kunstenaars presenteren hun werk in het kasteel en in de tuin van het kasteel. Het evenement vindt sindsdien om de drie jaar plaats.



gaan en dat er weinig overblijft voor eigen werk. In Japan gaat het economisch slecht, dus het land heeft geen haast met deze mega-investering. Om de kosten te verlagen, beslissen de ITER-landen om het ontwerp aan te passen. De uitgekilde ITER moet nog steeds netto energie opwekken, maar het vermogen wordt gehalveerd tot 750 megawatt. 'Voor het fundamentele plasma-onderzoek, zoals wij dat hier doen, is er niet zoveel verloren met een wat kleinere reactor', zo reageert Rijnhuizendirecteur Chris

Schüller in de Volkskrant van 25 juli 1998. 'ITER-lite levert fors in op technologie-onderzoek. En juist dat aspect stond al op achterstand, in vergelijking met de wetenschap'.

Ook de politiek begint te twijfelen aan de toekomst van fusie. In 1997 besluit het Europees Parlement om het onderzoeksbudget van Euratom met 10 procent te verlagen. Dit geld wordt gereserveerd voor onderzoek naar andere alternatieve energiebronnen als zon, wind en biomassa. De liberale fractie steunt de verlaging. vvd-Europarlementariër Elly Plooijs-Van Gorsel legt in een interview met NRC Handelsblad op 18 december 1997 uit waarom: 'Kernfusie zal mogelijk pas over vijftig jaar een bruikbare toepassing vinden. We hebben dringend behoefte aan andere mogelijkheden voor een schonere energievoorziening op de korte termijn, ook om het broeikasprobleem aan te pakken'.

In 1998 nodigt Rijnhuizen Plooijs-Van Gorsel uit voor de sluitingsceremonie van de huistokamak RTP. De machine is na ruim tien jaar trouwe dienst te klein geworden. In haar toespraak spreekt de europarlementariër over de onzekere toekomst van fusie. 'Politici vragen zich af of de bouw van ITER ervoor zal zorgen dat fusie-energie binnen een redelijke termijn



vvd-europarlementariër Elly Plooijs-Van Gorsel start het laatste plasma van de tokamak RTP.

NOVEMBER 2003: De apparatuur van de groep Koude Moleculen verhuist naar Berlijn.

2003





De bouw van fusiereactor ITER is een organisatorisch hoogstandje. Er moeten duizenden onderdelen ontworpen en gemaakt worden. Hiervoor schrijft de ITER-organisatie tenders uit, waarbij bedrijven kunnen meedingen naar opdrachten. Dit biedt kansen aan Nederlandse technologiebedrijven, maar dan moeten zij wel de weg naar ITER weten te vinden. Om de bedrijven daarbij te helpen is in 2006 ITER-NL opgericht, door Niek Lopes Cardozo, destijds hoofd fusie van Rijnhuizen, TNO en het nucleair onderzoeksinstituut NRG. Het samenwerkingsverband heeft als doel om de Nederlandse industrie te helpen bij deelname aan ITER. ITER-NL betreft technologiebedrijven onder meer bij de bouw van een diagnostisch instrument en een microgolfsysteem voor ITER. De industrie kan er ook aankloppen voor informatie over fusietechnologie en begeleiding. ■

commercieel geëxploiteerd kan worden. Met andere woorden, hebben we het fusie-onderzoek wel nodig als we naar de huidige en toekomstige situatie op de energiemarkt kijken, nu duidelijk is dat fusie nog een aantal generaties nodig heeft?'

Elf jaar later staat Plooij-Van Gorsel nog steeds achter die toespraak. Ze benadrukt nooit om principiële redenen tegen fusie te zijn geweest. Volgens haar was het probleem destijds dat de financiering van het fusie-onderzoek te lange tijd vanzelfsprekend was. „Er was nooit debat over. De fusie-experts zeiden ‘het is een goed idee’ en de rest had er geen verstand van. In 1999 had de Europese Unie acht miljard euro uitgegeven aan fusie, terwijl er nog nooit één watt aan elektriciteit was uitgekomen. Dan word je als politicus toch heen en weer geslingerd? Het moet wel economisch rendabel zijn, op den duur.”

Wanneer de Amerikanen in 1998 ook nog besluiten zich terug te trekken uit ITER, is er van Gorbatsjovs droom van een wereldwijde samenwerking op het gebied van fusie weinig over. „Toen was echt de vraag of ITER nog wel door zou gaan”, vertelt instituutmanager Noud Oomens.

In Nederland moet Rijnhuizen een groot deel van het FOM-budget voor fusie-onderzoek inleveren. In vier jaar tijd wordt het bedrag gehalveerd: nu ITER hoogst onzeker is, zet FOM zijn geld liever op andere onderzoeksgebieden in. Helemaal gestopt wordt het fusie-onderzoek echter niet – FOM houdt er rekening mee dat ITER alsnog zou kunnen doorgaan. Fysicus Niek Lopes Cardozo zet de nieuwe onderzoekslijn op naar de interactie tussen plasma en wand. Hiermee wedt Rijnhuizen vooralsnog op twee paarden: als



NOVEMBER 2003: Europa kiest het Franse Cadarache als Europese kandidaat voor de ITER-lokatie, ten koste van Spanje.

4 DECEMBER 2003: Minister Maria van der Hoeven bezoekt Textor, de tokamak in Jülich waar Rijnhuizen onderzoek uitvoert.



Cadarache:
de bouwplaats van
de internationale
tokamak ITER

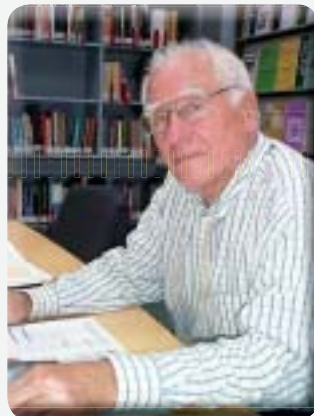


ITER doorgaat, zal dat onderzoek broodnodig zijn. Zo niet, dan kan het onderzoek in een andere richting worden omgebogen. Maar de overgebleven partijen zijn niet van plan om ITER zomaar op te geven. In Europa maakt de Belgische Eurocommissaris voor Onderzoek Philip Busquin zich hard voor fusie. Hij weet de zaak weer vlot te trekken. Na wat aanpassingen ligt er in 2001 weer een nieuw ontwerp, dit keer voor een fusiereactor van 500 megawatt voor een bedrag van vijf miljard euro. ITER krijgt ook de steun van Sir David King, de topadviseur van de Engelse regering op het gebied van wetenschap. Hij ziet de ernst in van klimaatverande-

ring en adviseert Tony Blair om zich in te zetten voor alternatieve energiebronnen. Rijnhuizendirecteur Aart Kleyn vertelt dat King eerst geen hoge pet ophad van fusie: „Hij vertelde me dat hij eind jaren negentig naar JET ging kijken met de gedachte ‘nú gaan we er een streep onder zetten’. Maar toen hij daar was, was hij stomverbaasd over wat er allemaal was bereikt, wat er mogelijk was gemaakt. Hij was om.”

King brengt met een groep experts in november 2001 een advies uit voor een versneld traject naar commerciële fusie. In dat rapport schrijft hij dat ITER een essentiële stap is in de ontwikkeling

29 JULI 2003: De nestor van het Nederlands fusie-onderzoek, oud-directeur Kees Braams, overlijdt.



2003

SEPTEMBER 2003:

Opticafabrikant Zeiss bouwt een multilaagsdepositie-faciliteit voor de ontwikkelafdeling in Oberkochen naar ontwerp van Rijnhuizen.



van fusiereactors, dat de bouw zo snel mogelijk moet beginnen en dat Europa hierin de leiding zou moeten nemen.

Wanneer het ontwerp af is, begint de discussie in welk land de reactor zal worden gebouwd. Een groep Canadese ondernemers, die zich in de ontwerpfase heeft aangesloten bij het ITER-project, biedt als eerste een locatie aan in Ontario. Daarna volgen Frankrijk, Spanje en Japan.

In 2003 besluiten ook de Amerikanen om weer mee te doen. De herziene ITER is goedkoper dan de variant waar ze in 1998 uit zijn gestapt. Bovendien geeft de regering Bush weer wat meer steun voor fusie-onderzoek. Ook China en Zuid-Korea stappen in 2003 in.

Net als bij JET ontstaat er een eindeloos diplomatiek steekspel over welk land de grote reactor mag hebben. De bouw van ITER kost 5 miljard euro, voor de exploitatie is eenzelfde bedrag uitgetrokken. Een miljardenproject dus, dat werkgelegenheid en prestige oplevert – ITER is te veel waard om níet voor te vechten. Het kost Europa alleen al maanden om te kiezen welk van de twee Europese locaties de officiële tegenkandidaat wordt van Japan. Uiteindelijk kiest Brussel in november 2003 voor Frankrijk. 'Op 4 december hakken de wetenschapsministers van de ITER-partners in Wenen de knoop definitief door', zo schrijft *de Volkskrant* dan nog optimistisch.

Het mag niet zo zijn. In december is wél duidelijk dat het Canadese bod het niet zal redden – het bedrijvenconsortium dat het bod heeft uitgebracht, krijgt te weinig steun van de Canadese overheid om te kunnen concurreren met Europa en Japan. Het

land stapt uit de onderhandelingen en uit ITER. Maar het gesprek over de keuze tussen Japan en Frankrijk eindigt in een patstelling: de vs en Zuid-Korea steunen Japan, China en Rusland staan achter Europa.

De onderhandelingen krijgen de maanden daarna de trekken van een pokerspel. Japan verhoogt zijn bod, Europa gaat mee. Geen van twee wijkt – de onderhandelingen zitten muurvast. Nederland heeft als klein Europees fusieland niet zoveel in te brengen in deze titanenstrijd, maar onderwijsminister Maria van der Hoeven speelt wel een belangrijke rol. Als Nederland op 1 juli 2004 voorzitter wordt van de Europese Unie, is Van der Hoeven vast van plan de stoeve onderhandelingen op gang te helpen. Lopes Cardozo, dan hoofd fusie op Rijnhuizen, is een van haar adviseurs. Van der Hoeven werkt samen met EU-commissaris voor Onderzoek Janez Potočnik een plan uit, dat het aantrekkelijker maakt om op te geven. Het land dat zich terugtrekt krijgt extra opdrachten, mag bovengemiddeld veel medewerkers én de directeur-generaal leveren. Voordat de details zijn uitgewerkt is het juni 2005. Europa trekt aan het langste eind, maar betaalt daar stevig voor. Japan verlaat als eervol 'verliezer' met een goed gevulde orderportefeuille de onderhandelingstafel. Twintig jaar na de ontmoeting van Gorbatsjov en Reagan is de overeenkomst voor de bouw van ITER eindelijk getekend. De reactor komt in Cadarache, in Zuid-Frankrijk.

De wetenschappers hebben het politieke spel knarsetandend aangezien. Fusie had al de naam een eeuwige belofte te zijn. Dat is er door de trage besluitvorming over ITER niet beter op

DECEMBER 2003:
Canada trekt zich terug uit ITER.



2004

AUGUSTUS 2004: Magnetohydrodynamics (MHD) is de theorie die plasma beschrijft als een gemagnetiseerde vloeistof. Rijnhuizen theoreticus Hans Goedbloed heeft een groot deel van zijn loopbaan aan deze theorie gewerkt. Samen met oud-Rijnhuizen-medewerker Stefaan Poedts publiceert hij het studieboek *Principles of Magnetohydrodynamics*.



In 2006 tekenden de zeven partners in het Elysée in Parijs het ITER-verdrag.

geworden. Volgens oud-FOM-directeur Hans Chang heeft Europa de vertraging grotendeels aan zichzelf te wijten: „Europa heeft zichzelf verschrikkelijk in de vingers gesneden door verdeeld te zijn over wat het in de onderhandelingen met Japan en de Verenigde Staten moest doen. De Europese interne besluitvoering heeft het hele ITER-proces vertraagd, daar zijn jaren achterstand opgelopen.”

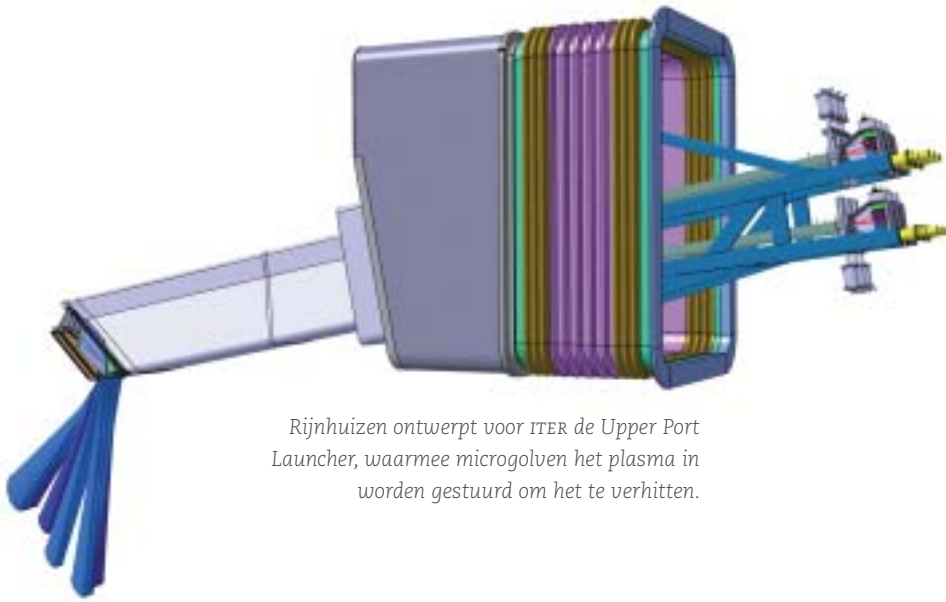
Achteraf gezien had Europa helemaal niet mee moeten doen aan ITER, maar zelfstandig een opvolger voor JET moeten bouwen. Dat is althans de mening van fysicus Paul Vandenplas van het fusielaboratorium aan de Koninklijke Militaire School in Brussel. „Europa kon het doen, Europa heeft het nodig en Europa heeft

vijftien jaar verspild. Dat is enorm.” De plannen voor NET, de Next European Torus, zijn al in een vergevorderd stadium als het idee voor ITER opkomt. Oorspronkelijk zou ITER veel groter worden dan NET, maar in de afgeslankte vorm ontlopen beide tokamaks elkaar maar weinig. „Achteraf was het beter geweest door te gaan met NET”, denkt Vandenplas. „Die reactor had nu kunnen draaien.” Dat de zeven ITER-deelnemers, goed voor de helft van de wereldbevolking, samenwerken in een wetenschappelijk project, is prachtig. Maar het maakt beslissingen nemen ingewikkeld. „Met zeven gaat alles trager, onvermijdelijk”, aldus Vandenplas. Nu duurt het nog minimaal tot 2018 voor ITER zijn eerste plasma produceert.

SEPTEMBER 2004: FOM-directeur Hans Chang pleit in 2003 in een ‘zeepkistcolloquium’ op Rijnhuizen voor een goede wetenschappelijke infrastructuur. Na de lezing wordt hem de verouderde depositie-apparatuur van het laboratorium getoond. Met succes: anderhalf jaar later heeft Rijnhuizen een nieuwe meerlaags-depositiefaciliteit.

2004





Rijnhuizen ontwerpt voor ITER de Upper Port Launcher, waarmee microgolven het plasma in worden gestuurd om het te verhitten.

Maar nu de locatie vaststaat, kan er weer worden gewerkt. De komst van ITER pakt goed uit voor Rijnhuizen. Er is rond de eeuwwisseling bezuinigd op fusie en het instituut heeft een paar moeilijke jaren achter de rug. Maar nu wereldwijd de steun voor fusie weer groeit, blijft FOM niet achter. Rijnhuizendirecteur Aart Kleyn herinnert zich hoe de stemming omsloeg: „Toen ik hier in 2003 kwam, dachten veel mensen dat FOM fusie formeel zou stoppen. Na de bezuiniging van FOM in 2000 zou er nu de streep door worden gehaald. Maar tot ieders verbazing was fusie in het strategisch plan van FOM van 2004 een prioriteitsgebied. Dat kwam puur door ITER.”

Nederland mocht niet achterblijven, vond FOM-directeur Chang:

„Toen de wereld besloten had dat ITER er moest komen, heeft FOM besloten om onze fusie-inspanningen niet verder terug te brengen. Dan wil je dat Nederland op bescheiden wijze meedoet.” Die ervaring gold niet alleen voor ons land, zo vertelt Kleyn: „Fusie veranderde in een paar jaar van bijna een sterfhuis naar het vlaggenschip van de Europese wetenschap.”

Nu ITER er komt, staat het Euratom-onderzoek volledig in het teken van dit project. Er is eenvoudigweg geen geld voor andere grote fusieprojecten. Ook op Rijnhuizen staat het overgrote deel

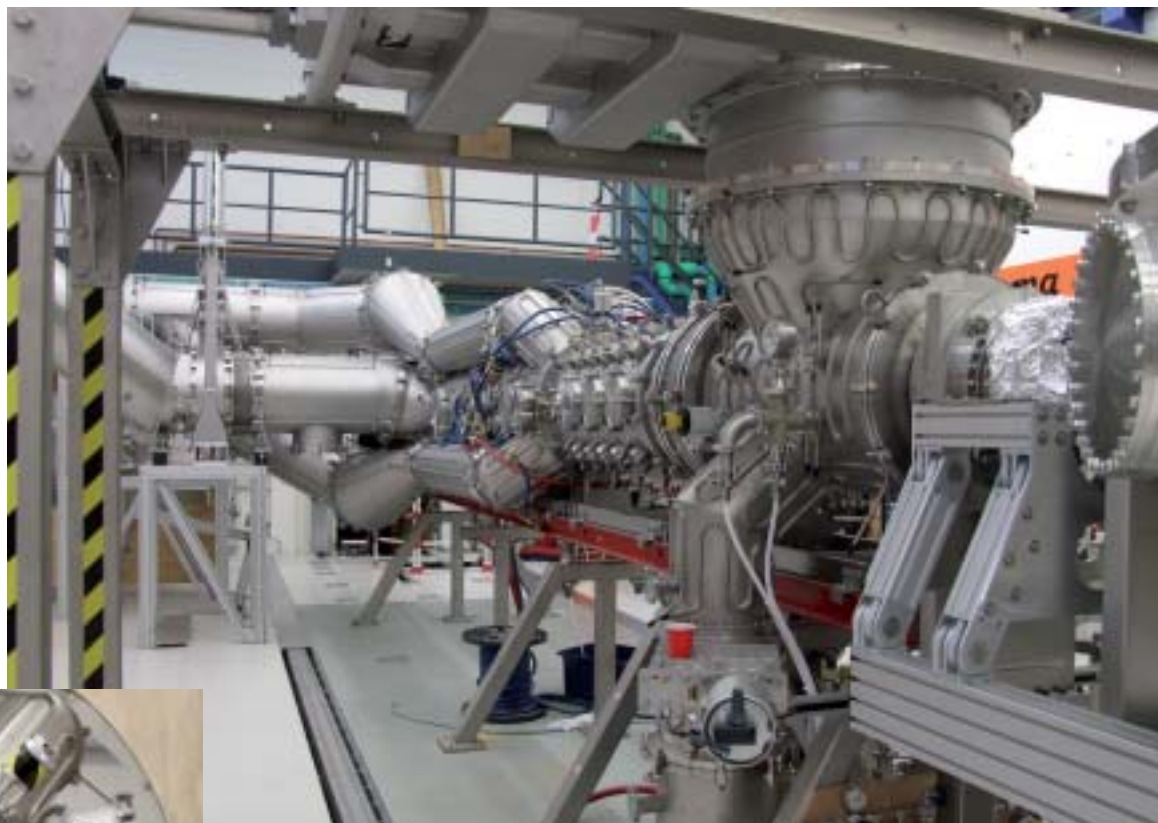
van het fusie-onderzoek in dienst van ITER. Het instituut coördineert de bouw van twee onderdelen, die beide door een Europees consortium worden ontwikkeld. Het eerste is de Upper Port Launcher, een project dat aansluit bij Rijnhuizen's onderzoekstraditie op het gebied van microgolvenverhitting. Door een poort boven in de torus worden hoogvermogen microgolven het plasma ingejaagd. De microgolffbron is nauwkeurig te richten, waardoor het plasma gericht verhit kan worden. Deze lokale verhitting is nodig om de vorming van instabiliteiten te onderdrukken.

Het tweede onderdeel is de poortplug Upper Port Viewer. Dit is een diagnostisch systeem, dat de interactie van het plasma met neutraal waterstof registreert. Dat geeft informatie over de

7 OKTOBER 2004: 150 gasten wonen de onthulling bij van de bronzen plaquette ter nagedachtenis aan oud-directeur Kees Braams.



De opstelling
Magnum-PSI,
voor het bestuderen
van de invloed
van plasma op
materialen.



temperatuur van de ionen, de rotatie van het plasma en de hoeveelheid helium in het plasma.

Het derde grote fusieproject op Rijnhuizen neemt een hele hal in beslag. De nieuwe opstelling Magnum-PSI blinkt, zo nieuw is hij nog. De bouw van het experiment begon in 2008. Het is de grote opvolger van Pilot-PSI, waarin met een intens waterstof-

25 JANUARI 2005: 25 Europarlementariërs schuiven aan bij een door Rijnhuizen georganiseerd dinerdebat in Brussel. Naast het debat is er een vijfdaagse tentoonstelling over fusie in het parlamentsgebouw.

2005



JUNI 2005: De Fusion Road Show geeft zes voorstellingen op het festival Science Unlimited, het hoofdevenement van het jaar van de natuurkunde in Nederland.

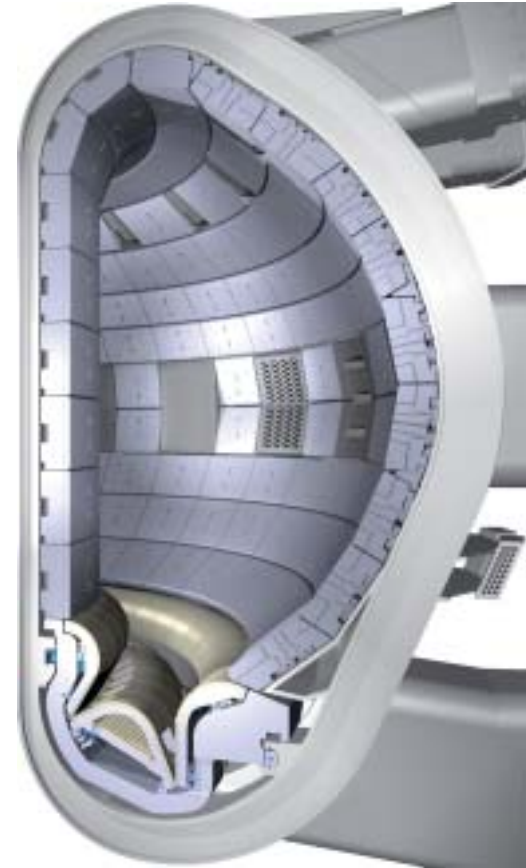


plasma kon worden onderzocht hoe slijtvast materialen zijn. Ook in Magnum-PSI bootsen de onderzoekers de omstandigheden na van de fusiereactor ITER; ze stellen wandmaterialen bloot aan hete plasma's. Zo testen ze de slijtvastheid van het materiaal, maar ook welke moleculen en radicalen er bij die interactie ontstaan.

Rijnhuizen heeft slim ingezet met dit materiaalonderzoek. De wand wordt wel de achilleshiel van de fusiereactor genoemd. Vooral de divertor, de uitlaat van de reactor, krijgt het zwaar te verduren. Die is ontworpen om het helium uit het plasma af te voeren. Maar ook de rest van de wand moet sterk genoeg zijn om het hete plasma op te vangen, wanneer dat door instabiliteiten uit de bocht vliegt. Ondanks alle corrigerende maatregelen zal dat af en toe gebeuren. En iedere keer dat dit gebeurt, brandt er een laag van het wandmateriaal af. Voor commerciële fusie-energie is het van levensbelang, dat de wand niet al te vaak vervangen hoeft te worden. Dat zou de kosten fors opdrijven. Het thema zal de komende decennia hoog op de agenda staan.

Ook de belangstelling voor het fusie-onderzoek bij jonge wetenschappers is de laatste jaren gegroeid. Het vakgebied kon tien jaar geleden maar moeilijk concurreren met 'sexy' vakgebieden als de hoge-energiefysica, waar fundamentele vragen worden gesteld over de oorsprong en samenstelling van het heelal. Nu willen jonge wetenschappers graag een bijdrage leveren aan het oplossen van het energieprobleem. Chang: „De wereld van de fusie was een periode behoorlijk stoffig. Met ITER is dat duidelijk voorbij.” ■

De dikke wand van het reactievat van ITER



2005: Begin van de bouw van Magnum-PSI, de opvolger van Pilot-PSI. Met deze opstelling kan de interactie tussen materialen en plasma worden bestudeerd.



28 JUNI 2005: De verantwoordelijke ministers nemen in Moskou het besluit: de internationale fusiereactor ITER komt in Frankrijk.

Hoofdstuk 10

Je moet het onderzoeken

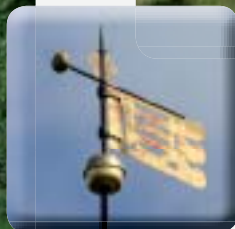
In 1959, het jaar dat Rijnhuizen werd opgericht, leefden er drie miljard mensen op aarde. Bij het vijftigjarig bestaan van het instituut in 2009 is dat aantal meer dan verdubbeld tot 6,8 miljard. In 2050 zullen er vermoedelijk 9 miljard mensen op aarde zijn. Door de groeiende wereldbevolking en de toenemende welvaart verbruikt de mensheid dan twee keer zoveel energie als nu. De komende eeuw moet bovendien de overgang van olie en kolen naar meer duurzame energiebronnen worden gemaakt: door slinkende voorraden, maar vooral vanwege de broeikasgassen en vervuiling die bij de verbranding vrijkomen.

Het werken aan energie wordt ook het grote, overkoepelende onderwerp voor het onderzoek op Rijnhuizen, vertelt directeur Aart Kleyn. „Het probleem van de wereldenergievoorziening is niet zomaar binnenkort opgelost. Dit wordt het verbindend thema voor het instituut, de gemeenschappelijke motivatie.”

Een van de nieuwe onderzoekslijnen is het splitsen van water in de brandstof waterstof en in zuurstof, met hulp van zonlicht en een katalysator. Het instituut ontving begin 2009 van nwo, de Nederlandse organisatie voor wetenschappelijk onderzoek 750.000 euro om het onderzoekgebied te verkennen. „Ik zie het als zaaigeld voor een avontuur waarvan we nu nog niet kunnen zeggen wat eruit komt”, aldus fysicus Fred Bijkerk, hoofd van



2005: Het Ministerie van Cultuur, Recreatie en Maatschappelijk Werk bepaalt dat het landgoed Rijnhuizen een historisch landgoed is, wat betekent dat de tuin en het kasteel moeten blijven zoals ze zijn.





de groep *nanolayer Surface and Interface Physics* (nSI). Het idee is om een dunne laag katalysator op een oppervlak te hechten. Die laag moet de ionisatie van water vergemakkelijken, zodat het minder energie kost om het molecuul te splitsen. Daarbij komt de grote ervaring van het instituut met het opdampen van dunne lagen goed van pas. Ook de vrije-elektronenlaser Felix zal voor dit onderzoek worden ingezet. Felix en de uitbreiding Felice blijven voorlopig nog beschikbaar voor onderzoek.

Daarnaast loopt ook het onderzoek naar

Felice, de uitbreiding van vrije-elektronenlaser Felix

fusie op Rijnhuizen door. Dat onderzoek staat grotendeels in het teken van de internationale fusiereactor ITER. De route naar commerciële fusie is zorgvuldig uitgestippeld. Bij ITER moet fusie voor het eerst meer vermogen opleveren dan de reactor verbruikt. Daarna zal een demonstratiereactor, DEMO, worden gebouwd die daadwerkelijk stroom levert aan het net. In het snelste scenario

5 DECEMBER 2005: India stapt in, als zevende partner van internationale tokamak ITER.



2006

JANUARI 2006: ITER-NL gaat van start. Dit consortium van FOM, TNO en NRG heeft als doel om Nederlandse bedrijven te informeren over ITER en te begeleiden bij het binnenhalen van opdrachten voor de bouw van de internationale tokamak.



Tekening van de ITER-gebouwen in Cadarache.



zal er halverwege de eeuw fusie-energie uit het stopcontact kunnen komen, zo concludeerde de wetenschappelijk adviseur van de Britse overheid, Sir David King, in een rapport in 2001. Hoe snel de ontwikkeling zal gaan, hangt grotendeels van het



succes van ITER af. De Belgische fusiefysicus Paul Vandenplas schetst drie scenario's. In het eerste doet ITER het fantastisch. „Dan komen er snel opvolgers, meer dan één.” Als ITER een doorslaggevend succes wordt, bouwen Amerika en Europa waarschijnlijk ieder een opvolger. Maar ook in de Aziatische landen verrijzen dan vermoedelijk DEMO's. In Azië stijgt de energiebehoefte sterk, door een groeiende bevolking, maar vooral door de toenemende welvaart. Alleen China al bouwt momenteel een kleine honderd kolencentrales per jaar. China, Japan, India en Zuid-Korea doen daarom allemaal mee aan de bouw van ITER: zij willen de technologie kunnen gebruiken als fusie succesvol wordt.

Vandenplas gaat verder. „Dan is er het negatieve scenario, ITER is een ramp. Dan weet ik niet wat er gebeurt, werkelijk niet. En dan is de derde optie – het is grijs, zoals dikwijls in het leven. Dan hangt het af van de energietoestand van dat moment... zal er één opvolger zijn, of zelfs meerdere? Zelfs bij grijs is het niet uitgesloten dat het er meerdere zullen zijn.”

Volgens de fysici van Rijnhuizen is de grootste vraag niet meer of fusie technisch haalbaar is. Belangrijker is of het commercieel aantrekkelijk te maken is. De grootste kosten van fusiestroom



22 FEBRUARI 2006:

Chipmachinefabrikant ASML presenteert het eerste prototype van de extreem uv-wafer-scanner. In het apparaat zitten spiegels die Zeiss en Rijnhuizen hebben gemaakt.

2006

19 FEBRUARI 2006: Er breekt brand uit in de kelder van Rijnhuizen. Niemand raakt gewond, de materiële schade is groot. Het kost een halfjaar om de vrije-elektronenlaser Felix weer werkend te krijgen.





zitten niet in de brandstof, die is goedkoop en ruim voorradig. Wat een fusiecentrale duur maakt, is de ingewikkelde technologie. De bouw van een fusiecentrale zal in de miljarden lopen. De grootste kostenpost zijn de supergeleidende spoelen, die het magneetveld opwekken om het plasma in bedwang te houden. Zij zijn goed voor ruim een derde van de kosten. Een belangrijke onzekerheid in de berekening van de kostprijs van fusiestroom is de wand van de centrale. Deze slijt wanneer hij in contact komt met het hete plasma. De vraag is hoe vaak de centrale zal moeten stilgelegd om de wand te vervangen – een klus voor robots, omdat het wandmateriaal door het bombardement van hoog energetische deeltjes licht radioactief wordt. De brandstof voor fusie mag dan goedkoop

Ontwikkeling van fusiereactoren volgens de Fast Track – op naar commerciële fusie-energie tegen de helft van de 21e eeuw.

zijn, als de reactor in hoog tempo wanden verstoekt, kan fusie niet concurreren met andere energiebronnen.

Volgens fysicus Chris Schüller is het wandmateriaal de achilleshiel van de fusiereactor: „Ik ben ervan overtuigd dat we straks in ITER een plasma kunnen maken dat, zeg, tien minuten brandt en dat we dat ook nog tien of honderd keer kunnen herhalen. Maar op een gegeven moment gaat de wand ons opbreken. Mijn grootste zorg is of men uiteindelijk materialen kan maken die tegen die hoge belasting bestand zijn.” Ondanks deze onzekerheid is er volgens de fysicus geen andere keus dan doorgaan met het onderzoek. Schüller: „Zolang er geen duidelijk scenario is hoe we in de toekomst onze energie op zullen wekken, moeten we doorgaan.” Dat zeggen ook de andere



MEI 2006: De onderzoeksgroep LPX (Laser Plasma en X-ray Optiek) is uitgegroeid tot zelfstandige afdeling en gaat onder de naam nSI (nanolayer Surface and Interface Physics) verder.

OKTOBER 2006: Op het EUVL-symposium in Barcelona maakt Rijnhuizen bekend een spiegel voor extreem ultraviolet licht te hebben gemaakt met meer dan 70 procent reflectie: een nieuw wereldrecord.



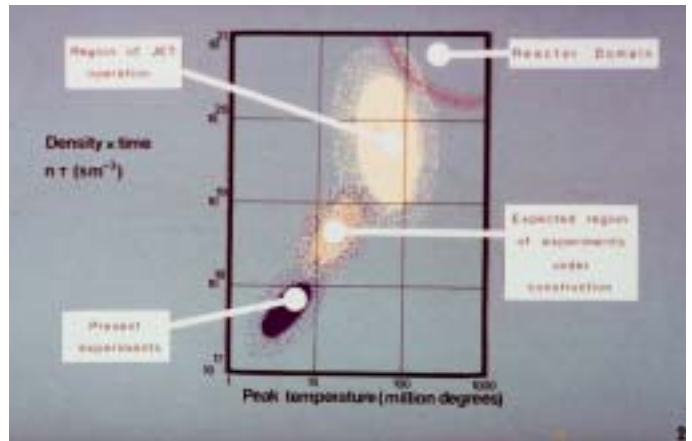
fysici op Rijnhuizen – we kunnen het ons niet veroorloven om kernfusie niet serieus te onderzoeken. Want zoveel alternatieven voor olie en kolen zijn er niet. Met ITER wil de fusiegemeenschap een oude belofte inlossen: een fusiereactor waar meer energie uitkomt, dan erin gaat. Toen Rijnhuizen werd opgericht, had niemand gedacht dat het zo lang zou duren voor het zover zou zijn. Toenmalig directeur Kees Braams wilde zich in 1959 niet aan speculaties wagen. Op de vraag van journalist Hans Friedeman van dagblad *Het Centrum* hoe lang het zal duren voor men ‘slechts waterstof uit de wereldzeeën hoeft te halen om de energievoorziening gaande te houden’, antwoordde Braams voorzichtig: “We weten wel waar we beginnen, maar niet waar we eindigen.”

„Toen de eerste grote experimenteerhal van Rijnhuizen af was, in 1961, was de hoop al vervlogen dat het in een jaar of tien gedaan zou zijn”, vertelt Jan Terlouw, die van 1958 tot 1971 als fysicus op het instituut werkte. „Bij een congres werden een keer de meningen gepeild. Ik weet nog dat directeur Kees Braams toen 1984 invulde, een grapje vanwege het boek 1984 van George Orwell. Voor ons was dat toen nog heel ver weg.”

Het lukte niet, 1984 kwam te snel. Het instituut vierde dat jaar het 25-jarig bestaan. ‘Toen FOM het besluit nam om een Instituut voor Plasmafysica te stichten, was niet vanzelfsprekend dat er 25 jaar later nog altijd een grote taak voor dit Instituut weggelegd zou

Begin jaren 1970 was JET nog ver weg.

ITER markeert het begin van het ‘reactordomein’.



zijn’, schrijft Braams in de jubileumuitgave van het personeelsblad. Hij vindt het ‘begrijpelijk dat er enige teleurstelling doorklinkt’ nu blijkt dat er meer dan een kwart eeuw nodig is om ‘met de gezamenlijke inspanning van enkele duizenden onderzoekers over de hele wereld de fysische grondslagen te leggen voor het ontwerp van een fusiereactor’. Maar volgens de directeur komt het oponthoud niet als een verrassing, omdat ze bezig zijn om ‘een voorheen volstrekt onbekend terrein’ te verkennen.

De traditionele aanpak van fysische problemen heeft bij de plasmafysica niet gewerkt, concludeert Braams. ‘Ik doel op het isoleren van de verschijnselen, wat men doet door omstandigheden te scheppen waarin één fenomeen domineert en allerlei storende factoren worden geëlimineerd’. Wie het plasma in een tokamak of schroefpinch wil begrijpen, moet de hele voorgeschiedenis van de ontlading kennen, aldus Braams. ‘De grootheden waarin de eigenschappen van (...) de plasma’s worden uitgedrukt, kunnen factoren duizend of miljoen uiteenlopen, waardoor het plasma bij de wand in karakter totaal verschilt van dat in het cen-

2006

2007

24 NOVEMBER 2006:
De oprichting van de organisatie ITER: de zeven deelnemers tekenden het ITER-verdrag.

4 MEI 2007: Het eerste licht van Felice, de uitbreiding van de vrije-elektronenlaser Felix. In Felice zijn metingen mogelijk bij een hogere intensiteit laserlicht.





trum, met andere methoden moet worden bestudeerd en met andere theoretische modellen moet worden beschreven'.

In zijn jonge jaren is het fusie-onderzoek vergaan zoals het veel nieuwe wetenschapsgebieden vergaat: er werd te veel beloofd. Vooral in Amerika, waar de strijd om onderzoeksbudgetten ieder jaar opnieuw moest worden gestreden. Maar door technische moeilijkheden werden de deadlines niet gehaald. Binnen twintig jaar, eind jaren tachtig, voor het einde van de eeuw – dat moet toch lukken?

Inmiddels is de eeuwwisseling geweest. De Europese fusiereactor JET heeft laten zien dat het mogelijk is om langere tijd een fusiereactie op gang te houden, maar er ging nog altijd meer energie de reactor in dan er door fusie ontstond. Elektriciteit is er met fusie nog niet gemaakt. De beloften uit de jaren zeventig en tachtig zijn dus niet waargemaakt. Volgens theoreticus Hans Goedbloed komt dat, doordat de beloften veel te rooskleurig waren: „Vooraf tijdens de oliecrises is er veel te veel beloofd; de reactor zou er over tien, vijftien jaar zijn. Dat was dom. Op de korte termijn leverde het geld op, op de lange termijn het imago dat die fusielui maar wat beloven. En daardoor ontstaat het beeld dat er geen vooruitgang is geboekt, de afgelopen decennia.” Dat

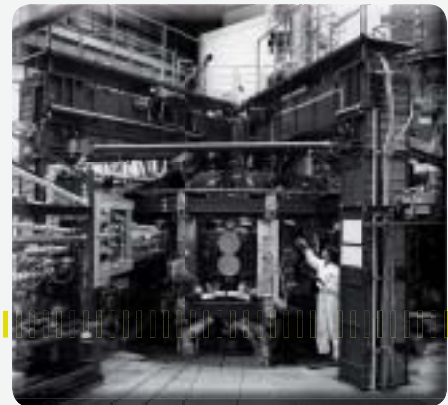
De opstelling voor materialenonderzoek, Magnum-PSI, is in 2009 nog in opbouw.



beeld is onterecht, benadrukt hij. „De ontwikkeling is reusachtig geweest, vergelijkbaar met die van de computerchip.”

Fysici drukken de prestatie van een reactor uit met zijn tripelproduct – de opsluittijd maal de dichtheid maal de temperatuur van de reactor. De Europese reactor JET presteert volgens die maat meer dan 10.000 keer beter dan de Russische tokamak T3 uit 1968. De stap van JET naar de netto energieproducerende fusiereactor ITER is slechts een factor 10.

18 JUNI 2009: Het eerste plasma in het plasma-wand-experiment Magnum-PSI.



10 JULI 2009: Feestelijk afscheid van het FOM-team bij Textor.



Rijnhuizen ontwikkelt spiegels voor extreem ultraviolet licht, die in de chipindustrie worden ingezet.

uiteindelijk moeten overnemen van de wetenschappers. Dat zal in de jaren dertig, veertig moeten zijn. „De verwachting is dat de fusie-afdeling op Rijnhuizen uiteindelijk meer een ondersteunende afdeling wordt”, aldus directeur Kleyn. „Maar het is moeilijk zo ver vooruit te kijken.”

Fusie is volwassen aan het worden. Volgens Kleyn gaat het onderzoek met ITER een nieuwe fase in: „ITER hangt tussen twee werelden: het is geen fundamentele fysica zoals de deeltjesversneller van CERN, maar het is ook niet vergelijkbaar met het bouwen van een windmolenpark op zee. Daar is fusie nog niet klaar voor, maar het begint er tussenin te zweven.”

Dat is ook terug te zien in de financiering van het instituut. Het onderzoek op Rijnhuizen werd door de overheid altijd gezien als fundamenteel onderzoek en niet als toegepast energieonderzoek. Rijnhuizen had ook altijd een moeizame relatie met het Ministerie van Economische Zaken, maar die is met de komst van ITER verbeterd. Zo wilde het ministerie in 2000 nog geen geld uit de aardgasbaten beschikbaar stellen voor het onderzoek. Maar toen was besloten dat ITER er kwam, kreeg het instituut alsnog een deel van deze aardgasgelden voor het opzetten van ITER-NL, een samenwerkingsverband om Nederlandse bedrijven te betrekken bij de bouw van ITER. Uiteindelijk zullen ook de energieproducenten moeten inspringen: zij zullen het stokje

Voorlopig brengt ITER veel werk naar Rijnhuizen. Behalve een diagnostisch apparaat en een verhittingssysteem is er Magnum-PSI, de machine waarin de interactie tussen plasma en materialen wordt onderzocht. Werk dat ook al over ITER heen kijkt en bij moet dragen aan het ontwerp van opvolger DEMO. Ook het onderzoek met Felix en het werk van de afdeling nSI loopt door. Maar wat voor onderzoek het instituut doet in 2059, het honderdjarig jubileum? Daar durft niemand naar te gissen. Een wetenschappelijke ontwikkeling die nu belangrijk lijkt, kan over tien jaar achterhaald zijn – en andersom. ‘We weten wel waar we beginnen, maar niet waar we eindigen’, om oud-directeur Braams te citeren. ■

16 NOVEMBER 2009:
Het 50-jarig jubileum
van FOM-Rijnhuizen.

2009



1959 | 2009

Colofon

Tekst: Anouck Vrouwe

Redactie: Noud Oomens, Gieljan de Vries

Beeldredactie: Alex Poelman, Gieljan de Vries, Anouck Vrouwe

Ontwerp en druk: Drukkerij Badoux, Houten

Met dank aan

de geïnterviewden: Fred Bijkerk, Lieke Braams, Hans Chang, Bart de Groot, Tony Donné, Hans Goedbloed, Johan Hovestrijdt, Albert Hugenholtz, Ad van Ingen, Jules Klees, Aart Kleyn, Hans de Kluiver, Wim Kooijman, Niek Lopes Cardozo, Gerard Meijer, Lex van der Meer, Adri Nijssen-Vis, Noud Oomens, Elly Plooi-j-van Gorsel, Daan Schram, Chris Schüller, Paul Smeets, Jan Terlouw, Marnix van der Wiel, Louis van der Woerd, Paul Vandenplas
en aan: Huub Eggen, Noortje Khan, Martine van Harderwijk, Mark Westra, Ogé Kruijt en alle anderen die hebben bijgedragen aan dit boek.

Copyright FOM-Rijnhuizen, 2009

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van FOM-Rijnhuizen.

1959 | 2009

Foto voorpagina: plasma in een wervelexperiment op FOM-Rijnhuizen

Beeldverantwoording: Wij willen graag de volgende personen en instanties bedanken voor hun toestemming voor het afdrucken van de beelden:

Utrechts Archief (pagina 6), The Cavendish Laboratory/University of Cambridge (7), NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STSCI/AURA)- ESA /Hubble Collaboration (8), Hinode JAXA NASA (8), ESA/NASA (9), Melvin A. Miller, Argonne National Laboratory (10), Radiochemistry Society (10, 14), NASA /JPL-Caltech/ Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental (10), IAEA (14, 20, 21, 25), Verenigde Naties (15), EFDA/JET (16, 19, 60, 68, 70, 74, 75, 76, 78, 80, 81, 87), Ministerie van Buitenlandse Zaken (17), Lieke Braams (23, 66), Bouwmans (24, 112), Lawrence Livermore National Laboratory & Department of Energy (32), Piet van der Laan (37, 39), Princeton Plasma Physics Laboratory (42, 67, 85, 83), Daan Schram (43), Forschungszentrum Jülich GmbH (46, 68, 77, 86, 113), NAM (64), Warren K. Leffler, US News & World Report Magazine/US Library of Congress (66), Utah University (69), ITER (71, 96, 99, 100/101, 102, 104, 107, 109, 110), Ronald Reagan Museum, Eureka College, US (72, 98), Chris Carpenter/JET (80), Annette Huysink (82), 't Sticht, Ton Minnen (84, 87, 89, 100), Wim van Zanten (86), Maarten Hartman (90), Picture Report (90), IoP (97), Rijnhuizen Uitgebeeld (99), ITER-NL (101, 109), Eric Verdult (111).

Bij het samenstellen van dit boek is de grootste inspanning verricht om alle rechthebbenden van beeldmateriaal te bereiken en toestemming te vragen voor publicatie. Als u desondanks meent, dat er in dit boek ten onrechte beeldmateriaal is opgenomen, neemt u dan contact op met FOM-Rijnhuizen.

■ Tijdens de tweede Atoms for Peace-conferentie in Genève in 1958 spelen de Verenigde Staten, de Sovjet-Unie en Groot-Brittannië open kaart. De landen declassificeren een groot deel van het onderzoek naar een fusiereactor. Voor Nederland is dat goed nieuws: de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) heeft net besloten dat ons land moet aansluiten bij het internationale fusie-onderzoek. Op 16 november 1959 opent minister Cals het FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen. In *Hittebarrière* is te lezen hoe het instituut zich ontwikkelde tot wat het nu is: een modern laboratorium, waar onderzoek wordt gedaan naar fusie en optica voor de computerchip-industrie. Daarnaast heeft Rijnhuizen een infraroodlaser in huis, die gebruikers van over de hele wereld naar Nieuwegein trekt. ■

1959 | 2009

■ Wetenschapsjournalist Anouck Vrouwe studeerde natuurkunde. Tegenwoordig combineert ze haar passie voor wetenschap en techniek met de liefde voor het woord. Zij schreef het boek *Hittebarrière* voor het vijftigjarig jubileum van FOM-Rijnhuizen. ■

